

Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke

Urs Müller

Mineralische Baustoffe

Untersuchen, Bewerten
und Konservieren



Fraunhofer IRB  Verlag

Urs Müller

Mineralische Baustoffe

Untersuchen, Bewerten
und Konservieren

Urs Müller

Mineralische Baustoffe

Untersuchen, Bewerten und Konservieren

Fraunhofer IRB Verlag

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

ISBN (Print): 978-3-7388-0503-1

ISBN (E-Book): 978-3-7388-0504-8

Lektorat: Claudia Neuwald-Burg

Redaktion: Annemarie Klepacki

Layout · Herstellung · Satz: Gabriele Wicker

Umschlaggestaltung: Martin Kjer

Druck: Offizin Scheufele Druck und Medien GmbH & Co. KG

Die hier zitierten Normen sind mit Erlaubnis des DIN Deutsches Institut für Normung e.V. wiedergegeben. Maßgebend für das Anwenden einer Norm ist deren Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die bei der Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, erhältlich ist.

Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlags unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

© Fraunhofer IRB Verlag, 2021

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Telefon +49 711 970-2500

Telefax +49 711 970-2508

irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

VORWORT

Baustoffe gehören zu den Grundstoffen, auf denen unsere Gesellschaften aufbauen. Ihre zielgerechte Nutzbarmachung und Weiterentwicklung ermöglichte der Menschheit erst den heutigen sozialen und technologischen Stand, durch Schaffung von sicheren Wohn- und Arbeitsstätten sowie den sukzessiven Ausbau der unterschiedlichen Infrastrukturen. Die Nutzung der verschiedenen Baustoffe ist uns heute so selbstverständlich, dass wir sie als Ressource im alltäglichen Umgang oftmals nicht mehr wertschätzen. Baustoffe werden in ungeheuren Mengen verwendet, um den Bedürfnissen einer steigenden Weltbevölkerung gerecht zu werden. Aber die globale Verwendung in bisher nicht gekannten Ausmaßen stellt uns vor neue Herausforderungen in den Bereichen Umwelt und Nachhaltigkeit, da die Ausgangsstoffe, auch die der mineralischen Baustoffe, aus natürlichen Vorkommen entnommen und zurzeit leider nur in begrenztem Maße rückgewonnen und wiederverwertet werden.

In den letzten Jahrzehnten wurden die Wieder- und Weiternutzung für Baukonstruktionen konsequenter in Betracht gezogen als für Baumaterialien. Grund dafür waren kulturelle Aspekte und ökonomische Rahmenbedingungen. Für die Bauwerkserhaltung und Altbauinstandsetzung existieren deshalb bereits vielfältige Konzepte und Lösungswege, die zumindest eine längere Nutzungsdauer der Bauwerke ermöglichen. Um diese Erhaltungs- und Instandsetzungskonzepte substanzschonend und zielgerichtet anwenden zu können, müssen Planer und Ausführende die technischen Eigenschaften von Baustoffen im Bestand genau kennen. Ihr Wissen darf sich dabei nicht auf die vorhandenen, in manchen Fällen historischen und heute nicht mehr produzierten Baustoffe beschränken, sondern es muss auch modernere Materialien umfassen, die dann für Reparatur-, Verstärkungs- und Instandsetzungsmaßnahmen eingesetzt werden.

Die im Buch behandelten Themenfelder stammen aus dem Aufbaustudiengang »Altbauinstandsetzung« des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), zu dem ich mit der Vorlesung »Mineralogie in der Bauwerkserhaltung« zwischen 2007 und 2020 beitragen durfte. Ziel der Vorlesung und dieses Buches ist es, Fachleuten aus verschiedenen Disziplinen in der Altbaubewahrung und -instandsetzung einen Leitfaden für mineralische Baustoffe an die Hand zu geben. Der Leitfaden soll einen Überblick über die am meisten verwendeten mineralischen Baustoffe

geben, die teilweise eine sehr lange Geschichte haben und im historischen Bestand häufig angewendet wurden. Das vermittelte Wissen soll bei konkreten Projekten helfen, geeignete Maßnahmen für den substanzschonenden Umgang mit den vielfältigen Baustoffen zu treffen. Dabei ist in der alltäglichen Arbeit vor allem die Kommunikation zwischen verschiedenen Akteuren wichtig. Erfahrungsgemäß sind bei der Zusammenarbeit von Kolleginnen und Kollegen verschiedener Disziplinen ein Basiswissen in der Baustoffkunde sowie eine gemeinsame Terminologie vonnöten, um Missverständnisse zu vermeiden. Das Buch wendet sich deshalb an Leserinnen und Leser, die mit mineralischen Baustoffen nicht oder nur wenig vertraut sind und sich ein Basiswissen über Herstellung, Eigenschaften, Erkennungsmöglichkeiten und Bewahrung aneignen wollen. Der Schwerpunkt liegt hierbei weniger auf mechanischen Kennwerten von Baustoffen, sondern auf den chemischen und mineralogischen Stoffeigenschaften, die oftmals entscheidend für ihre Beständigkeit sind.

Urs Müller, Januar 2021

DANKSAGUNG

Das vorliegende Buch wäre ohne die Anregung und den Einsatz meiner ehemaligen Kollegin und Lektorin vom Fraunhofer IRB Verlag, Frau Claudia Neuwald-Burg, nicht zustande gekommen. Sie inspirierte mich, meine Vorlesungsinhalte in ein Buch einfließen zu lassen und begleitete dieses mit sachverständiger Diskussion und viel Geduld. Frau Annette Busse möchte ich für die Gelegenheit herzlich danken, am Aufbaustudiengang »Altbauinstandsetzung« als Vortragender teilnehmen zu dürfen. Meine beruflichen Weichen wurden nicht unwesentlich durch meine Lehrer und Mentoren während meines Studiums und meiner Promotionsarbeit gestellt. Besonders danken möchte ich hierfür Herrn Egon Althaus und Herrn Fritz Wenzel, die mir wesentliche Impulse für meine berufliche Entwicklung mit auf den Weg gaben.

Für die Zurverfügungstellung von Bildmaterial möchte ich folgenden Personen und Firmen danken: Herrn Hartmut Pliett, Herrn Christof Ziegert, ZRS Architekten Ingenieure sowie Frau Katarina Malaga, Herrn Mariusz Kalinowski und Herrn Björn Schouenborg. Zum Schluss möchte ich meiner Lebenspartnerin Katarina meine Dankbarkeit aussprechen, die mich beim Verfassen des Texts ermunterte und unterstützte, aber auch half, zwischendurch den notwendigen Abstand vom Schreiben zu gewinnen.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	11
1.1	Mineralogische Prozesse in der Baustoffkunde	12
1.2	Mineralische Baustoffe	17
2	Mauersteine	21
2.1	Naturstein	23
2.1.1	Plattentektonik	24
2.1.2	Bildungsbereiche und Klassifikation von Natursteinen	25
2.1.3	Allgemeine Gesteinseigenschaften	29
2.1.4	Magmatite	33
2.1.5	Sedimente	37
2.1.6	Metamorphite	44
2.1.7	Regelwerke	47
2.2	Mauerziegel	48
2.2.1	Herstellung	50
2.2.2	Eigenschaften	54
2.2.3	Regelwerke	58
2.3	Lehmsteine	59
2.3.1	Lehm und Lehmsteine	59
2.3.2	Herstellung	60
2.3.3	Eigenschaften	62
2.3.4	Regelwerke	67
2.4	Kalksandsteine und Porenbeton	68
2.4.1	Herstellung	68
2.4.2	Eigenschaften	71

3	Bindemittel und Mörtel	73
3.1	Übersicht über Bindemittel im Mauerwerksbau	73
3.2	Kalkbasierte Bindemittel und Mörtel	74
3.2.1	Einteilung von Kalkbindemittel nach DIN EN 459-1	75
3.2.2	Kalkkreislauf – Luftkalke	75
3.2.3	Herstellung von Kalkbindemittel und Mörtel	76
3.2.4	Erhärtung von Kalkbindemittel	82
3.2.5	Eigenschaften historischer Kalkmörtel	84
3.3	Gips	85
3.3.1	Herstellung	87
3.3.2	Erhärtung von Gips	90
3.3.3	Anwendung und Eigenschaften	91
3.4	Zement und Portlandzement	94
3.4.1	Herstellung	95
3.4.2	Zementbestandteile, Erstarrung- und Erhärtungsreaktionen (Hydratation)	97
3.4.3	Zementarten	101
3.4.4	Eigenschaften historischer Zementmörtel	102
3.4.5	Romanzement	103
3.5	Lehmmörtel	105
3.5.1	Herstellung	106
3.5.2	Eigenschaften	107
3.6	Bindemittel und Mörtel – Regelwerke	110
3.6.1	Bindemittel	110
3.6.2	Mörtel	111
4	Beton	113
4.1	Was ist Beton?	113
4.2	Bezugsgrößen bei frischem und erhärtetem Beton	119
4.3	Die Geschichte des Betons und seine heutige Bedeutung	122
4.4	Herstellung	125
4.5	Eigenschaften historische Betone	125
5	Stampf- und Wellerlehm	131
5.1	Einleitung	131
5.2	Stampflehm	133
5.2.1	Anwendung	133
5.2.2	Herstellung	134
5.2.3	Eigenschaften	138

5.3	Wellerlehm	141
5.3.1	Anwendung	141
5.3.2	Herstellung	142
5.3.3	Eigenschaften	143
6	Anstrich- und Malfarben	145
6.1	Arten	146
6.1.1	Kalkfarben	147
6.1.2	Zementfarben	149
6.1.3	Silikatfarben	149
6.1.4	Dispersionsfarben	151
6.1.5	Silikonharzfarben	152
6.1.6	Ölfarben	152
6.1.7	Leimfarben	153
6.1.8	Weitere Farben	153
6.2	Eigenschaften und Anwendung	154
6.3	Arten von Pigmenten	156
6.4	Farbanalyse	159
7	Asbest in Bauprodukten	161
7.1	Historisches	161
7.2	Eigenschaften und Anwendung	163
7.3	Asbestarten	166
7.4	Identifizierung von Asbest	167
8	Analysenmethoden	169
8.1	Begriffe	169
8.2	Gefügeanalyse von Baustoffen	171
8.2.1	Stereomikroskopie	174
8.2.2	Polarisationsmikroskopie	176
8.2.3	Rasterelektronenmikroskopie	187
8.2.4	Quecksilberdruckporosimetrie	191
8.3	Phasenanalyse	194
8.3.1	Röntgenpulverdiffraktometrie (XRD)	194
8.3.2	Differentialthermoanalyse und Thermogravimetrie (DTA/TG)	200
8.3.3	Infrarotspektroskopie (IR) und Ramanspektroskopie	204
8.4	Chemische Analyse	208
8.4.1	Röntgenfluoreszenzanalyse	209
8.4.2	Mörtelanalyse	217
8.4.3	Salzanalyse und Feuchtegehalt	219

9	Schädigungsprozesse	225
9.1	Einflussfaktoren und Prozesse	225
9.2	Porosität in Baustoffen und Feuchtetransport	227
9.3	Allgemeine Schädigungsprozesse	232
9.3.1	Frostangriff	232
9.3.2	Salzangriff	237
9.3.3	Luftschadstoffe	244
9.4	Hygrothermische Schädigung – Wölbung von Marmorplatten	246
9.5	Schädigungsprozesse in Beton	248
9.5.1	Bewehrungskorrosion infolge von Carbonatisierung und Chloridtransport	249
9.5.2	Alkali-Kieselsäurereaktion (AKR)	254
9.5.3	Sulfatangriff	257
10	Konservierung und Schutzmaßnahmen	261
10.1	Festigung	262
10.1.1	Konzept	262
10.1.2	Kalk- und Barytwasser	264
10.1.3	Wasserglas	265
10.1.4	Polymere	266
10.1.5	Kieselsäureester	270
10.1.6	Kieselsole	273
10.1.7	Quellminderer	274
10.2	Hydrophobierung	276
10.2.1	Konzept	276
10.2.2	Silane und Silikonharze	278
10.2.3	Stearate	280
10.2.4	Anwendung	281
10.2.5	Risiken in Zusammenhang mit Hydrophobierungsmitteln	282
10.3	Schutz vor Graffiti	284
10.3.1	Graffitireinigung	286
10.3.2	Anti-Graffiti-Systeme (AGS)	287
10.4	Regelwerke	293
10.4.1	Steinfestigung und Steinerergänzungen	293
10.4.2	Hydrophobierung	294
10.4.3	Reinigung und Anti-Graffiti-Systeme	295
11	Literatur	297
	Stichwortverzeichnis	315

1 EINLEITUNG

Baustoffe sind komplexe Materialien. Sie können organische und anorganische Komponenten enthalten. Mineralwolle beispielsweise wird aus anorganischen Glasfasern hergestellt, die mit einem organischen Polymer überzogen sind. Als mineralische Baustoffe werden Materialien im Bauwesen bezeichnet, die hauptsächlich aus anorganischen, nichtmetallischen Rohstoffen bestehen, wie Sand, Lehm, Naturstein bzw. aus solchen hergestellt werden, wie Mörtel, Ziegel und Beton.

Fast alle mineralischen Baustoffe sind porös und können daher sowohl Luft als auch Feuchtigkeit transportieren. Dies ist ein wichtiger Unterschied zu anderen anorganischen Baustoffen, wie z. B. Metallen, die in der Regel keine vergleichbare Porosität besitzen.

Die Mineralogie ist ursprünglich eine Disziplin der Geowissenschaften. Sie beschäftigt sich mit natürlichen anorganischen Stoffen, den Mineralen. Historisch gesehen erforschen Mineralogen hauptsächlich die Entstehung und die Eigenschaften von Mineralen und Gesteinen. Weitere Themen sind Steine und Erden sowie Erze, die in der Erdkruste vorkommen und für die technische Produktion abgebaut, aufbereitet und veredelt werden. Inzwischen haben sich viele Teildisziplinen gebildet. Zum Beispiel beschäftigt sich die technische Mineralogie mit technischen Produkten, wie Glas, Keramik oder Zement, die Biomineralogie setzt sich mit organischen Mineralen auseinander, die von menschlichen oder tierischen Organismen gebildet werden.

Methodisch betrachtet ist die Mineralogie eine Materialwissenschaft, die an viele naturwissenschaftliche und technische Disziplinen angrenzt und teilweise in diesen aufgeht. Benachbarte Disziplinen sind z. B. Chemie, Physik, physikalische Chemie, Medizin, Biologie, Geologie, Metallurgie und Mathematik (Kristallografie). In der Baustoffkunde wird die Mineralogie zur Klärung der chemisch-mineralogischen Eigenschaften von Baumaterialien und zur Untersuchung von Schädigungs- und Zerfallsprozessen eingesetzt. Dabei wird mit mineralogischen Untersuchungsmethoden gearbeitet, die auch für Geomaterialien benutzt werden.

Neben Kenntnissen aus den Ingenieurwissenschaften wird in der Baustoffkunde chemisches, physikalisches und mineralogisches Wissen zur Klärung vielfältigster Fragestellungen angewendet. In der Bauwerksinstandsetzung und Bauwerkserhaltung ist die Baustoffkunde ein wichtiges Teilgebiet, das an weitere Disziplinen angrenzt, wie z. B. an Bauphysik, konstruktiven Ingenieurbau, Architektur, Baugeschichte und Denkmalpflege.

Für die Altbauinstandsetzung und die Denkmalpflege spielt die Baustoffkunde eine wichtige Rolle, da historische Bausubstanz oftmals sehr heterogen ist. Planer oder Architekten sind von der Vielfalt der anzutreffenden Materialien häufig überrascht. Um historische Bausubstanz soweit wie möglich zu bewahren und möglichst behutsam und schonend instand zu setzen, sind Kenntnisse aus der Baustoffkunde unabdingbar. Planer und Architekten müssen über die Vielfalt der Baustoffe und deren Eigenschaften möglichst gut Bescheid wissen. Dazu benötigen sie nicht unbedingt wissenschaftliche Detailkenntnisse. Sie sollten aber ausreichend sachkundig sein, um mit Experten anderer Fachgebiete klar kommunizieren zu können. Nur dann können sie den entsprechenden Experten die richtigen Fragen stellen und die Ergebnisse mineralogischer oder baustofftechnologischer Untersuchungsberichte verstehen. Dieses Buch soll die wesentlichen Grundlagen zum Verständnis anorganisch-mineralogischer Baustoffe vermitteln.

1.1 Mineralogische Prozesse in der Baustoffkunde

Baustoffe besitzen spezifische Charaktereigenschaften, die ihre technische Leistungsfähigkeit und ihre Lebensdauer bestimmen. Diese Eigenschaften sind auf die Bestandteile der Baustoffe und auf die Verbindungen der Einzelkomponenten zurückzuführen. Sie werden von einer Reihe von Parametern beeinflusst, wie Art, Anzahl, Größe und Form der einzelnen Komponenten. Auch die Orientierung der Komponenten zueinander spielt eine große Rolle. Diese Merkmale werden mit dem Begriff Gefüge umschrieben. Bild 1.1 gibt die unterschiedlichen Gefüge von drei verschiedenen Putzarten wieder. Die Proben wurden in blau gefärbtem Epoxidharz eingebettet und als Dünnschliffe präpariert. Dadurch lassen sich nicht nur die Gefügeeigenschaften der Baustoffe untersuchen, sondern auch ihre Bestandteile. Deutlich sind unterschiedliche Porenformen und Porositäten zu erkennen.

Der Gipsputz aus Bild 1.1 hat eine wesentlich höhere Porosität und eine geringere Anzahl an Gesteinskörnungen (Zuschläge). Der Zementputz zeigt viele runde Luftporen. Sie deuten darauf hin, dass es sich um einen Sanierputz handelt, dessen zahlreiche Luftporen den Putz resistenter gegenüber Frostangriff und Salzkristallisation machen. Der Kalkputz zeigt viele gut gerundete Zuschlags-

körnungen. Hierbei handelt es sich überwiegend um Kalkstein und Muschelchalen. Der Putz wurde im Profil geschnitten (Bild 1.1), die ursprüngliche Oberfläche ist am oberen Bildrand zu sehen. Deutlich ist an der Oberfläche eine dünne Schicht zu erkennen, die wesentlich dichter ist und weniger Gesteinskörnungen besitzt als das Gefüge darunter. Bei dieser Schicht handelt es sich um einen Dünnlagenputz, der dekoriert werden konnte.

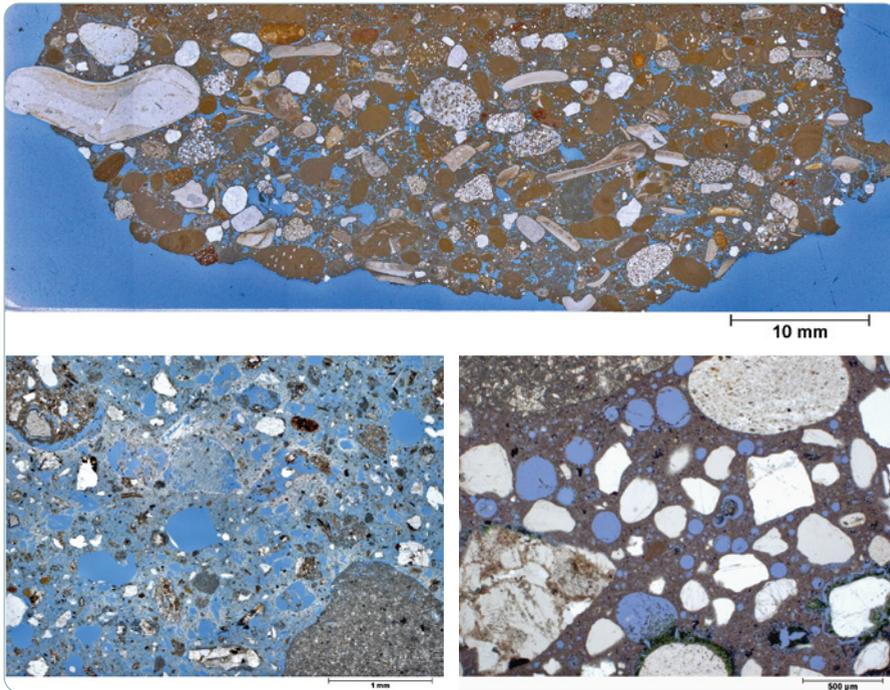


Bild 1.1 Gefüge eines Kalkputzes (oben), Gipsputzes (unten links) und Zementputzes mit Luftporen (unten rechts); Lichtmikroskopische Aufnahmen von Dünnschliffpräparaten: Der Porenraum ist mit blau eingefärbtem Epoxidharz getränkt.

Die stofflichen Eigenschaften von mineralischen Baustoffen, z. B. die der Putze in Bild 1.1, können relativ schnell durch lichtmikroskopische Untersuchungen an Dünnschliffen aufgeklärt werden. Zur Herstellung von Dünnschliffen werden Baustoffproben mit einer Diamantsäge in kleinere Teilproben gesägt (ca. 70 mm × 50 mm), im Trockenschrank getrocknet (45 bis 70 °C) und anschließend in gefärbtem Epoxidharz eingebettet. Oft ist der Farbstoff des Epoxidharzes fluoreszierend, was eine mikroskopische Untersuchung unter UV-Licht ermöglicht. Nach dem Aushärten des Harzes wird eine Seite der Probe plan geschliffen und auf einen Glaträger aufgeklebt. Danach wird die Probe glaträgerseitig mit einer Präzisionssäge auf ca. 0,5 mm geschnitten und anschließend auf 25 bis 30 µm

Dicke geschliffen. Durch die geringe Probedicke werden die meisten Baustoffkomponenten durchscheinend oder durchsichtig. Die weitere Untersuchung erfolgt mit einem Polarisationsmikroskop. Allerdings erfordern diese Untersuchungen zusätzliches Spezialwissen und die Kenntnis der optischen Eigenschaften von Baustoffkomponenten. Die Untersuchungen können deshalb nur von Experten aus den Material- oder Geowissenschaften durchgeführt werden.

Mineralogische Prozesse treten insbesondere bei Schädigungen von Baustoffen auf. Bild 1.2 illustriert eine komplexere Abfolge von unterschiedlichen Prozessen, die zur Bildung einer wenige Millimeter dicken Schale an der Oberfläche eines Tuffsteinmauerwerks geführt haben. Bei dem Bauwerk handelte es sich um das Charlottenburger Tor in Berlin (Bild 1.2), das in den 1980er-Jahren komplett mit einem Silikonharz zur Hydrophobierung (hydrophob = wasserabweisend) behandelt wurde [1.1] [1.2]. Bei mikroskopischen Untersuchungen der Tuffsteinoberfläche zeigten sich Risse parallel zur Oberfläche in einer Tiefe von zwei bis fünf Millimetern (Bild 1.2, unten links).

Eine mikrochemische Analyse mittels Mikro-Röntgenfluoreszenz ergab, dass direkt unterhalb der Rissbildungen Schwefelanreicherungen vorlagen. Sie hatten sich in Form von Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) unter der hydrophobierten Randzone angereichert (Bild 1.2, unten rechts). Bei der Mikro-Röntgenfluoreszenzanalyse wird die Atomzusammensetzung von Materialien bestimmt. Die Ergebnisse können in großflächigen Elementverteilungsbildern dargestellt werden. Eine Materialoberfläche oder ein Materialquerschnitt können so quasi elementchemisch kartiert werden [1.3].

Eine eingehende Untersuchung der Feuchte- und Salzverteilung im Tuffsteinmauerwerk erbrachte einen hohen Durchfeuchtungsgrad und punktuell hohe Salzkonzentrationen (Sulfate und Nitrate). Die Durchfeuchtung erfolgte über schadhafte Fugen. Ursache für den Salzeintrag waren zementhaltige Mörtel und eingetragene Luftschadstoffe [1.1]. Die eigentliche Schalenbildung an den Tuffsteinoberflächen wurden durch die hydroprobierte Randzone verursacht (Bild 1.3). Diese erzeugte am Übergang vom hydroprobierten zum nicht hydroprobierten Bereich einen Feuchtestau, an dem es zu entsprechenden Salzkristallisationen bei Verdunstung und im Winter zusätzlich zu Frostbildung kam [1.2].

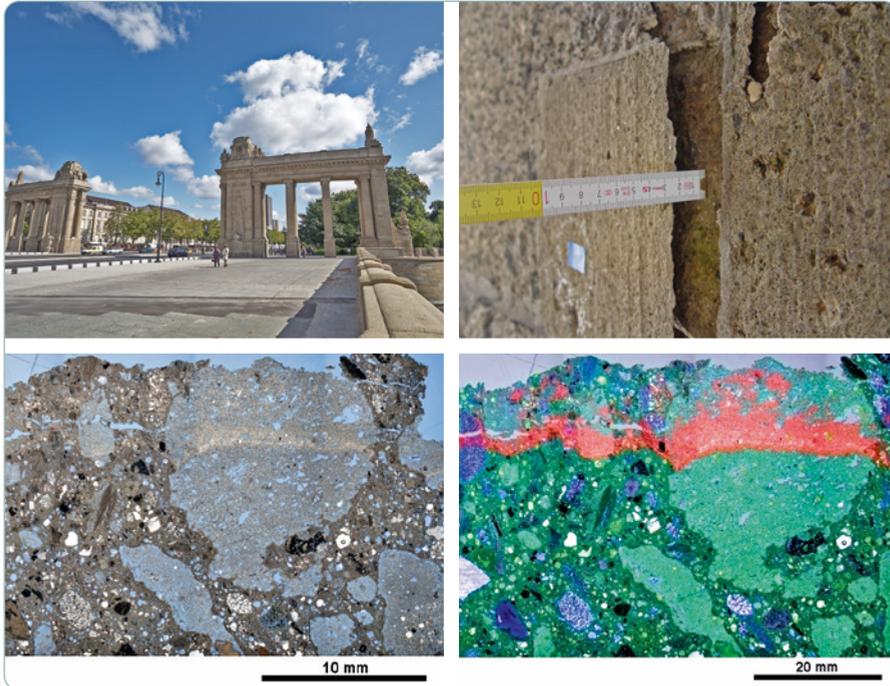


Bild 1.2 Schädigungsprozess am hydrophobierten Natursteinmauerwerk des Charlottenburger Tors in Berlin (oben links); schalige Ablösungen der ersten Millimeter der Gesteinsoberfläche (oben rechts); mikroskopisches Dünnschliffbild des Oberflächenbereichs des Mauersteins mit der Schale (unten links); Elementverteilungsbild desselben Bereichs mit grün = Silizium, blau = Kalium und rot = Schwefel (unten rechts). Schwefel repräsentiert in der Probe Gipskristallisationen.

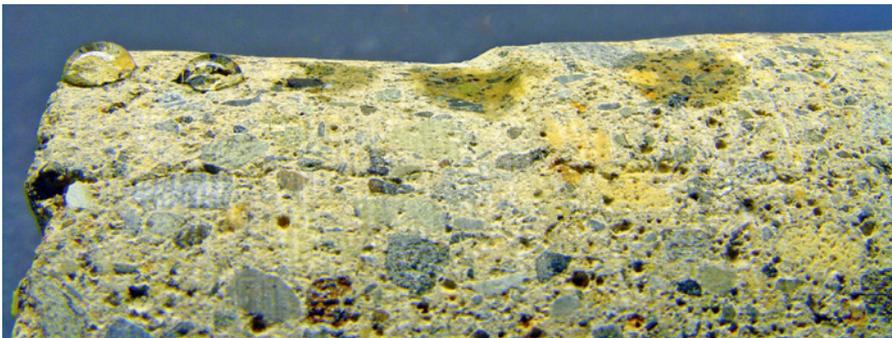


Bild 1.3 Tuffsteinbohrkern vom Charlottenburger Tor: Erkennbar ist die hydrophobierte Randzone mit einer deutlichen Tropfenbildung.

Baustoffe müssen in ihren Eigenschaften aufeinander abgestimmt sein. Andernfalls kommt es zu Bauschäden, besonders im witterungsexponierten Außenbereich. Dasselbe gilt für Reparaturbaustoffe. Große Unterschiede in den Eigenschaften (z. B. Verformungsverhalten, Festigkeiten, Wasserdampfdiffusion oder Porosität) zwischen altem und neuem Material sollten vermieden werden (Bild 1.4, links). Wird dies nicht beachtet, kommt es an Grenzflächen zwischen neuem und altem Material zu physikalischen Spannungen oder zu chemischen Reaktionen, die zum Ablösen des neuen Materials oder zur Beschädigung der vorhandenen Bausubstanz führen. Derartige Materialschäden entstehen z. B. beim Ausfugen von Mauerwerk aus weichen Sandsteinen mit einem zu harten Zementfugenmörtel (Bild 1.4, rechts). Um solche Schäden zu vermeiden, sollten Reparaturmaßnahmen gut geplant und Reparaturbaustoffe technologisch an die vorhandene Bausubstanz angepasst werden.

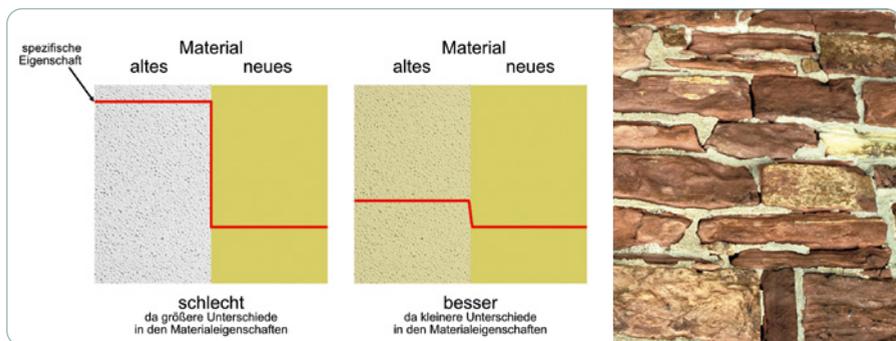


Bild 1.4 Für eine gute Kompatibilität zwischen zwei verschiedenen Materialien darf kein großer Sprung zwischen einer oder mehreren Materialeigenschaften auftreten (links). Ungünstig ist z. B. ein hartes zementhaltiges Fugenmaterial in einem Mauerwerk mit verhältnismäßig weichen Sandsteinen (rechts).

Weitere Aufgaben, die den Einsatz mineralogischer Methoden erfordern, sind

- › die Auswahl geeigneter Schutz- oder Konservierungsmaßnahmen (z. B. zur Verfestigung von Natursteinen),
- › die Herkunftsermittlung von Rohstoffen (Provenienz),
- › die Ermittlung der Herstellungsweise und Verarbeitung von historischen Materialien,
- › die Altersbestimmung (z. B. Farben anhand von Pigmenten) und
- › die Echtheitsbestimmung (z. B. Natur- oder Kunststein).

Die Beispiele zeigen, dass sich mineralogische Fragestellungen oftmals mit Ansätzen anderer Disziplinen überschneiden. Die Methoden oder Herangehensweisen werden deshalb oftmals unter dem allgemeineren Begriff der Baustoffkunde zusammengefasst.

1.2 Mineralische Baustoffe

In den folgenden Kapiteln werden im Wesentlichen nur anorganisch mineralische Baustoffe besprochen, die für die Massivbauweise eingesetzt werden:

- › Mauersteine,
 - › Naturstein,
 - › künstliche Steine (Ziegel, Kalksandstein, Lehmstein),
- › Bindemittel und Mörtel,
 - › Kalk,
 - › Gips,
 - › Zement,
 - › Lehm,
- › Beton,
- › Stampf- und Wellerlehm,
- › Anstrichfarben,
- › Asbest in Baustoffen.

Weitere Materialien, die als Baustoffe eingesetzt werden, wie Glas, Stahl, Holz, Wärmedämmstoffe, Textilien oder Papier, werden nicht behandelt. Kunststoffe (Polymere) werden im Zusammenhang mit Farbbindemitteln und Schutzmaßnahmen angesprochen.

Entsprechend den Gruppierungen ergeben sich materialspezifische Fragestellungen. Für **Mauerwerk** spielen beispielsweise folgende Sachverhalte eine Rolle:

- › Art und Zusammensetzung von Steinen,
 - › Naturstein, Ziegel, Lehmstein, Kalksandstein, Betonstein, etc.,
 - › Steinformate,
- › Art und Zusammensetzung von Mörteln (einschließlich Putzmörtel),
 - › Art des Bindemittels und der Gesteinskörnungen (Kalk, Zement, Gips, Lehm; Kombinationen),
 - › Gehalt an Bindemittel und Gesteinskörnung, Sieblinien,
- › Mechanische und physikalische Eigenschaften von Steinen und Mörtel,
 - › Festigkeiten, Wasseraufnahme, Dampfdiffusion,
 - › Porosität,
 - › hygrothermische/thermische Eigenschaften,
- › Salz- und Feuchtegehalt in Steinen und Mörteln,
 - › Feuchteprofile,
 - › Art der Salze und Salzprofile.

Aus der Art der Materialien und deren Feuchtezustand lässt sich grob das Tragverhalten eines Mauerwerks abschätzen. Durch gezielte Untersuchungen der Materialfestigkeiten können diese Abschätzungen präzisiert werden. Für Mauerwerk ist

oftmals die Güte des Verbands ausschlaggebend, bei mehrschaligem Mauerwerk hat zusätzlich die Verbindung der Schalen Einfluss auf das Tragverhalten. Soll das Mauerwerk zur Verstärkung mit Injektionsmaterialien (gewöhnlich basierend auf hochhydraulischen Kalken oder Zement) verpresst werden, müssen sowohl die vorhandenen Steine und Mörtel als auch das Injektionsgut auf bauschädliche Salze und deren Mengen untersucht werden. Dasselbe gilt beim Verpressen von Nadeln oder Mauerankern mit mineralischen Bindemitteln.

Kenntnisse der chemisch-mineralogischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften vorhandener Mauerwerksmaterialien sind unabdingbar für die Reparatur von Mauerwerk [1.4]. Für die Auswahl von geeigneten Oberflächenschutzmaßnahmen wie Hydrophobierung, Graffiti prophylaxe oder Steinfestigern sind zusätzlich Porositäts- und Wassertransportkennwerte der Steine und Mörtel bedeutsam.

Etwas andere Fragestellungen ergeben sich für die **Massivbaustoffe** Beton und Lehm. Beton ist ein streng genormtes Bauprodukt, das heute einer engmaschigen Qualitätskontrolle unterliegt. Historische Betone aus der Zeit vor dem Zweiten Weltkrieg weichen von den heutigen Normen zum Teil beträchtlich ab. Dies liegt weitestgehend daran, dass die Betontechnologie sich im Laufe der Zeit ständig weiterentwickelt hat und die Betoneigenschaften sukzessive verbessert wurden. Fragestellungen bei Altbetonen drehen sich deshalb oft um die Betongüte oder die Instandsetzung:

- › Zusammensetzung (z. B. Zementmenge, Wasser-Zement-Verhältnis, Art des Zements und Gesteinskörnungen),
- › Festigkeit (Druckfestigkeit, E-Modul),
- › Schädigungsmechanismen (z. B. Carbonatisierungstiefe, Bewehrungskorrosion),
- › Reparaturmaßnahmen (z. B. geeignetes Reparaturmaterial, Vorbereitung der Altbetonoberfläche, Korrosionsschutzmaßnahmen),
- › Schutzmaßnahmen (z. B. Oberflächenschutzsysteme, Hydrophobierung, kathodischer Korrosionsschutz).

Zu beachten ist, dass Beton als Material für den Ingenieurbau strenger genormt und geregelt ist als alle anderen Baustoffe. Es gelten europäisch harmonisierte Normen und deutsche Anwendungs- oder Restnormen. Weiterhin werden zusätzlich zahlreiche weitere Regelwerke, z. B. die Richtlinien des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb [1.5]) und die Technischen Regeln von Bundes- oder Länderbehörden (z. B. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Regeln für Ingenieurbauten, ZTV-ING) angewendet [1.6]. Die Regeln gelten insbesondere auch für die Ausführung von Reparatur- und Instandsetzungsmaßnahmen an Betonkonstruktionen und -bauwerken. Diese Regeln, z. B. die Instandsetzungsrichtlinie des DAfStb [1.7], richtet sich normalerweise an den Funktionserhalt einer Konstruktion und weniger an die Substanzerhaltung. Sollen z. B. baugeschichtlich wert-

volle Originaloberflächen und Konstruktionsmerkmale erhalten werden, ist die ausschließliche Anwendung solcher Instandsetzungsrichtlinien zugunsten einer stärker denkmalpflegerischen Vorgehensweise zu überdenken.

Beton dominiert heute den Massivbau. Das war nicht immer so. Insbesondere vor der Industrialisierung und in Zeiten von Rohstoffknappheit wurden in Deutschland neben Mauerwerksbauten auch Bauwerke aus Stampflehm und Wellerlehm hergestellt. Die frühe Betonbauweise, die im 19. bis Anfang des 20. Jahrhunderts angewendet wurde, ist aus der Stampflehmherstellung abgeleitet worden.

Bis heute gibt es noch 50 000 bis 80 000 historische Weller- und Stampflehm-bauwerke in Deutschland. Das prominenteste ist ein fünfstöckiges Stampflehmgebäude in Weilburg an der Lahn. Das Haus aus dem Jahr 1825 gilt als das höchste Gebäude aus Stampflehm in Europa. Weilburg an der Lahn war im 19. Jahrhundert ein Zentrum des Stampflehmbaus mit ca. 20 mehrstöckigen Stampflehm-bauten. Was vielleicht weniger bekannt ist: Auch ein Großteil der Chinesischen Mauer wurde in Stampflehm ausgeführt. Dies trifft insbesondere auf die frühen Abschnitte der Mauer zu.

Für Stampf- und Wellerlehm ergeben sich ähnliche Fragestellungen wie für Beton. Sie beziehen sich größtenteils auf die Zusammensetzung und die mechanischen Eigenschaften des Lehms:

- › Art des Lehms, Zusammensetzung der Tonmineralfraktion,
- › Sieblinie der Gesteinskörnung (bei Stampflehm),
- › Festigkeit,
- › Gehalt an Salzen und Feuchte,
- › Strohgehalt (bei Wellerlehm).

Da Lehm bezüglich Feuchte sehr empfindlich reagiert, spielt der Feuchte- und Salzgehalt eine große Rolle. Schutzmaßnahmen für solche Lehm-bauwerke konzentrieren sich deshalb oftmals darauf, einen ausreichenden Feuchteschutz sicherzustellen.

Bei **Mal- und Anstrichfarben** ergeben sich häufig die folgenden Fragestellungen:

- › Art der Farben (Bindemittel, Pigmente),
- › Anzahl der Farbschichten,
- › Erhaltungsmaßnahmen der Farbfassungen,
- › Eigenschaften der Farbschichten, z. B. bezüglich Wasserdampfdiffusion (s_d - μ -Wert),
- › geeignete, kompatible Anstrichstoffe, z. B. für Putz oder Mauerwerk.

Wichtig für originale Farbfassungen ist die Identifikation der Bindemittel und Farbpigmente. Oftmals lassen sich baugeschichtliche Rückschlüsse bezüglich der Art der Farben ziehen. Zum Beispiel wurden Silikatfarben nicht vor Mitte des 19. Jahrhunderts eingesetzt oder Titanweiß kam nicht vor den 1930er-Jahren auf den

Markt. Mithilfe solcher Eckdaten lassen sich grobe bauhistorische Zuordnungen durchführen, sollten Bauakten oder -unterlagen nicht mehr vorhanden sein.

Bei **asbesthaltigen Materialien** drehen sich die Fragen meist um die Asbestbelastung, die bei Instandsetzungs- oder Rückbaumaßnahmen auftreten kann. Fragen können folgendermaßen formuliert werden:

- › Ist Asbest in den Materialien vorhanden, ja oder nein?
- › Um welche Arten von Asbest handelt es sich?
- › Ist der Asbest fest oder schwach gebunden?
- › Welche Gefahren oder Risiken bestehen beim Rückbau der asbesthaltigen Materialien oder Bauteile?

Die hier behandelten Sachverhalte beinhalten keine Einschätzung über gesundheitliche Risiken, die sich bei der Freisetzung von Asbestfasern in die Raumluft ergeben. Für Architekten und Planer sind Informationen über Asbest in der Bausubstanz wichtig, um gegebenenfalls Sicherheitsmaßnahmen bei der Bauinstandsetzung zu planen. Zu den gesundheitlichen Aspekten und Entsorgungsmaßnahmen geben die meisten Landesämter für Umwelt Empfehlungen und Hilfestellung (z. B. [1.8]).

Ein weiteres Kapitel dieses Buchs behandelt wichtige mineralogisch-chemische Analysemethoden. Diese beinhalten die Charakterisierung von mineralogischen und chemischen Eigenschaften sowie von Baustoffgefügeeigenschaften. Letztere werden mit mikroskopischen Methoden untersucht, die in aller Regel auch zur Schadensanalyse angewendet werden. Um Baustoffe zu charakterisieren und Schadensursachen zu erkennen, bedarf es einer Kombination verschiedener Untersuchungsmethoden, die sich nicht alleine auf mineralogisch-chemische Eigenschaften beschränken.

Ein wichtiges Kapitel sind die Schädigungs- und Verwitterungsmechanismen. Diese Vorgänge werden anhand einiger Beispiele besprochen. Die Ursachen von Schäden an Baustoffen und Bauteilen sind vielzählig und komplex. In der Regel treten Kombinationen verschiedener Schäden auf, die sich gegenseitig beeinflussen. Da mineralische Baustoffe porös sind und einen Stofftransport erlauben, kann es zur Wechselwirkung mit schädigenden Substanzen kommen. Die Porositätseigenschaften, wie Porenvolumen und Porengrößenverteilung, sind deshalb wichtige Parameter bei der Schädigung von Baustoffen.

Schließlich wird im letzten Kapitel auf Konservierungs- und Schutzmaßnahmen eingegangen. Es werden die wichtigsten und häufigsten Maßnahmen zur Steinkonservierung vorgestellt und Konzepte zum Oberflächenschutz besprochen. Sie bestehen aus Anwendungen von Hydrophobierungsmitteln und Anti-Graffiti-Systemen. Deren jeweilige Vor- und Nachteile werden diskutiert.

2 MAUERSTEINE

Der Mauerwerksbau ist ein Teilgebiet des Massivbaus und hat insbesondere in Deutschland eine lange Tradition. Ein Mauerwerk besteht aus einzelnen **Steinen**, die entweder mit oder ohne Mauermörtel zu einem Mauerwerksverband gefügt werden. Als Steine können Natur- als auch Kunststeine verwendet werden. Traditionell wurden in Regionen mit Gesteinsvorkommen Natursteine verwendet und in anderen Gebieten Ziegel- oder Lehmsteine. Mischmauerwerk mit Steinen verschiedener Herstellung und Herkunft sind oft nicht ungewöhnlich. Seit Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts wurden mehr und mehr weitere Kunststeine in Form von Beton-, Porenbeton- oder Kalksilikatsteinen (Kalksandsteinen) eingesetzt.

Steine können je nach äußerer Form zu unterschiedlichen Mauerwerksverbänden geformt werden. Einige Beispiele sind in Bild 2.1 wiedergegeben. Ein Mauerwerksverband kann durchgehend gemauert sein oder einen mehrschaligen Aufbau besitzen. Natursteinmauerwerk wurde häufig mit zwei äußeren Schalen aufgebaut, die ein Füllmauerwerk aus Bruchstein und Mörtel umschließen. Als Mauermörtel wurde je nach Verfügbarkeit Lehm, Gips oder Kalk verwendet (Bild 2.2). Seit Mitte des 19. Jahrhunderts verdrängte Zement nach und nach die bis dahin gebräuchlichen Luftkalke oder hydraulische Kalke als Bindemittel für Mörtel. Nicht immer ist jedoch Mörtel für den Mauerwerksverband notwendig, Mauerwerk kann auch mörtellos hergestellt werden. Damit es dennoch tragfähig ist, sind für den mörtellosen Verband entsprechend exakt behauene bzw. geformte Steine notwendig. Die Bogenreihen des römischen Aquädukts von Segovia in Spanien sind ein Beispiel für mörtelloses bzw. mörtelarmes Mauerwerk (Bild 2.2). Die Hauptaufgabe des Mauermörtels ist die Herstellung eines vollflächigen Verbundes zwischen den Steinen, um den vertikalen Lastfluss im Bauteil zu optimieren. Die Festigkeitseigenschaften des Mörtels sind dafür von untergeordneter Bedeutung. Kommen jedoch zu den vertikalen Druckkräften weitere Beanspruchungen hinzu, z. B. horizontale Zug- oder Scherkräfte, spielen die mechanischen Eigenschaften des Mörtels eine wichtige Rolle. Dies trifft besonders im Fall von Erdbeben zu, wo horizontale Scherkräfte den Mauerwerksverband und insbesondere den Mörtel stark beanspruchen [2.1] [2.2].



Bild 2.1 Beispiele für Mauerwerk (von links nach rechts): regelmäßiges Ziegelmauerwerk, Zyklopenmauerwerk, Bruchsteinmauerwerk, Feldsteinmauerwerk.



Bild 2.2 Beispiele für verschiedene Mauerwerksverbände (von links nach rechts): ohne Mörtel (Aquädukt, Segovia, Spanien), Natursteinmauerwerk mit Kalkmörtel und Bruchsteinmauerwerk mit Lehmörtel.

Mauerwerk muss nicht immer lastabtragend verwendet werden. Seit dem 19. Jahrhundert wurden zunehmend Vorsatzmauerwerk oder Verblendmauerwerk eingesetzt. Hierbei ist das sichtbare Mauerwerk eine dekorative Außenhülle, die die eigentlich tragende Konstruktion verbirgt. So bestehen das Charlottenburger Tor in Berlin (Bild 1.2) und viele weitere Bauwerke aus derselben Zeit aus einem Vorsatzmauerwerk aus vulkanischem Tuffstein und einer Tragkonstruktion aus Ziegelmauerwerk. Um einen Verbund zwischen Vorsatzmauerwerk und Tragkonstruktion herzustellen, wurden oft Vergussmörtel eingesetzt und zusätzlich Stahllanker eingebaut. Heutiges Vorsatzmauerwerk oder Fassadensysteme sind meist hinterlüftet, d. h. zwischen tragender Wand, Wärmedämmsystem und dem Vorsatzmauerwerk befindet sich ein Luftspalt, der ein Kondensieren von Feuchte im Dämmmaterial verhindern soll.

Mauerwerk wurde im Innenbereich üblicherweise verputzt, im Außenbereich je nach Bedarf und finanzieller Ausstattung. Ein Außenputz kann als eine Schutz-

oberfläche für das Mauerwerk verstanden werden, die verhindert, dass übermäßige Feuchte ins Mauerwerk dringt. Als Putzmaterialien werden bis heute Mörtel verwendet, die als Bindemittel Zement, Kalk, Gips oder Lehm enthalten. Bei Silikatputzen dient Wasserglas als Bindemittel. Zement-, Silikat- oder Kalkputze werden bzw. wurden besonders im Außenbereich eingesetzt. Gips- und Lehmputze sind dagegen mehr im Innenbereich anzutreffen, wurden historisch jedoch durchaus auch im Außenbereich verwendet. Putze können dekoriert sein. Dies kann entsprechend durch Farben erfolgen oder durch Formgebung. Bild 2.3 gibt Beispiele wieder.



Bild 2.3 Putzdekorationen in Form eines Deckenfreskos in einem Kalkputz (Wallfahrtskirche Steinhausen, links) und in Form von Schnitzereien in einem Gipsputz (historischer Amiri-Palast in Doha, rechts).

2.1 Naturstein

Natursteine werden schon seit sehr langer Zeit für den Massivbau verwendet. Abhängig von der jeweiligen geographischen Lage und den geologischen Bedingungen kamen dabei die unterschiedlichsten Arten von Natursteinen zur Anwendung. Reichten lokale Vorkommen nicht aus, wurden Gesteine auch weiter entfernt erschlossen. So besteht der Kölner Dom in seiner überwiegenden Masse aus acht verschiedenen Natursteinen [2.4], es wurden im Mauerwerk und in der Bauzier aber über 70 weitere Gesteinsvariationen verbaut.

Natursteine wurden für verschiedene Arten von Mauerwerk verwendet (Bild 2.1): Bruchsteinmauerwerk, Zyklopenmauerwerk, Quadermauerwerk etc., als ein- oder mehrschaliges Mauerwerk. Heute kommen Natursteine am Bauwerk überwiegend zur Fassadengestaltung in Form von hinterlüfteten Verkleidungen oder für den Innenraum (z. B. Fliesen, Küchenplatten) zum Einsatz. Ausnahmen bilden manche Rekonstruktionen historischer Gebäude, z. B. der archäologische Wiederaufbau der Frauenkirche in Dresden [2.5].

2.1.1 Plattentektonik

Natursteine sind geologische Materialien. Gesteine werden in der Erdkruste und im oberen Erdmantel gebildet. Um zu verstehen, wie sie wissenschaftlich klassifiziert werden, ist eine Grundkenntnis vom Aufbau der Erde hilfreich. Die Erde gliedert sich in Erdkern, Erdmantel und Erdkruste (Bild 2.4 links). Entgegen der allgemeinen Vorstellung ist nur der äußere Erdkern flüssig; innerer Kern, Mantel und Kruste sind fest [2.3]. Zu bemerken ist, dass die Kruste im Vergleich zum gesamten Erdradius nur sehr dünn ist (sie entspricht etwa der Dicke einer Briefmarke auf einem Fußball).

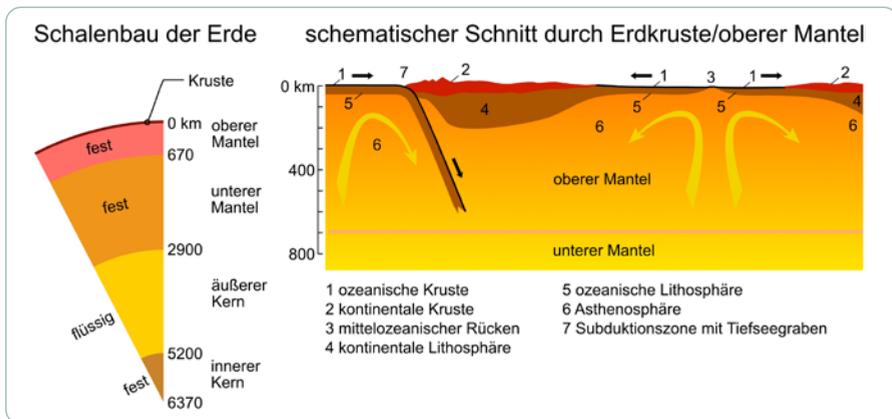


Bild 2.4 Querschnitt durch die Erde (links) und die wesentlichsten Elemente der Plattentektonik (rechts).

Obwohl der Erdmantel fest ist, sind darin Bewegungen möglich. Der Mantel steht unter hohem Druck und besitzt Temperaturen im Bereich von wenigen hundert Grad im oberen Mantel bis zu 3 000 °C im unteren Mantel. Diese gewaltigen Temperaturunterschiede erzeugen ein Konvektionsbestreben des Mantels. Anschaulich gesprochen wollen sich die heißeren Gesteinsschichten mit kühleren vermischen und streben zur Oberfläche (Bild 2.4 rechts). Da die Mantelgesteine unter hohem Druck stehen, verhalten sie sich wie eine hochviskose Flüssigkeit, d.h. Konvektionsbewegungen von heißen und kühleren Gesteinsschichten sind möglich, aber sie erfolgen nur sehr langsam. Wie bei allen Konvektionsbewegungen ergeben sich vertikale und horizontale Bewegungsmomente. Im Gegensatz zum Mantel, ist die Erdkruste verhältnismäßig kühl und wird nur in bestimmten Bereichen in die Konvektionsbewegungen der Mantelgesteine mit einbezogen. Das ist für uns ein Glücksfall, da sich dadurch unsere Biosphäre erst entwickeln konnte. Allerdings steht die Erdkruste aufgrund der horizontalen Bewegungsmomente der Mantelkonvektion nicht still, sondern bewegt sich wie

die Haut bei kochender Milch mit. Der 1880 in Berlin geborene Alfred Wegener hat dies erahnt und als erster in Form der Theorie der Kontinentaldrift formuliert. Er gilt damit als ein Wegbereiter der modernen Plattentektonik. Tragischerweise wurde seine Theorie zu seinen Lebzeiten nicht anerkannt und erst nach dem Zweiten Weltkrieg durch US-amerikanische Geologen wiederentdeckt und bestätigt. Da die Mantelbewegungen gegenläufig sind, kommt es an einigen Stellen der Erdkruste zu deren Ausdünnung und zu deren Aufreißen (wenn die Konvektionsströme auseinanderlaufen) oder zur Kollision (wenn sie sich aufeinander zu bewegen). Diese Bewegungskräfte haben die Erdkruste schollenartig in Erdplatten aufgebrochen. Die Bewegung der Platten auf dem oberen Mantel beträgt hierbei nur wenige cm pro Jahr.

Das Aufreißen der dünneren ozeanischen Kruste erzeugt die mittelozeanischen Rücken, z. B. den mittelatlantischen Rücken (Bild 2.4 rechts). Bei der Ausdünnung der dickeren kontinentalen Kruste können Gräben auftreten, wie z. B. der Rheingraben oder das ostafrikanische Grabensystem.

Kollidiert eine ozeanische mit einer ozeanischen oder einer kontinentalen Platte, wird eine der ozeanischen Krustenplatten unter die andere, bzw. die kontinentale, Kruste geschoben (subduziert). In diesem Fall wird von Subduktionszonen gesprochen. Die Anden in Südamerika sind die Folge einer Subduktion der pazifischen ozeanischen Platte unter die südamerikanische kontinentale Krustenplatte. Die Subduktion verursachte hierbei eine Auffaltung der kontinentalen Platte im Bereich der Kollisionszone (Bild 2.4 rechts). Treffen zwei kontinentale Krustenplatten aufeinander, kommt es zur massiven Gebirgsbildung. Beispiele hierfür sind der Himalaya und die Alpen.

Neben diesen tektonischen Prozessen gibt es noch Sonderfälle. Zu diesen Fällen gehören sogenannte Hot Spots. Hot Spots sind lokale Wärmeanomalien im oberen Erdmantel, die nur begrenzt von den Konvektionsbewegungen betroffen sind und quasi statisch im Erdmantel liegen. Hot Spots finden sich über die ganze Erde verstreut und verursachen einen Vulkanismus, der nicht tektonisch bedingt ist. Bekanntestes Beispiel für einen Hot Spot Vulkanismus ist die Hawaii-Inselgruppe.

2.1.2 Bildungsbereiche und Klassifikation von Natursteinen

Natursteine lassen sich nach den Bereichen der Gesteinsbildung klassifizieren. Im Wesentlichen werden drei Gruppen unterschieden:

- › magmatische Gesteine oder Magmatite,
- › Sedimentgesteine, Sedimente oder Sedimentite,
- › metamorphe Gesteine oder Metamorphite.

Magmatische Gesteine entstehen entweder in der Erdkruste und werden dann Tiefengesteine oder Plutonite genannt, oder sie entstehen auf der Erdoberfläche und werden dann als vulkanische Gesteine, Ergussgesteine oder Vulkanite bezeichnet. Es gibt drei Hauptbereiche, an denen Magmatite entstehen: Im Bereich mittelozeanischer Rücken, im Bereich von Kollisionszonen, (z. B. Subduktionszonen) und im Bereich von Hot Spots (Bild 2.5). Werden lokal Mantel- oder Krustengesteine aufgeschmolzen (Magmenbildung), können sich die heißen Magmen in Richtung der Erdoberfläche bewegen [2.3]. Tiefengesteine entstehen, wenn die Magmen auf dem Weg nach oben innerhalb der Kruste auskristallisieren. Bei vulkanischen Gesteinen werden die Magmen bis an die Erdoberfläche transportiert (Bild 2.6). Typische Tiefengesteine sind Granit, Granodiorit, Syenit und Gabbro. Ergussgesteine sind z. B. Basalt, Rhyolit, Trachyt und vulkanischer Tuff.

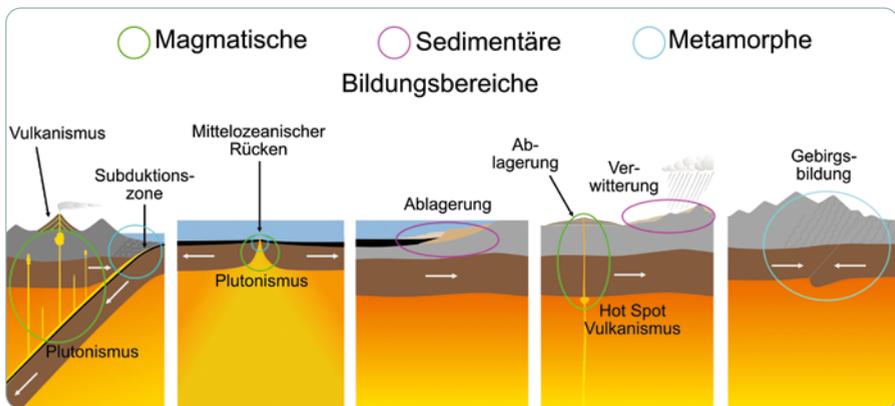


Bild 2.5 Bildungsbereiche der Natursteine (nach [2.3]).

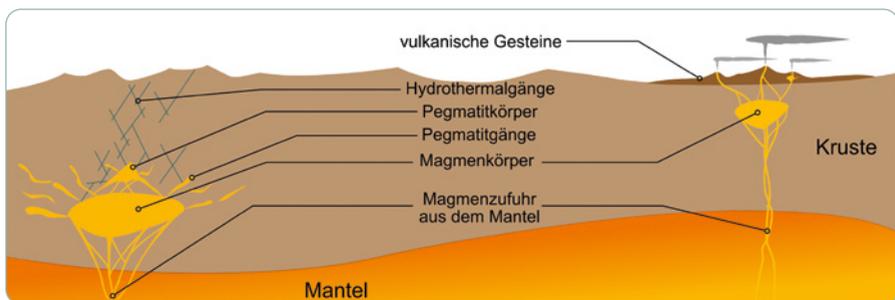


Bild 2.6 Bildungsbereiche von Tiefengesteinen (links) und vulkanischen Gesteinen (rechts) innerhalb einer kontinentalen Platte.

Sedimentgesteine oder **Sedimentite** entstehen durch den Transport und die Ablagerung von Schutt verwitterter Gesteine (Bild 2.5). Solange Sedimente nicht verfestigt sind, spricht man von Lockersedimenten oder klastischen Sedimenten. Beispielsweise sind Ton, Sand und Kies Lockersedimente, die sich entlang von Flussläufen, in Seen oder im Meer über den Transport im Wasser ablagern. Sand und Kies sind wichtige Rohstoffe für die Mörtel- und Betonherstellung. Tone werden zur Herstellung von Tonziegelprodukten und für Lehmbaustoffe verwendet. Werden klastische Sedimente in ausgedehnten ozeanischen Becken, z.B. im Schelf- oder Tiefseebereich abgelagert, kommt es im Laufe von Jahrmillionen zu deren Verdichtung und Verfestigung (Bild 2.7). Dieser Prozess wird Diagenese genannt. Die Diagenese formt aus einem losen Sand einen Sandstein, aus einem Ton einen Tonstein.

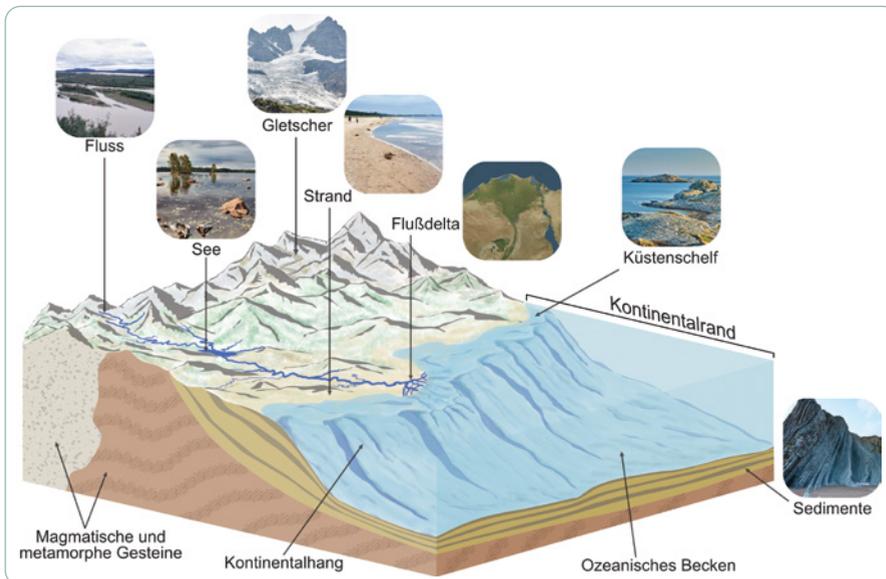
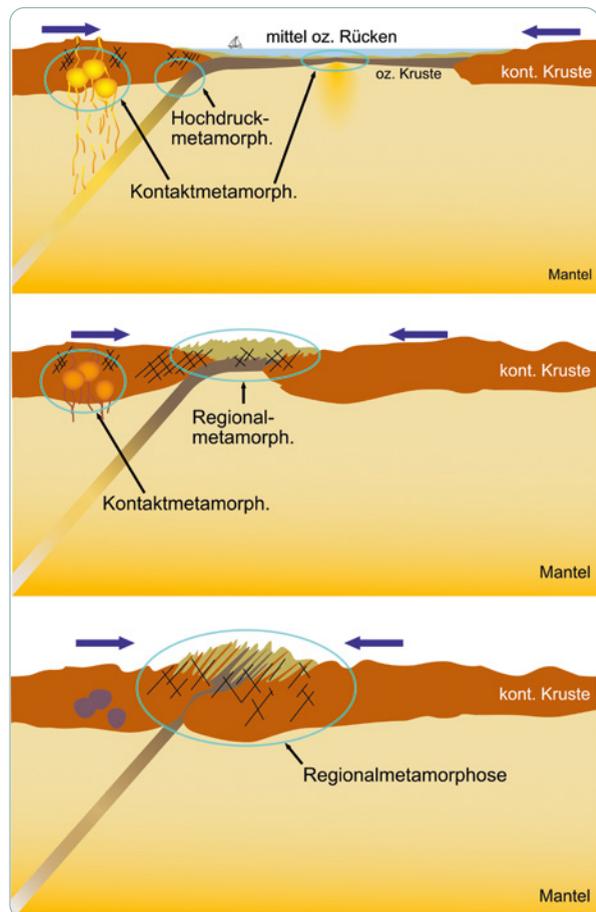


Bild 2.7 Bereiche von Sedimenttransport, -ablagerung und -verfestigung (nach [2.3]).

Sedimente können auch durch Organismen gebildet werden. Insbesondere Kalksteine entstehen durch die Ablagerung und Verfestigung von Resten von Mikroorganismen oder höheren Organismen (Muscheln oder Schalenreste). Es wird dann von biogenen Sedimenten gesprochen. Solche Sedimente entstehen insbesondere in marinem Milieu in nährstoffreicher Umgebung. Chemische Sedimente entstehen durch die Kristallisation von Salzen in abgeschlossenen Meeres- oder in Inlandbecken unter aridem, d. h. trockenem Klima (z. B. in Wüstengebieten). Bei den entstehenden Gesteinsschichten handelt es sich um Gips- oder Salzsteine (z. B. Kalisalzlagerstätten).

Metamorphe Gesteine werden an kollidierenden Plattenrändern oder in Hochtemperaturzonen gebildet [2.3] (Bild 2.5). Metamorphe Gesteine entstehen entweder aus Magmatiten oder Sedimentiten durch Umwandlung des Gefüges und/oder des Mineralbestands unter höheren Temperaturen und/oder Drücken. Großräumige Metamorphosen finden in Subduktionszonen und kontinentalen Kollisionszonen statt, wo es aufgrund unterschiedlicher Temperatur und Druckverhältnisse zu verschiedenen Arten von Metamorphosen kommt (Bild 2.8). Anders als bei der Diagenese formt die Metamorphose betroffene Gesteine komplett um. Meist ist damit eine starke Reduzierung des Porenvolumens eines Gesteins verbunden. Kornkomponenten bei Sedimentgesteinen werden entlang der Druckrichtung aufgelöst und kristallisieren an der druckabgewandten Seite wieder aus. Entsprechend den Druck- und Temperaturverhältnissen bilden sich manche Minerale neu. Bei besonders hohen Temperaturen können die Gesteine partiell oder komplett neu aufgeschmolzen werden.

Bild 2.8 Verschiedene Arten von Metamorphosen an Plattenrändern.



Die vorige Beschreibung der Bereiche der Gesteine deuten einen Bildungskreislauf an, den Kreislauf der Gesteine (Bild 2.9). Er wird durch die Plattentektonik am Laufen gehalten und erzeugt eine stetige Erneuerung der Lithosphäre und damit eine Erneuerung der Gesteine. Die Prozesse laufen sehr langsam ab, in Zeiträumen von Millionen oder hunderten von Millionen Jahren.



Bild 2.9 Kreislauf der Gesteine (nach [2.3]).

2.1.3 Allgemeine Gesteinseigenschaften

Entsprechend den Bildungsbereichen der Gesteine sind deren Eigenschaften unterschiedlich. Besonders die mechanischen Eigenschaften zeigen sehr unterschiedliche Werte (Bild 2.10). So weisen Sedimentgesteine meist geringere Festigkeiten auf als magmatische und metamorphe Gesteine. Magmatische Gesteine zeigen mitunter sehr hohe Druckfestigkeiten von über 300 MPa. Entsprechend hoch sind Biegezugfestigkeiten und E-Module (Bild 2.10). Zum Vergleich: Ein Standardbeton hat eine Druckfestigkeit von 40 MPa, eine Biegezugfestigkeit von ca. 4 MPa und ein E-Modul von ca. 30 GPa.

Festigkeitsunterschiede spielten und spielen auch bei der Bearbeitung der Steine eine Rolle. Geringer feste Steine lassen sich einfacher in die gewünschten Formen überführen als härtere und festere. Insbesondere für skulptierte Teile wurden häu-

fig eher weichere Sedimente verwendet als die härteren Magmatite oder Metamorphite. Eine Ausnahme bei den Magmatiten sind vulkanische Tuffe mit einer hohen Porosität, die deutlich geringere Festigkeit aufweisen können. Dadurch lassen sie sich sehr leicht bearbeiten, weisen gute Wärmedämmeigenschaften auf, sind aber auch anfälliger für Verwitterungseinflüsse.

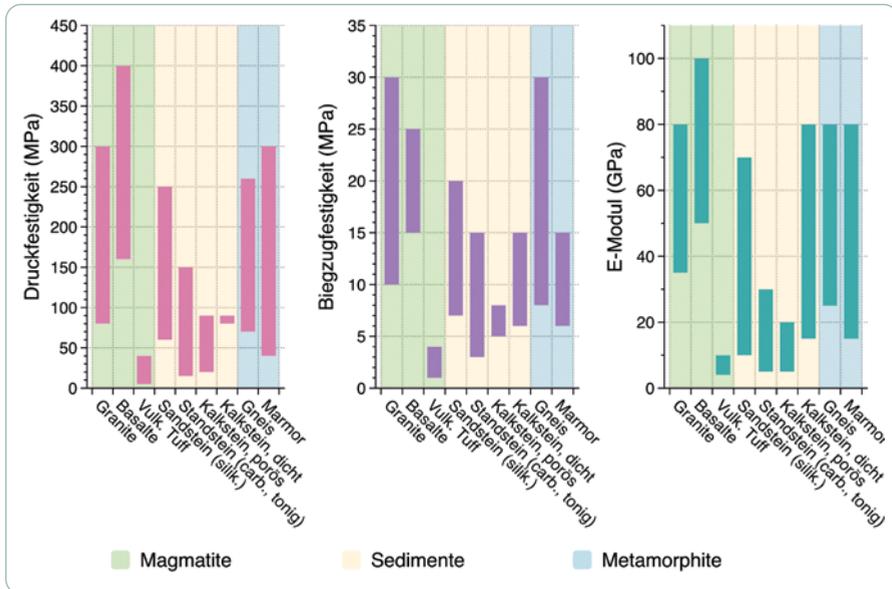


Bild 2.10 Bereiche mechanischer Eigenschaften von ausgewählten Natursteinen (Daten aus [2.8]).

Ähnlich wie die Festigkeiten verhalten sich die Porositäten der Gesteine: Magmatische und metamorphe Gesteine besitzen in aller Regel eine geringere Porosität als Sedimentgesteine (Bild 2.11). Dies hat damit zu tun, dass Magmatite und Metamorphite unter höheren Drücken und Temperaturen gebildet wurden als Sedimente. Dies führte zu höheren Verdichtungen und damit zu niedrigeren Porositäten und höheren Festigkeiten. Wie oben erwähnt, bilden vulkanische Tuffe dabei eine Ausnahme, da sie zwar magmatischen Ursprungs sind, aber wie Sedimente abgelagert wurden. Die Daten der Magmatite in Bild 2.11, die eine Porosität oberhalb von 20 % aufweisen, stammen von vulkanischen Tuffen. Wie die Abbildung zeigt, steigt mit der Porosität auch die Wasseraufnahme. Wasser wird in porösen Steinen leichter transportiert. In der Regel nimmt damit auch die Beständigkeit der Steine z. B. gegenüber Frost- und Salzangriff ab, wobei jedoch für Beständigkeitsaspekte von Natursteinen nicht nur die Gesamtporosität eine Rolle spielt, sondern auch die Größe und die Form der Poren und wie diese miteinander verbunden sind (Interkonnektivität).

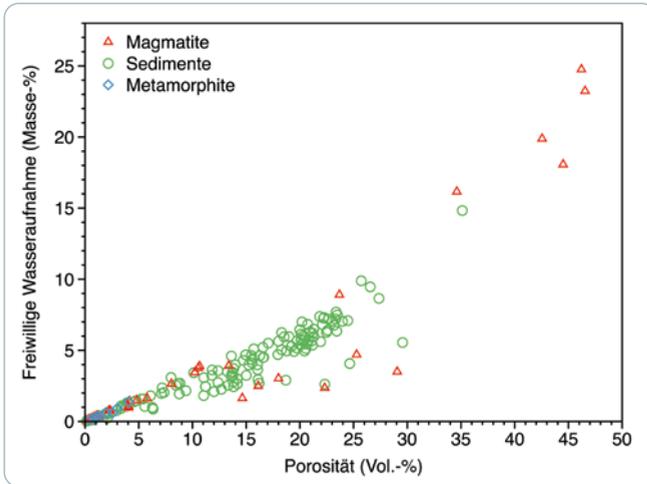


Bild 2.11 Porositäten und Wasseraufnahme verschiedener Natursteine (Daten aus [2.8]).

Wesentlich für das optische Erscheinungsbild von Natursteinen ist das Gesteinsgefüge (Bild 2.12). Die Anordnung, Form, Art und Größe der Gesteinskomponenten bestimmt ihre Farbe und Textur. Tiefengesteine sind meist durch Hauptkomponenten gekennzeichnet, die in etwa eine einheitliche Größe im Bereich von Millimetern haben (Bild 2.12). Vulkanische Gesteine weisen in der Regel ein sehr feinkörniges und homogenes Grundgefüge im Submillimeterbereich auf, in das größere Mineralkomponenten eingestreut sein können.

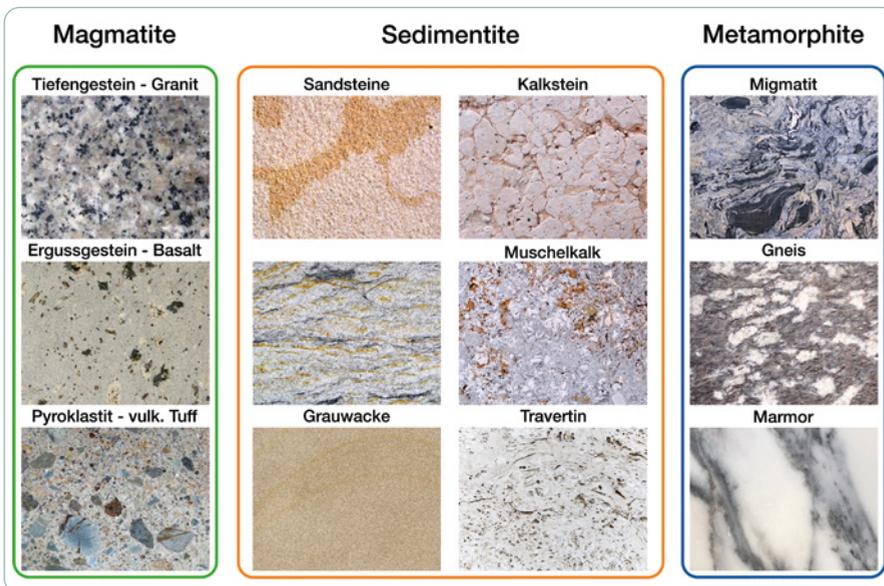


Bild 2.12 Makrogefüge verschiedener Natursteine. Bildbreiten ca. 10 bis 30 mm.

Sedimentgesteine zeigen in den meisten Fällen eine Schichtung, die die ursprüngliche Sedimentationsrichtung widerspiegelt. Insbesondere bei Sandsteinen sind Schichtungen oft gut erkennbar (Bild 2.12), sie kommen aber auch bei Kalksteinen vor. Manche Kalksteine beinhalten darüber hinaus Schalenreste von Mollusken oder andere fossile Reste (z. B. Algenmatten, Korallen oder Moostierchen). Sedimentgesteine weisen, je nach Entstehungsbedingungen, eine große Vielzahl verschiedener Gefügemerkmale auf, die manchmal erst im größeren Maßstab oder im Steinbruch erkennbar sind.

Metamorphite zeigen häufig eine Schieferung. Anders als die Schichtung von Sedimenten entsteht eine Schieferung, wenn Gesteine senkrecht zur Druckrichtung deformiert werden. Die Schieferung kann hierbei auch gefaltet sein (Bild 2.12, Migmatit). Wird ein Sedimentgestein, beispielsweise ein Sandstein, einer solchen Metamorphose unterzogen, kann daraus ein Gneis entstehen. Die Schieferung des Gneises kann dabei senkrecht zur ursprünglichen Sedimentationsrichtung des Sandsteins stehen. Bild 2.13 zeigt diesen Fall. Allerdings ist bei vielen Metamorphiten, die aus Sedimenten entstanden sind, die ursprüngliche Schichtung der Sedimente oftmals nicht mehr zu erkennen.

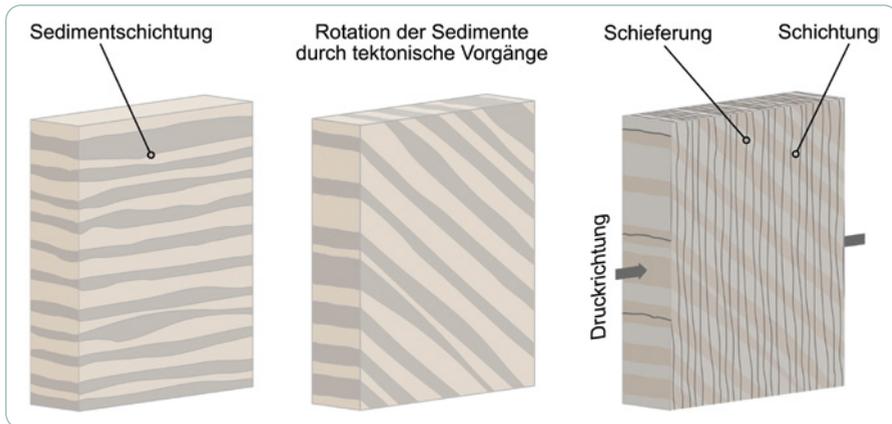


Bild 2.13 Schema der Schieferung und Schichtung anhand eines Schieferstückes.

Marmor ist ein metamorphes Gestein, das aus Kalkstein oder Dolomit entstanden ist. Marmore zeigen in aller Regel ein körniges Mikrogefüge und eine mehr oder weniger ausgeprägte Schieferung und Bänderung (bei entsprechenden Farbunterschieden).

2.1.4 Magmatite

Magmatische Gesteine zeigen in der Regel ein richtungsloses Gefüge. Tiefengesteine weisen oftmals ähnlich große Mineralkörner in einem dichten Gefüge auf, die häufig mit bloßem Auge erkennbar sind. Erguss- und pyroklastische Gesteine besitzen zumeist eine feinkörnige Matrix, in die größere Kornkomponenten eingeprengt sein können. Bild 2.14 zeigt Dünschliffpräparate von einem Tiefen- (Granit) und einem Ergussgestein (Basalt) unter dem Mikroskop.

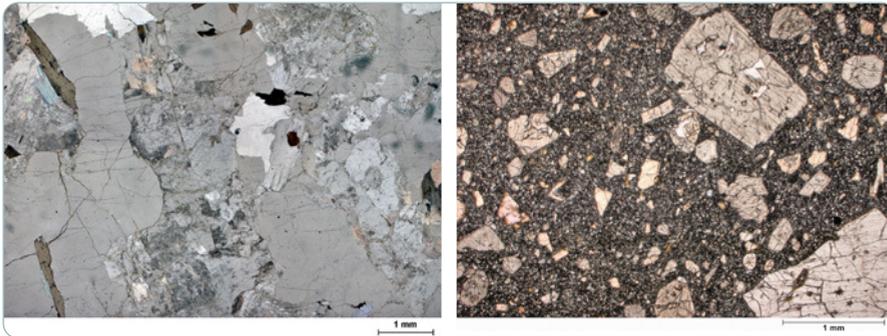


Bild 2.14 Gefüge eines Granits (Tiefengestein, links) und eines Basalts (Ergussgestein, rechts). Mikroskopbilder, parallele Polarisatoren.

Typische Vertreter von Tiefengesteinen sind Granit, Syenit, Foidolit, Gabbro, Diorit, Monzonit. Ergussgesteine sind Basalt, Trachyt, Rhyolith, Dazit, Phonolit, Tephrit, usw. Die Einteilung der Magmatite erfolgt nach deren Mineralzusammensetzung. Hierbei sind vier Mineralphasen entscheidend:

- › Quarz SiO_2 – Q
- › Alkalifeldspat (K,Na) AlSi_3O_8 – A
- › Plagioklas (Na,Ca) $\text{Al}_{1-2}\text{Si}_{2-3}\text{O}_8$ – P
- › Feldspatvertreter – F

Je nach Menge dieser vier Komponenten werden die verschiedenen Gesteine kategorisiert und in einem Diagramm, dem **Streckeisen-** oder **QAPF-Diagramm**, eingeteilt (Bild 2.15). Hierbei werden die Mineralkomponenten als Endpunkte in einem Doppeldreieck angeordnet und die Gesteine entsprechend dieser vier Komponenten eingeteilt. Ein Vergleich der beiden Diagramme für die Tiefen- und Ergussgesteine zeigt, dass es Gesteine mit gleicher Zusammensetzung bei beiden Gesteinsgruppen gibt. Zum Beispiel ist das Ergussgesteinsäquivalent des Granits ein Rhyolith, das eines Syenits ist ein Trachyt. Weitere Einteilungskriterien, z. B. für pyroklastische Gesteine oder Ultramafite, können in der DIN EN 12670 [2.7] nachgeschlagen werden. Die quantitative Bestimmung der vier Mineralbestandteile wird mikroskopisch an Dünnschliffen durchgeführt (Kapitel 8).

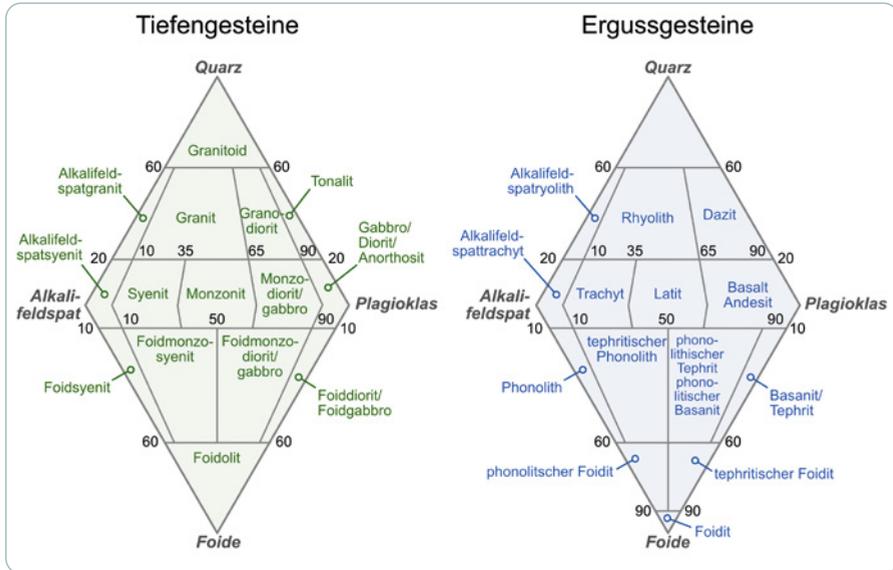


Bild 2.15 Die beiden Streckeisen- oder QAPF-Diagramme, nach denen die magmatischen Gesteine eingeteilt sind (vereinfachte Darstellung).

Natursteinproduzenten wenden oftmals eigene Produktnamen an, die manchmal mit den eigentlichen Gesteinsarten nichts mehr zu tun haben. So wird ein grünes Konglomerat aus der Schweiz als Verde Salvan oder Vert de Salvan bezeichnet und leider von manchen Herstellern als grüner Granit angeboten. Die Gesteinsbezeichnungen »Granit« und »Marmor« werden von den Herstellern gerne freizügig auch auf Gesteine angewendet, die gar keine Granite oder Marmore sind. So handelt es sich beim »Alcántara Black Granite« beispielsweise um einen schwarzen Hornfels aus Spanien. Diese gängige Praxis der Hersteller führt manchmal zu Verwirrung bei Kunden. Eine Übersicht der Gesteinsbezeichnungen und der Natursteinterminologie ist in den Normen DIN EN 12440 [2.6] und DIN EN 12670 [2.7] gegeben und Hersteller sollten auf Anfrage die korrekten Gesteinsbezeichnungen ihrer Produkte entsprechend dieser Normen nennen können.

Die typischen Eigenschaften von Tiefengesteinen sind hohe Festigkeiten (Bild 2.10), geringe Porositäten, eine gute Frostbeständigkeit und Widerstandsfähigkeit gegen Abrieb. Manche Granite oder Granodiorite können kleine Einschlüsse von Pyrit oder Markasit (Eisensulfid, FeS_2) enthalten, die an der Atmosphäre oxidieren und rostartige Fleckenbildungen hervorrufen können (Bild 2.16). Diese stellen zwar keine direkte Schädigung des Gesteinsmaterials dar, können jedoch erhebliche visuelle Beeinträchtigungen nach sich ziehen und zu Beanstandungen führen. Eine typische Verwitterungsform von Tiefengesteinen ist die Wollsackverwitterung (Bild 2.16). Sie führt zu einer ausgeprägten Kantenabrundung und ist

auch an Tiefengesteinen zu beobachten, die in Gebäuden verbaut der Verwitterung ausgesetzt wurden (Bild 2.16).



Bild 2.16 Rostartige Verfärbungen einer Granitfassadenplatte hervorgerufen durch Pyrit-einschlüsse (links). Typische Wollsackverwitterung eines Granitkomplexes (Mitte) und eine wollsackähnliche Verwitterung eines Granitsteins in einer Gebäudefassade (rechts).

Ergussgesteine sind in der Regel widerstandsfähig, hochfest und daher schwierig zu bearbeiten. Sie sind meist gut frostbeständig und zeigen normalerweise einen hohen Anteil einer feinkörnigen Matrix, in denen vereinzelte größere Kristalle (Blasten) verteilt sein können (Bild 2.17). Ein Beispiel eines solchen Gefüges findet sich im Drachenfels-Trachyt, der am Kölner Dom verbaut wurde [2.8].

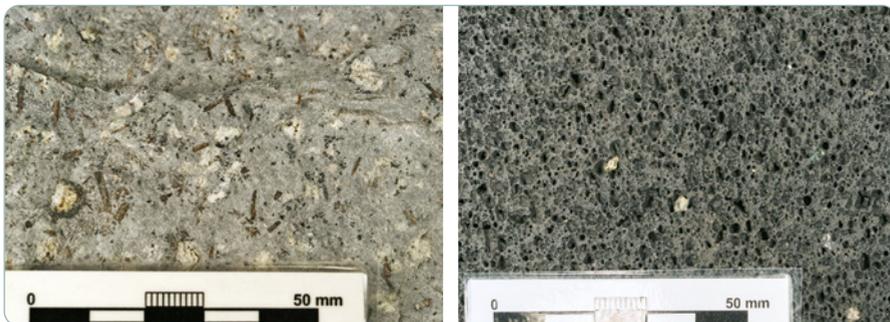


Bild 2.17 Selters-Trachyt mit Feldspatblasten, die in einer feinkörnigen Matrix eingebettet sind (links). Mayener Basaltlava aus der Eifel (rechts).

Die Porosität von Ergussgesteinen ist zumeist gering. Eine Ausnahme ist Lava, die durch eingeschlossene Luftblasen einen schaumartigen Charakter haben kann. Ein gutes Beispiel für ein solches Gestein ist die Mayerner Basaltlava, die schon seit antiken Zeiten in der Eifel abgebaut wurde und noch heute als Naturstein verwendet wird (Bild 2.17). Das Gestein findet sich auch im Sockelbereich des Kölner Doms wieder [2.8].

Eine spezielle Form von Ergussgesteinen sind die pyroklastischen Gesteine oder Pyroklastite. Pyroklastite entstehen bei explosiven vulkanischen Eruptionen und bestehen aus vulkanischer Asche, Bimskörnern und aus Fragmenten des Nebengesteins (Bild 2.18). Pyroklastite werden bei diesen vulkanischen Großereignissen in Form von Aschewolken und Ascheströmen abgelagert. In der Regel sind diese Gesteine bei der Ablagerung noch nicht verfestigt. Ein bekanntes Beispiel eines unverfestigten pyroklastischen Gesteins ist der Trass aus der Eifel.

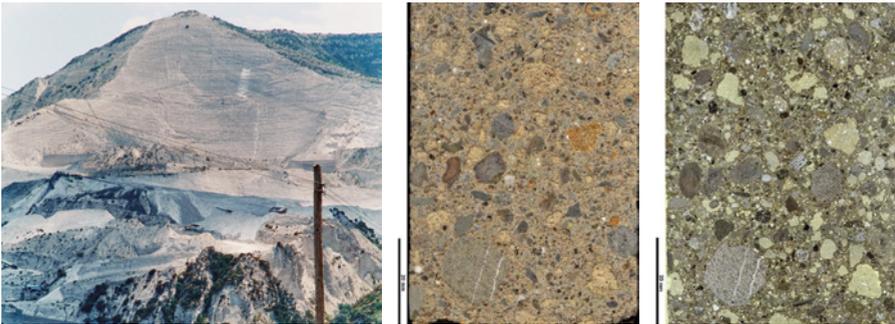


Bild 2.18 Bimsabbau auf Lipari, Italien (links) und Ettringer Tuff (Mitte). Mikroskopische Aufnahme eines Dünnschliffs desselben Tuffs (parallele Polarisatoren; rechts). Das Einbettungsmittel ist gelb eingefärbt und deutet die poröse Natur des Tuffs an.

Erst über längere Lagerungszeit können sich die vulkanischen Aschen verfestigen und es bilden sich dann vulkanische Tuffe, wie etwa der Ettringer und der Weibener Tuff, ebenfalls aus der Eifel. Vulkanische Tuffe sind oft sehr porös und weisen deshalb eine meist geringere Festigkeit auf (Bild 2.11, Bild 2.12). Außerdem ist ihre Verwitterungsbeständigkeit (Widerstand gegen Frost- und Salzverwitterung) weitaus geringer als die der Tiefen- und übrigen Ergussgesteine. Aufgrund ihrer geringeren Festigkeiten lassen sich Tuffe jedoch meist gut bearbeiten und wegen ihrer hohen Porositäten ist auch ihre Wärmeleitfähigkeit meist sehr gering, was zu guten Wärmedämmeigenschaften beiträgt.

Die Grundmasse oder Matrix vulkanischer Tuffe besteht aus Glas, Zeolithen und Tonmineralen. Aufgrund der beiden letzten Komponenten sind vulkanische Tuffe hygrisch expansiv, d. h. sie dehnen sich bei Wasserzufuhr aus und schwinden entsprechend beim Trocknen. Diese Gesteinsgruppe ist deshalb besonders empfindlich gegenüber der Exposition von Grundwasser und meteorischen Wässern [1.2].

2.1.5 Sedimente

Sandsteine und weitere klastische Sedimente

Sedimentgesteine lassen sich wie bereits besprochen in drei Gruppen einteilen: klastische, biogene und chemische Sedimente [2.9]. Klastische Sedimente sind in Deutschland am häufigsten. Zu den wichtigsten klastischen Sedimenten mit wirtschaftlicher Bedeutung gehören **Lockergesteine** wie Sand und Kies sowie die Gruppe der Sandsteine. Erstere werden zur Herstellung von Beton und Mörtel verwendet. Sandsteine kommen als Naturwerksteine in Mauerwerk, Fassadenverkleidungen oder anderen Anwendungen vor und sollen hier eingehender besprochen werden.

Sandsteine bestehen im Wesentlichen aus den Komponenten **Bindemittel/Matrix**, **Kornbestandteile** und **Porenraum** (Bild 2.19). Die Art und Anordnung dieser drei Komponenten bestimmt die Eigenschaften der Sandsteine [2.10]. Sandsteine entstehen bei der Diagenese von Lockersedimenten, wobei die Kornbestandteile durch den Überlagerungsdruck enger zusammenrücken und der Porenraum verringert wird. Bei der Diagenese finden auch stoffliche Umwandlungen statt, die zu Mineralneubildungen und Rekristallisationen führen. Diese tragen dazu bei, dass die losen Körner miteinander verkittet werden und dadurch ein zusammenhängendes Gestein entsteht. Die Bindung der einzelnen Körner untereinander kann über Tonminerale erfolgen, über Anwachsäume der Körner und über carbonatische Ausfällungsprodukte (Bild 2.20). Üblicherweise liegt nicht nur eine Bindungsform vor, sondern mindestens zwei oder sogar alle drei. Bei starker Schichtung können die Gesteinseigenschaften anisotropisch, d.h. richtungsabhängig sein. Dann zeigt z.B. die Druckfestigkeit senkrecht zur Schichtung höhere Werte als parallel dazu.

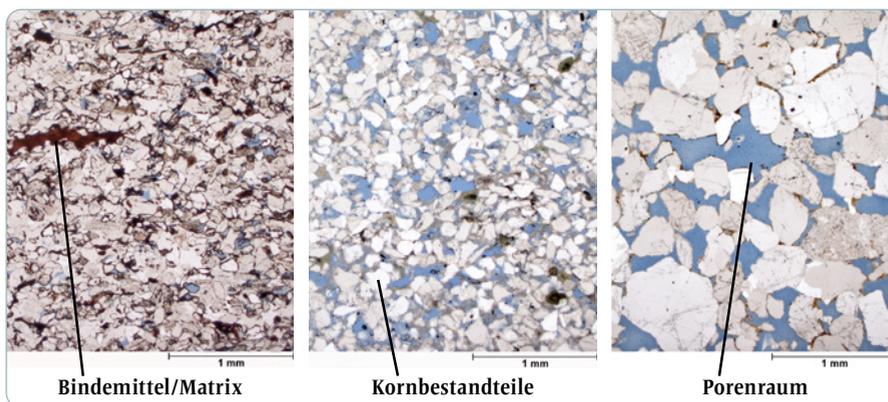


Bild 2.19 Die drei wesentlichen Komponenten von Sandsteinen: Bindemittel/Matrix, Kornbestandteile und Porenraum. Dünnschliffbilder mit blau eingefärbtem Porenraum.

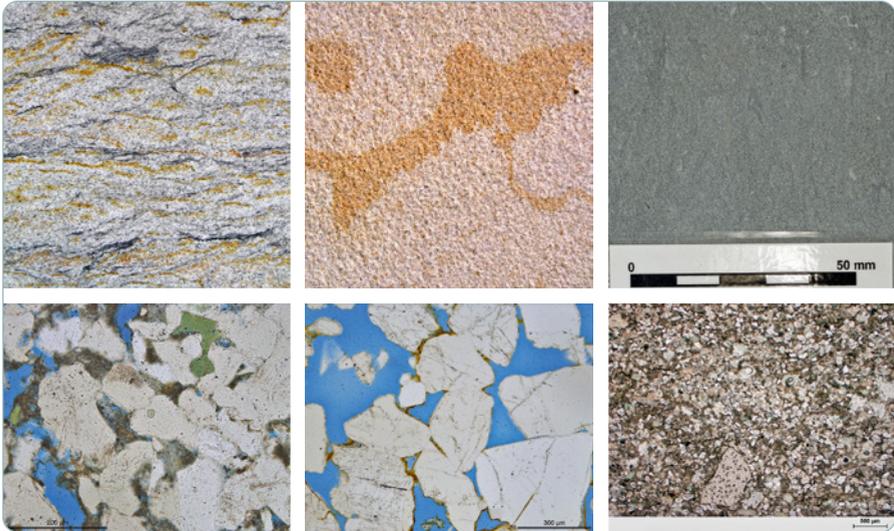


Bild 2.20 Kornbindung in Sandstein, makroskopisch (obere Reihe) und mikroskopisch (untere Reihe). Überwiegend tonige Bindung (Cottaer Sandstein; links), über Anwachs-säume (Postaer Sandstein; Mitte) und über carbonatische Ausfällungen (Anröchter Grün-sandstein; rechts). Mikroskopbilder von Dünnschliffpräparaten mit blau eingefärbten Einbettungsmittel.

Tonmineralische Kornbindungen in Sandsteinen sind häufig und erzeugen lebhaft gefärbte Steine, die etwas weicher und deshalb besser zu bearbeiten sind. Die Bindung erfolgt hierbei über feine Säume von Ton, die sich um die Sandkörner legen und manchmal die Poren teilweise ausfüllen (Bild 2.20). Aufgrund der Bindungsform ist die Festigkeit jedoch meist geringer und die Sandsteine sind anfälliger bezüglich der Verwitterung. Bekannte Beispiele von tonig gebundenen Sandsteinen sind der Maulbronner Sandstein, der Mainsandstein und der Cottaer Sandstein.

Anwachssäume von Körnern entstehen dadurch, dass während der Diagenese Lösungs- und Fällungsprozesse an den Korngrenzen stattfinden und die Körner über ihre ursprünglichen Korngrenzen hinauswachsen (Bild 2.20). Dieses Überwachsen der Korngrenzen findet überwiegend an Quarz- und Feldspatklasten statt und erzeugt ein sehr robustes Korngerüst. Dieser Typ von Kornbindung wird häufig auch quarzitische Kornbindung genannt und erzeugt Sandsteine mit hohen Festigkeiten und guter Witterungsbeständigkeit. Bekanntestes Beispiel ist der Postaer Sandstein.

Carbonatisch gebundene Sandsteine besitzen als Bindemittel Carbonate in Form von Calcit oder Dolomit, die bei der Diagenese im Porenraum gebildet werden können. Je nach Menge der gefällten Carbonate variiert die Porosität und deshalb die Festigkeitseigenschaften der Sandsteine. Wenn ein höherer Carbonatanteil

die Porenräume ausfüllt, verringert sich die Porosität und entsprechend erhöht sich die Festigkeit. Bild 2.20 zeigt das Beispiel des Anröchter Grünsandsteins bei dem ein großer Teil der Poren durch Carbonate ausgefüllt ist. Die Gesamtporosität liegt zwischen 8 und 10 Vol.-%. Je nach der Menge an Carbonaten kann das Gestein mit den geologischen Begriffen klastischer Kalkstein oder Kalksandstein bezeichnet werden. Der Begriff Kalksandstein ist jedoch mit Vorsicht zu verwenden. Er bezeichnet auch ein technisches Produkt, das aus Calciumhydroxid und Quarz im Autoklaven bei ca. 190 °C und 14 bar Wasserdampfdruck synthetisiert wird (s. Kapitel 2.4).

Klastische Sedimente werden nach Art der Kornkomponenten und nach der Korngröße eingeteilt [2.10]. Zur Klassifikation nach den Kornkomponenten werden drei Typen herangezogen:

- › Quarz,
- › Feldspat,
- › Gesteinsbruchstücke.

Bei den Feldspäten wird nicht weiter in Alkalifeldspat oder Plagioklas unterschieden. Gesteinsbruchstücke sind Körner, die aus mehr als einer Mineralphase bestehen. Bei der Klassifikation nach der Korngröße wird die relative Menge des Matrixanteils bestimmt. Als Matrix wird die Summe aller Körner mit einer Größe kleiner 30 µm bezeichnet.

Bild 2.21 gibt das Klassifikationsschema wieder. Sandsteine sind demnach klastische Sedimente mit einem Matrixanteil unter 15 %. Ist der Matrixanteil zwischen 15 und 75 % spricht man von Grauwacken (die ebenfalls als Steine verwendet werden) und Matrixanteile über 75 % stellen die Gruppe der Tongesteine dar. Bei den Sandsteinen wird zwischen Arkosen und Areniten unterschieden. Arkosen sind reicher an Feldspat (mindestens 50 %) und Arenite sind reicher an Gesteinsbruchstücken (mindestens 50 %).

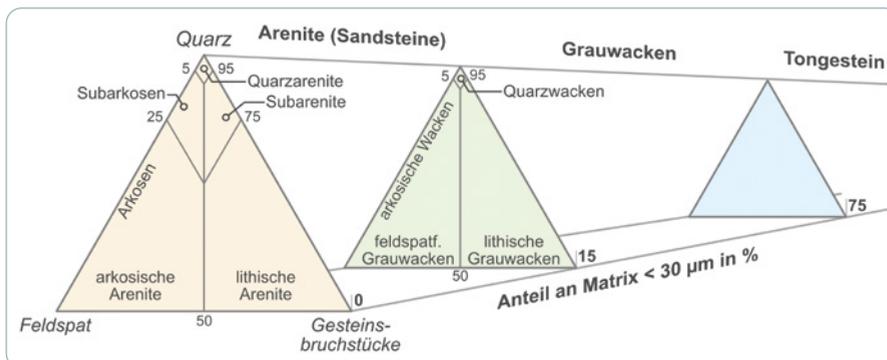


Bild 2.21 Klassifikation der klastischen Sedimentgesteine (nach Pettijohn et al. [2.10]).

Die in Bild 2.21 gezeigte Klassifikation beinhaltet Gesteine mit Korngrößen kleiner als 2 mm. Sand und Sandsteine sind bezüglich der Korngröße in dem Bereich 0,063 bis 2 mm festgelegt. Gesteine, die Körner überwiegend größer als 2 mm aufweisen werden Konglomerate und Breccien genannt. Beide Gesteinstypen werden als Naturwerksteine verwendet. Diese beiden Gesteine unterscheiden sich dadurch, dass Konglomerate aus gerundetem Kies bestehen und Breccien aus gebrochenen, kantigen Gesteinsfragmenten (Bild 2.22). Das bekannteste Konglomerat im deutschen Raum ist wahrscheinlich der Nagelfluh, der im Alpenvorland in Bayern und Baden-Württemberg auftritt und bei oberflächlicher Betrachtung dem Beton nicht unähnlich ist (Bild 2.22).

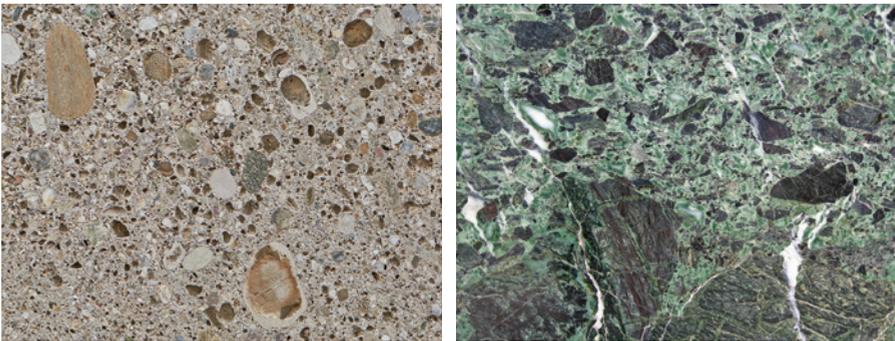


Bild 2.22 Nagelfluh (links). Deutlich sind die überwiegend gerundeten Kieskörner zu sehen, die in einer Matrix eingebettet sind. Polierte Probe einer Breccie (rechts). Es handelt sich überwiegend um kantige Gesteinskörner (Bildbreite beider Bilder ca. 10 cm).

Ein relativ seltenes Gestein, das im bayrischen Raum an der Grenze zu Schwaben verwendet wurde ist der Suevit. Beim Suevit handelt es sich um ein Impaktgestein, das beim Einschlag eines Meteoriten im Raum der Stadt Nördlingen vor ca. 14,5 Millionen Jahren entstand. Beim Einschlag des Meteoriten wurde das Nördlinger Ries gebildet und die vorhandenen Sedimente zertrümmert und in die Luft geschleudert, teilweise aufgeschmolzen und verdampft. Die Gesteinsfragmente, die in und um den Krater niederregneten, haben sich dann zum Suevit abgelagert. Bei diesem handelt es sich um ein Gemenge aus Gesteinsfragmenten und aufgeschmolzenen feinen und größeren Gesteinspartikeln, die die Grundmasse ausmachen. Wo das Gestein verfestigt vorkommt, wurde es als Werkstein für Mauerwerk oder Fassadendekorationen verwendet. Der Suevit ist, ähnlich dem vulkanischen Tuff, sehr porös und hat ähnliche Eigenschaften wie dieser. Unverfestigter oder schwach verfestigter Suevit wird als natürliches Puzzolan bei der Zementherstellung eingesetzt.

Kalksteine

Kalksteine oder Carbonatgesteine sind eine weitverbreitete Gruppe von Naturwerksteinen, die viele Arten der Anwendungen aufweisen. Kalksteine lassen sich gut bearbeiten und dichte Varianten sind verhältnismäßig verwitterungsbeständig. Der Bereich der Druckfestigkeiten ist etwas niedriger als der der Sandsteine, wobei manche Kalksteine durchaus Festigkeiten bis 90 MPa aufweisen können (Bild 2.10).

Kalksteine gehören überwiegend zu den biogenen Sedimenten, d.h. Calciumcarbonat wird mit Hilfe von Mikroorganismen aus dem Wasser abgeschieden und in deren Skelett oder Schalen eingebaut [2.9]. Aus diesem Grund bestehen sie aus den Carbonatphasen Calcit, Aragonit (beide CaCO_3) und/oder Dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Letzteres bildet sich aus der Reaktion mit Calciumcarbonat und Magnesium während der Diagenese der Kalksteine. Neben diesen Carbonatmineralen können in unterschiedlichen Mengen noch Tonminerale, Eisenoxide, Quarz und Feldspat auftreten.

Die Einteilung der Kalksteine wird nach zwei verschiedenen Klassifikations-schemata durchgeführt. Das Schema nach Folk [2.11] ist in Tabelle 2.1 aufgeführt und klassifiziert nach der Zusammensetzung der Carbonatgesteine. Daneben existiert noch das Schema nach Dunham [2.12], welches sich an Gefügemerkmalen orientiert, die sich bei der Sedimentation gebildet haben (hier nicht weiter erläutert).

Die Komponenten in Tabelle 2.1 sind eingeteilt in [2.11]:

- › Intraklasten, bestehen aus überwiegend carbonatischen Aggregationen, die sich vor der Sedimentation z. B. durch Verwirbelung des Meeresbodens gebildet haben.
- › Ooide, sind rundliche bis erbsengroße Aggregate mit schalenförmigem Aufbau. Ooide bestehen überwiegend aus Calciumcarbonat, können aber auch aus Phosphaten oder Eisenoxiden bestehen. Ooide entstehen durch konzentrische Ablagerungen von Calciumcarbonat aus übersättigter Lösung oder anderen Mineralen um einen Nukleus, meist ein Sandkorn oder Schalenrest.
- › Fossilien, bestehen überwiegend aus Schalenresten von Muscheln oder Gastropoden, sowie Kleinstfossilien wie Foraminiferen, Algen oder Bryozoen.
- › Pellets, sind überwiegend carbonatische rundliche Aggregate biogenen Ursprungs. Im Gegensatz zu den Ooiden besitzen Pellets keine oder nur andeutungsweise vorhandene innere Struktur.

Eine weitere Grobeinteilung besteht aus der Art der Matrix bzw. der Grundmasse, in denen die Komponenten eingebettet bzw. miteinander verkittet sind (Tabelle 2.1):

- › sparitisch-calcitischer Zement besteht aus grobkristallinen deutlich erkennbaren einzelnen Carbonatkristallen,
- › eine mikritische Matrix, ist ein sehr feinkörniges, carbonatisch oder carbonatisch-toniges Bindemittel.

Die Art der Komponenten und des Bindemittels wird unter dem Mikroskop an einem Dünnschliff festgestellt und der Kalkstein entsprechend kategorisiert (Bild 2.23).

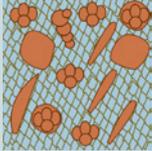
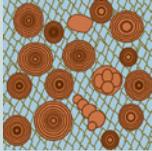
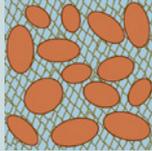
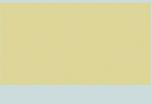
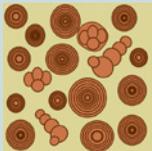
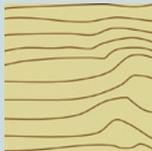
	Intraklasten	Ooide	Fossilien	Pellets
				
Sparitisch, calcitischer Zement	Intrasparit	Oosparit	Biosparit	Pelsparit
				
Mikritische Matrix	Intramikrit	Oomikrit	Biomikrit	Pelmikrit
Ohne Allocheme				
	Mikrit	Dismikrit		Riffgestein Biolithit

Tabelle 2.1 Klassifikationsschema der Kalksteine nach Folk [2.11].

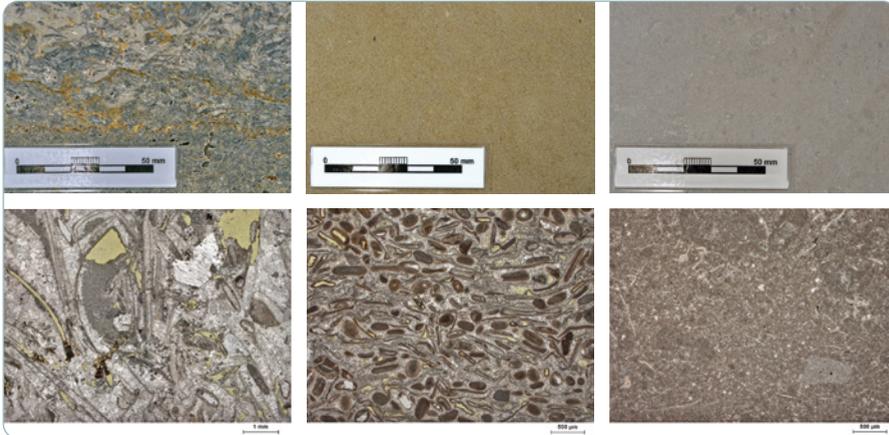


Bild 2.23 Beispiele für Kalksteinvarietäten (obere Reihe: gesägte Flächen; untere Reihe: Dünnschliffpräparate unter dem Mikroskop). Crailsheimer Muschelkalk, ein Biosparit (linke Spalte). Thüster Kalkstein, ein Pelsparit (mittlere Spalte). Treuchtlinger Kalkstein, ein Biomikrit (rechte Spalte).

Neben biogenen Kalken existiert eine Gesteinsgruppe, die rein anorganisch durch Ausfällung von Calciumcarbonat aus CO_2 -reichen Quellen gebildet wird: die **Travertine** [2.13]. Travertin wird seit der Antike als Werkstein verwendet [2.14]. Bekannte Beispiele befinden sich in Rom, wo der Travertin von Tivoli in vielen noch erhaltenen Monumenten Verwendung fand, wie z. B. im Kolosseum (Bild 2.24). Bekannte deutsche Travertinvorkommen liegen auf der Schwäbischen Alb, z. B. der Gauinger Travertin aus dem Landkreis Reutlingen, der in zahlreichen Bauwerken eingebaut wurde, oder ein sehr dichter, schön gebänderter Travertin, der im Ortsteil Böttingen der Stadt Münsingen gewonnen und als Böttinger Marmor verwendet wurde.

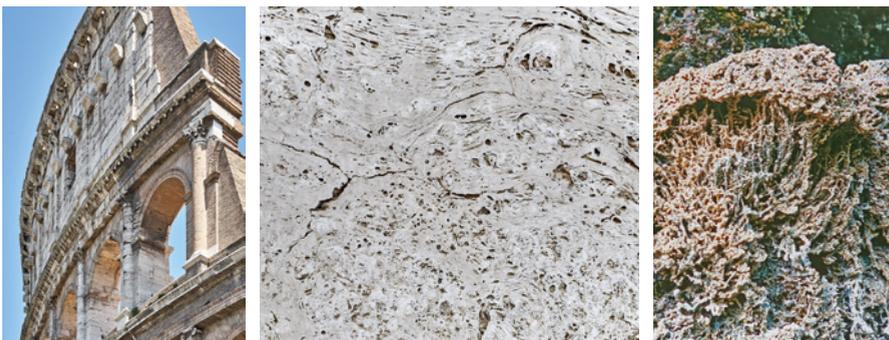


Bild 2.24 Travertinfassade am Kolosseum in Rom (links). Gesägte Oberfläche eines Travertins. Zu erkennen sind Bänderungen und zahlreichen Makroporen (Mitte). Sinterkalk, der Moosbüschel überkrustet hat (Gütersteiner Wasserfälle, Baden-Württemberg, rechts).

Travertine sind dichte, manchmal gebänderte Kalksteine, die zahlreiche Makroporen enthalten können (Bild 2.24). Nicht selten finden sich darin Abdrücke von Pflanzenresten oder Tieren, wie z. B. Blätter oder Vogelfedern. Das Gestein besitzt eine hohe Festigkeit und ist gut verwitterungsbeständig, allerdings verhältnismäßig aufwändig zu bearbeiten.

Die Verwitterungsbeständigkeit von Kalksteinen hängt von verschiedenen Faktoren ab. Neben der Porosität und der Festigkeit bestimmt auch die Art des Bindemittels das Verwitterungsverhalten. Kalksteine mit mikritischer Matrix können Tonminerale enthalten, die das Gestein je nach der Art und Menge empfindlich gegenüber Wasser machen und hohe Quelldehnungen bewirken können.

Alle Kalksteine sind empfindlich gegenüber sauren Luftschadstoffen (Bild 2.25). Diese Schadstoffe, z. B. Schwefeldioxid (SO_2) reagieren auf der Oberfläche der Natursteine zu Säure und lösen den Kalksteine oberflächlich an [2.15]. Im Fall von SO_2 bildet sich Schwefelsäure, welche CaCO_3 auflöst und in Gips umwandelt (Kapitel 9.3.3). Dadurch lassen sich Gipskrusten erklären, die oftmals auf der Oberfläche angegriffener Kalksteine auftreten (Bild 2.25).

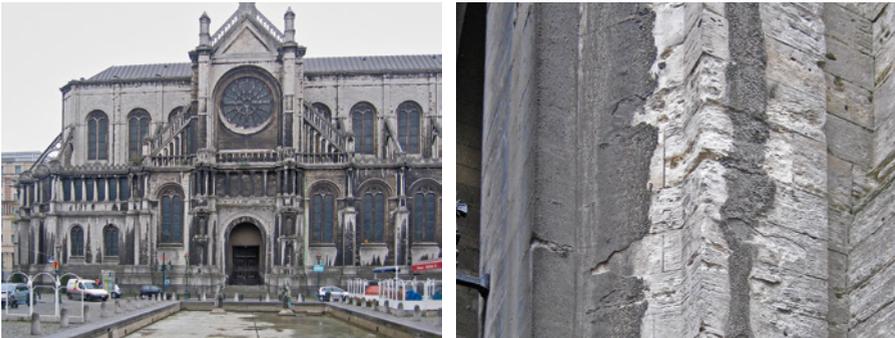


Bild 2.25 Kalksteinfassade an der Kirche St. Catherine in Brüssel. Aufgrund der Umwelteinflüsse hat sich auf der Oberfläche des Kalksteins eine schwarze Gipskruste gebildet.

2.1.6 Metamorphite

Metamorphe Gesteine entstehen aus Magmatiten oder Sedimenten und zeichnen sich durch ein verändertes Gefüge und/oder Mineralbestand aus. Diese Änderungen sind abhängig von Druck und Temperatur, denen magmatische und sedimentäre Gesteine infolge tektonischer Großprozesse unterworfen werden ([2.16], s. 2.1.2). Ein bekanntes Beispiel für ein metamorphes Gestein ist der Gneis, der z. B. aus der Metamorphose von Granit oder Sandstein entstehen kann (Bild 2.26). Alle drei Gesteine weisen dieselben Hauptbestandteile auf: Quarz, Feldspat und Glimmer. Der Unterschied zwischen den beiden Gesteinen ist eine ausgeprägte

Gefügeänderung des Gneises infolge Druck- und Temperatureinwirkung und die Bildung von neuen Phasen als Nebenbestandteile [2.16].



Bild 2.26 Gneis (links) und Granit (rechts). Beide besitzen dieselben Hauptbestandteile aber ein unterschiedliches Gefüge mit deutlicher Schieferung des Gneises.

Die meisten metamorphen Gesteine weisen eine mehr oder weniger ausgeprägte Schieferung auf (s. 2.1.3). Schiefer als Gesteine (z. B. Dachschiefer, Grünschiefer) besitzen eine sehr ausgeprägte Schieferung; die Gesteine lassen sich leicht parallel der Schieferung spalten. Eine Schieferung bedeutet, dass sich Mineralphasen während der Metamorphose teilweise lösen und entlang der Druckrichtung neu bilden (Bild 2.27).

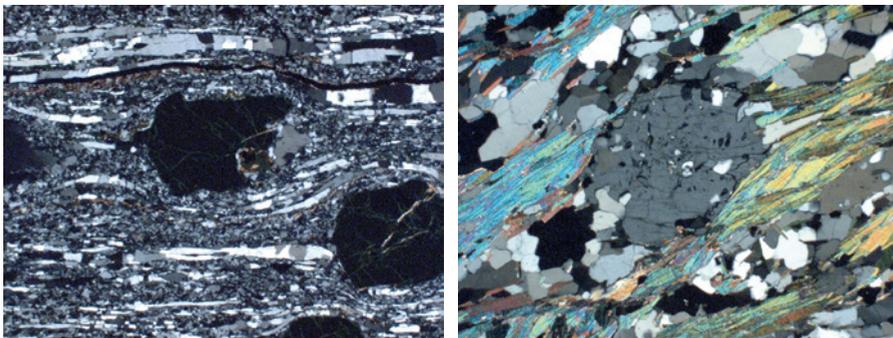


Bild 2.27 Beispiele für Schieferung unter dem Mikroskop: Gneis (links) und Schiefer (rechts). Deutlich sind die länglichen Mineralphasen zu erkennen. Bei den schwarzen, rundlichen Aggregaten im linken Bild handelt es sich um Granat. Dünnschliffbilder unter gekreuzten Polarisatoren.

Metamorphe Gesteine sind häufige Bestandteile von Baukonstruktionen. Neben Mauersteinen werden sie zur Fassadengestaltung, als Fußbodenbeläge oder als Dachsteine eingesetzt (z. B. Dachschiefer). Eines der bekanntesten metamorphen

Gesteine, der Marmor, ist ein Material, das seit jeher auch gerne zur Innenraumgestaltung, als Fliesen oder Ziermaterial (Säulenverkleidung, Balustraden, etc.) verwendet wird.

Marmore entstehen aus Kalksteinen durch dieselben Prozesse, die aus einem Granit einen Gneis entstehen lassen. Durch die wesentlich höheren Drücke und Temperaturen als bei der Diagenese von Sedimenten findet eine starke Verdichtung, teilweise Anlösung und Rekrystallisation von Calcit und Dolomit statt. Gefügeänderungen sind deutlich unter dem Mikroskop sichtbar. Marmore besitzen zwar nur selten eine deutliche Schieferung, zeigen aber wesentlich größere einzelne Kristalle, die meist **Zwillingslamellen** aufweisen, bei einer drastischen Verringerung des Porenraums (Bild 2.28). Das bekannteste Abbauggebiet von Marmor in Europa liegt bei Carrara, einer Gemeinde in der westlichen Toskana nördlich von Pisa. Viele der bekannten Skulpturen von Michelangelo und Gian Lorenzo Bernini aber auch aus der römischen Antike wurden aus Carraramarmor hergestellt.

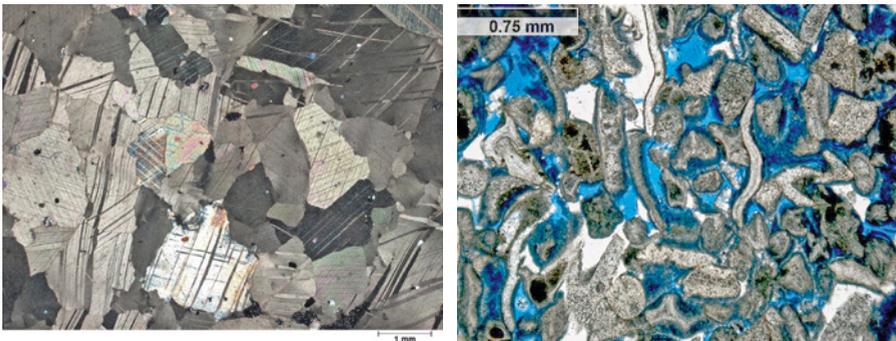


Bild 2.28 Dünnschliffbild eines Marmors (links, +N) und als Vergleich ein biomikritischer Kalkstein (rechts, II Polarisatoren). Bei den Streifen im Marmor handelt es sich um Zwillingslamellen. Der Porenraum im rechten Bild ist blau gekennzeichnet.

Metamorphe Gesteine weisen sehr unterschiedliche Eigenschaften auf, die zudem sehr oft richtungsabhängig sind. Bei stark geschieferten Gesteinen, z. B. Ton-, Grün-, oder Amphibolschiefer ist die Druckfestigkeit parallel der Schieferung bis zu 40 % geringer als senkrecht dazu [2.13]. Richtungsabhängig sind aber nicht nur mechanische, sondern auch andere Eigenschaften, z. B. Wärmeleitung oder Wassertransport. Stark geschieferte Gesteine sind entlang der Schieferung stärker frostgefährdet, da Wasser leichter in die Schieferschichten eindringen kann und die Zugfestigkeiten zwischen den Schichten meist wesentlich geringer sind. Tabelle 2.2 gibt einen Überblick über einige der bekanntesten Metamorphite.

Metamorphit	Eigenschaften	Verwendung
Gneis	schwache bis moderate Schieferung; höhere Festigkeiten, moderate Anisotropie in den Eigenschaften	Mauerstein, Fassadenverkleidung, Bodenbelag, Fliesen
Granulit	schwache bis moderate Schieferung; hohe Festigkeiten, moderate Anisotropie in den Eigenschaften	Mauerstein, Fassadenverkleidung, Bodenbelag, Fliesen
Migmatit	schwache bis moderate Schieferung; hohe Festigkeiten, moderate Anisotropie in den Eigenschaften; teilweise mit neugebildeten granitischen Blasten	Mauerstein, Fassadenverkleidung, Bodenbelag, Fliesen
Tonschiefer	stark ausgeprägte Schieferung; mittlere Festigkeiten und ausgeprägte Anisotropie in den Eigenschaften	Dachsteine, Bodenbeläge, Fassadenverkleidungen
Grünschiefer, Amphibolschiefer	stark ausgeprägte Schieferung; mittlere bis hohe Festigkeiten und ausgeprägte Anisotropie in den Eigenschaften	Bodenbeläge, Fassadenverkleidungen
Marmor	keine oder schwache Schieferung; hohe Festigkeiten, schwache Anisotropie in den Eigenschaften	Bodenbeläge, Fassadenverkleidungen, Fliesen, Zierelemente

Tabelle 2.2 Beispiele für metamorphe Gesteine, die als Baustoffe eine Rolle spielen.

2.1.7 Regelwerke

Die meisten Normen für Natursteine beziehen sich nicht auf Mauerwerk, sondern legen vor allem Qualitätskriterien für Platten, Beläge, Fliesen und Verkleidungen fest. Eine Zusammenstellung der wichtigsten DIN-Normen für Natursteine enthält die folgende Liste.

Stoffnormen/Terminologie

DIN EN 771-6. Festlegungen für Mauersteine – Teil 6: Natursteine.

DIN EN 12440. Naturstein, Kriterien für die Bezeichnung.

DIN EN 12670. Naturstein – Terminologie.

Prüfnormen

DIN EN 772-1. Prüfverfahren für Mauersteine – Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit.

- DIN EN 772-4. Prüfverfahren für Mauersteine – Teil 4: Bestimmung der Dichte und der Rohdichte sowie der Gesamtporosität und der offenen Porosität von Mauersteinen aus Naturstein.
- DIN EN 1925. Prüfverfahren von Naturstein – Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten infolge Kapillarwirkung.
- DIN EN 1926. Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der einachsigen Druckfestigkeit.
- DIN EN 1936. Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der offenen Porosität und der Gesamtporosität.
- DIN EN 12371. Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des Frostwiderstandes
- DIN 12372. Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Biegefestigkeit unter Mittellinienlast.
- DIN EN 12407. Prüfverfahren für Naturstein. Petrographische Prüfung.
- DIN EN 13364. Prüfung von Naturstein – Bestimmung der Ausbruchlast am Ankerdornloch.
- DIN EN 13755. Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Wasseraufnahme unter atmosphärischem Druck.
- DIN EN 14066. Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des Widerstandes gegen Alterung durch Wärmeschock.
- DIN EN 14147. Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Beständigkeit gegen Alterung durch Salzsprühnebel.
- DIN EN 14580. Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls.
- DIN 52008. Prüfverfahren für Naturstein – Beurteilung der Verwitterungsbeständigkeit.
- DIN 52100-2. Naturstein – Gesteinskundliche Untersuchungen – Allgemeines und Übersicht.

2.2 Mauerziegel

Ziegel ist ein technisches Bauprodukt mit sehr langer Tradition. **Mauerziegel** und andere Ziegelprodukte werden aus Lehm hergestellt und anschließend in einem Ofen über längere Zeit gebrannt. Der Brennprozess verwandelt das tonige Bindemittel des Lehms in keramische Phasen, die aus dem Ziegel ein keramisches Brennprodukt machen und ihm seine Festigkeit und Beständigkeit verleihen. Ziegel werden im deutschsprachigen Raum auch **Backsteine** genannt, woraus sich die Begriffe **Backsteingotik** oder **Backsteinarchitektur** ableiten.

Im Unterschied zu den Mauerziegeln, die immer Brennprodukte sind, werden Lehmsteine nicht gebrannt, sondern an der Luft getrocknet. (s. Kapitel 2.3). Zwar

werden sie häufig als Lehmziegel oder luftgetrocknete Ziegel bezeichnet, sind aber von ihrer Materialbeschaffenheit noch immer Lehm.

Ziegel werden schon seit ca. 8000 Jahren verarbeitet (Lehmsteine seit ca. 10000 Jahren). Der Vorteil von Ziegeln ist ihre regelmäßige Form. Gegenüber dem Lehmstein, hat der Ziegel außerdem eine höhere Festigkeit und Beständigkeit. Der Bauboom in der römischen Antike war größtenteils auf die massenhafte Verwendung von Ziegeln aller Art zurückzuführen: Mauerziegel, Dachziegel, Ziegelrohre für Frisch- und Abwasser. Entsprechend hat sich im römischen Einflussgebiet die Technologie der Ziegelherstellung besonders hoch entwickelt [2.17]. Bekannte Ziegelbauten der römischen Antike aus Ziegelmauerwerk befinden sich in Rom, Istanbul (Konstantinopel) aber auch in Trier (Bild 2.29).



Bild 2.29 Beispiele für römische Ziegelbauweise: Die Trajansmärkte in Rom (links) und die Konstantinbasilika in Trier (rechts).

Im Mittelalter wurde in Nordeuropa die Ziegelbauweise erst ab dem 12. Jahrhundert eingeführt. Besonders unter der Hanse wurden in den stark wachsenden Hansestädten Ziegel als Massenbaustoff für viele repräsentative Sakral- und Profanbauwerke verwendet (Bild 2.30). Mit dem Beginn der Industrialisierung im 18. und 19. Jahrhundert änderte sich die Bevölkerungsstruktur drastisch. Viele zogen in Städte oder Ballungszentren, wo schnell und nachhaltig Wohnraum gebraucht wurde. Neue technische Entwicklungen, wie die Strangpresse und der Ringofen, ermöglichten eine Ziegelproduktion in vorher nicht gekannten Volumina. Ziegel wurden im 19. Jahrhundert der wichtigste Baustoff für die damalige Stadtplanung und -entwicklung. Nicht nur Baukonstruktionen wurden mit Ziegelmauerwerk errichtet, sondern auch Abwasserkanäle und die Tunnel der Mitte bis Ende des 19. Jahrhundert neu entstehenden Untergrundbahnen. Erst ab der zweiten Hälfte des 20. Jahrhundert verdrängte Beton den Ziegel als meist verwendeten Massivbaustoff. Bis heute werden zwar noch Mauerziegel hergestellt, sie sind aber nur eines von vielen Mauerwerksmaterialien (z. B. Kalksandstein, Betonstein, Porenbeton, etc.).



Bild 2.30 Beispiele für mittelalterliche Ziegelbauwerke: Die Nikolaikirche in Stralsund (links) und das Heiligen-Geist-Hospital in Lübeck (rechts).

2.2.1 Herstellung

Als Ausgangsmaterial von Ziegel dient Lehm, der in Gruben abgebaut wird. Nicht jeder Lehm kann als Rohstoff verwendet werden. Bild 2.31 zeigt die Zusammensetzung von Lehmen, die für Ziegelprodukte geeignet sind [2.18]. Das Dreiecksdiagramm gibt die Größenfraktionen Ton ($<2\ \mu\text{m}$), Feinschluff ($2\text{--}20\ \mu\text{m}$) sowie Grobschluff oder Sand ($>20\ \mu\text{m}$) an und ist auf 100 Masse-% normiert. Jede Ecke entspricht einem Anteil von 100 Masse-% einer Komponente. Hat ein Lehm z. B. 15 % der Fraktion A und 75 % der Fraktion B, folgt für die Fraktion C ein Anteil von 10 % (Bild 2.31). Je mehr die Zusammensetzung eines Lehms zur oberen Diagrammecke rückt, desto tonreicher wird er. Entspricht die Zusammensetzung dagegen einem Punkt nahe der rechten unteren Ecke, besitzt der Lehm mehr Grobschluff und Sand. Für Vollziegel werden Lehme mit einer gröberen Kornzusammensetzung verwendet als für Hochloch- oder Dachziegel.

Rohlehm ist teilweise noch verfestigt und enthält vereinzelt noch größere Bestandteile. In diesem Zustand kann er nicht geformt werden. Er muss deshalb aufbereitet werden, bis eine homogene, formbare Masse entsteht. Bei der Halbnassaufbereitung wird der grubenfeuchte Rohlehm dazu im Kollergang gebrochen und zerkleinert, wobei lediglich Tonagglomerate aufgebrochen und die wenigen gröberen Komponenten gemahlen werden. Dabei läuft der Lehm durch vertikal ausgerichtete runde Läufer, die um eine Achse rotieren [2.19]. Während des Kollerns wird der Lehm mit einer gezielt dosierten Wassermenge durchfeuchtet und homogenisiert. Die Lehmmasse kann anschließend in weiteren Schritten, z. B. Walzwerken, zur Reinigung und Ausscheidung von unerwünschten Bestandteilen weiter aufbereitet werden. Im Sumpfhaus wird der Lehm gelagert und gemischt. Außerdem wird während des Sumpfens eine gleichmäßige Durchfeuchtung des Lehms erreicht. Dies überführt die Lehmmasse in einen plastischen, formbaren

Zustand (Bild 2.32). Die Formbarkeit hängt vom Wassergehalt und dem Tongehalt ab. Ein hoher Tongehalt im Lehm unterstützt die Formbarkeit, hat aber den Nachteil eines erhöhten Schwindens mit der Gefahr, dass sich beim Trocknen oder Brennen Risse bilden.

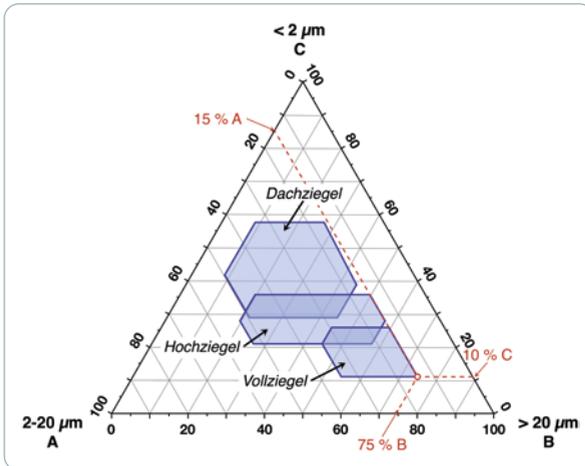


Bild 2.31 Dreiecksdiagramm der Zusammensetzung von Lehm für verschiedene Ziegelprodukte (nach [2.18]).



Bild 2.32 Herstellung von Ziegelprodukten: Kollern und Mauken des Rohlehms (links), sowie Formgebung im Handstrichverfahren (Mitte und rechtes Bild).

Ziegelprodukte wurden bis etwa Mitte des 19. Jahrhundert von Hand geformt, man sagt auch gestrichen. Dabei wurde eine bestimmte Menge des plastischen Lehms mit Wucht in eine Form, ein Model, geworfen und überschüssiger Lehm anschließend mit einem Holzstab abgestrichen (Bild 2.32). Die Form wurde dann entfernt und der ungebrannte Rohziegel oder Grünling vorgetrocknet. Es werden auch heute noch Vollziegel im Handstrichverfahren hergestellt, allerdings in Europa meist in kleinerer Produktion oder mithilfe von Maschinen (Maschinenstrichziegel).

Der größte Anteil der Ziegelprodukte wird heute in Strangpressen geformt und anschließend geschnitten (Bild 2.33). Dabei wird die plastische Lehm Masse unter Druck durch eine Matrize gepresst [2.19]. Auf diese Weise lassen sich geschlitzte oder gelochte Steine mit Aussparungen herstellen. Nach dem Schneiden werden die Grünlinge in Trocknungskammern mit der Abwärme des Tunnelofens graduell vorgetrocknet (Bild 2.33) und anschließend gebrannt. Dachziegel werden nach der Formgebung durch die Strangpresse und dem Schneiden durch eine hydraulische Presse geleitet, um entsprechende Details in die Grünlinge einzuprägen.



Bild 2.33 Herstellung von Ziegelprodukten: Formgebung mit Strangpresse und Schneiden des Strangs mittels Drahtmesser (links). Trocknen der Grünlinge in Trocknungskammern (rechts). Ziegelpark Mildenberg bei Berlin.

Das Brennen der Steine erfolgte über Jahrtausende in Feldbrandöfen, in denen Tausende bis zu Millionen Steine aufgeschichtet und über Wochen gebrannt wurden [2.19] (Bild 2.34). Feldbrandöfen waren in Europa bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts üblich und sind in Asien teilweise noch heute in Verwendung. Nachteile der Herstellung mit dem Feldbrandofen sind die diskontinuierliche Produktionsweise, der hohe Brennstoffverbrauch und Wärmegradienten im Ofen, welche Steine mit unterschiedlichen Brenntemperaturen erzeugen.



Bild 2.34 Herstellung von Ziegelprodukten: Brennen in Feldbrandöfen in der Nähe von Kabul, Afghanistan (Foto: © Hartmut Pliett, Karlsruhe) und Hoffmannscher Ringofen (rechts, Ziegelpark Mildenberg bei Berlin).

Mit dem Hoffmannschen Ringofen war es erstmals möglich, nahezu kontinuierlich Mauerziegel zu brennen (Bild 2.34). Im Ofen wurden die Brenngase über die Grünlinge bewegt. Dabei wurde die Temperatur von einer niedrigen bis zur Maximaltemperatur erhöht und anschließend von den gebrannten Steinen zur Abkühlung wieder langsam weggeführt [2.19]. Der Ringofen hatte verschiedene Kammern, von denen zwei – zum Beschicken mit Grünlingen und Entnehmen der gebrannten Ziegel – immer auf nahezu Raumtemperatur gehalten wurden. Im 20. Jahrhundert setzten sich jedoch Tunnelöfen, die heute mit Öl oder Erdgas beheizt werden, durch. Im Tunnelofen werden die Grünlinge auf Rollenlagern entlang eines vorgegebenen Temperaturprofils durch den Ofen geführt. Das Temperaturprofil erlaubt eine schonende Aufheizung der Grünlinge bis zur maximalen Brenntemperatur (ca. 950° bis 1 050 °C) und ein anschließend behutsames Abkühlen. **Klinkersteine** werden bei Temperaturen zwischen 1 100° bis 1 300 °C gebrannt. Tunnelöfen erlauben eine hohe Produktionszahl von Ziegeln. Fast alle modernen Ziegeleibetriebe arbeiten heute mit Tunnelöfen. Nach dem Brennen werden die Ziegel abgekühlt auf Paletten verpackt und transportiert. Moderne gelochte Ziegel können entsprechend plangeschliffen und mit Wärmedämmstoffen versehen werden. Bild 2.35 fasst die Herstellung moderner gelochter Mauerziegel zusammen.

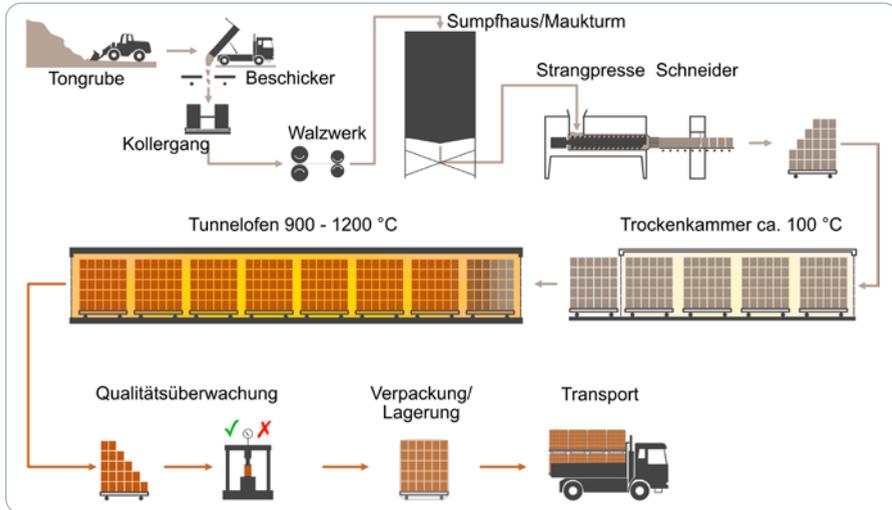
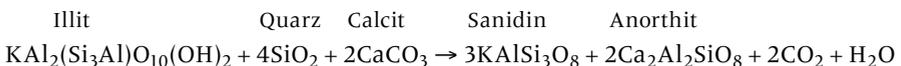
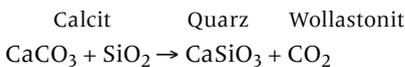
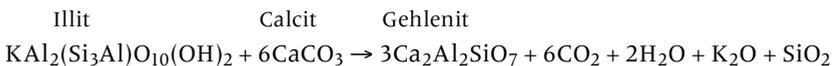


Bild 2.35 Vereinfachte Darstellung heutiger Ziegelproduktion.

2.2.2 Eigenschaften

Mineralreaktionen beim Brennen von Ziegeln

Ziegel sind keramische Produkte. Beim Brennen von Lehm laufen insbesondere in der Tonfraktion chemische Reaktionen ab, bei denen aus Tonmineralen keramische Phasen entstehen, die entsprechend stabiler sind [2.20]. Aber auch beigemengte Carbonate (Calcit, Dolomit, etc.) können zur Bildung von keramischen Phasen beitragen. Im Folgenden sind einige Beispiele für diese Reaktionen aufgeführt [2.21].



Größere Mengen an Carbonaten in der Rohmasse können nach dem Brennen Treibreaktionen im Ziegel hervorrufen. Die Ziegelqualität ist dann beeinträchtigt,

besonders, wenn die Carbonate in Knollen aggregiert sind. Da Ziegel heute jedoch einer Qualitätskontrolle unterliegen, treten Treiberscheinungen eher bei nicht überwachten Produkten auf.

Historische Ziegel aus Feldbrandöfen zeigen häufig keine einheitlichen Eigenschaften, da die Brenntemperaturen von der Lage des Grünlings im Ofen abhängen. Bei niedrigeren Brenntemperaturen können organische Reste oder Carbonate vorhanden sein, bei hohen Temperaturen kann der Stein zum Klinker gebrannt sein.

Formate für Mauerziegel

Mauerziegel wurden nach festgelegten Formaten hergestellt, die sich zu Anfang lokal unterschieden. In Mitteleuropa hat sich im Mittelalter das Klosterformat durchgesetzt, das in seinen Dimensionen von Bauhütte zu Bauhütte allerdings sehr stark variierte. Die Maße lagen im folgenden Bereich:

- › Klosterformat: 260–320 mm × 120–130 mm × 50–100 mm

In Deutschland wurde 1872 im Zuge der Reichsgründung das Ziegelformat vereinheitlicht; es wurde das Reichsformat eingeführt. Dieses hatte die Maße:

- › Reichsformat: 250 mm × 120 mm × 65 mm

Unter Berücksichtigung der Mörtelfugen wurden für einen Kubikmeter Mauerwerk 400 Steine benötigt. Da dieses Format noch nicht an das metrische System angepasst war, werden diese Maße als »altes Reichsformat« bezeichnet.

1875 wurde international das metrische System eingeführt. Dies führte zur Anpassung des 1872 eingeführten alten Reichsformats zum »neuen Reichsformat«:

- › Neues Reichsformat (RF): 240 mm × 115 mm × 63 mm

Fast gleichzeitig wurde das auch heute noch verwendete »Normalformat« verwendet:

- › Normalformat (NF): 240 mm × 115 mm × 71 mm

Grundlage für die Längenteilung beim Normalformat war der Achtelmeter, d. h. acht Steinreihen (je 115 mm), nebeneinander angeordnet im Binderverband, ergeben mit der jeweiligen Mörtelfuge von je 10 mm zusammen eine Wandlänge von genau einem Meter.

Die Ziegelmaße für Mauersteine waren in der deutschen Restnorm DIN 105-100 geregelt, die jedoch 2019 gestrichen und durch die Normen DIN 105-4 bzw. DIN 20000-401 ersetzt wurde. Hier finden sich die weiteren üblichen Formate, die auf dem Dünnformat aufbauen (Bild 2.36):

- › Dünnformat (DF): 240 mm × 115 mm × 52 mm
- › 2 DF: 240 mm × 115 mm × 113 mm
- › 3 DF: 240 mm × 175 mm × 113 mm

- › 4 DF: 240 mm × 240 mm × 113 mm
- › 5 DF: 240 mm × 300 mm × 113 mm
- › etc.

Heutige Steine unterliegen den Normenvorgaben und müssen, da Mauersteine tragend verarbeitet werden können und sicherheitsrelevant sind, entsprechend einer periodischen Qualitätsprüfung unterzogen werden. Die Maßtoleranzen sind in den Normen festgelegt (z. B. DIN 105-4 bzw. DIN 20000-401). Allerdings weisen Altziegel, die aus Abbrucharbeiten gewonnen, gereinigt und zum Verkauf angeboten werden, oft große Unterschiede in den Maßtoleranzen auf. Sie werden gerne bei der Bauinstandsetzung historischer Ziegelgebäude verwendet. Bild 2.37 zeigt die Maßtoleranzen für eine Anzahl von Mauerziegel (Vollziegel) mit dem neuen Reichsformat. Die roten Kreuze geben die Sollwerte für das neue Reichsformat wieder.

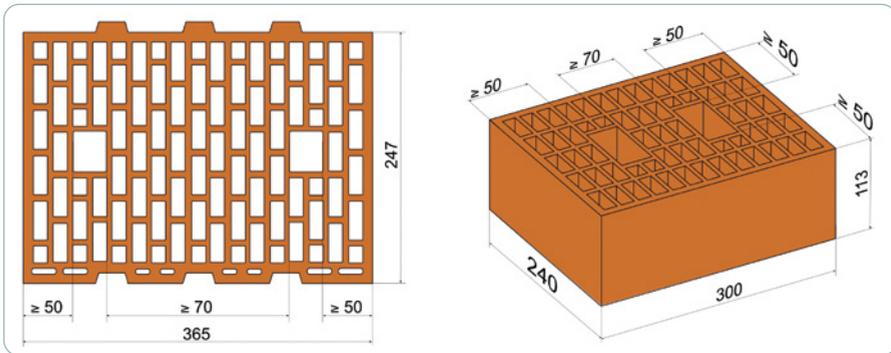


Bild 2.36 Ziegelmaße eines Hochlochsteins W (links) und Griffanordnung eines 5DF Steins (rechts).

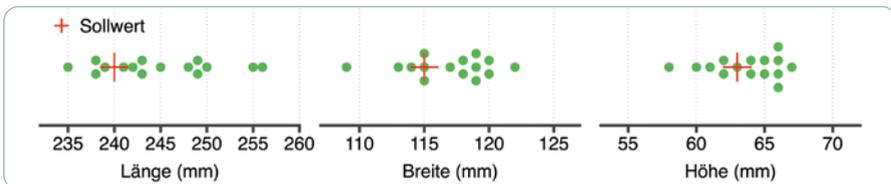


Bild 2.37 Ziegelmaße und Sollwerte von wiedergewonnenen Steinen mit neuem Reichsformat (RF).

Rohdichte und Druckfestigkeit

Bei Mauerziegeln wird zwischen Scherbenrohndichte und Steinrohndichte unterschieden. Die Scherbenrohndichte ist die Rohdichte des Materials (Stoffrohndichte), die Steinrohndichte schließt bei der Berechnung der Steindichte das Volumen eventuell vorhandener Löcher ein. Beim Vollziegel kann die Querschnittsfläche durch

Lochung bis zu 15 % gemindert sein. In DIN EN 771-1 werden LD- (low density, $<1 \text{ kg/dm}^3$) und HD- (high density) Steine unterschieden. Hochlochziegel weisen die Lochung senkrecht zur Steingrundfläche, Langlochziegel parallel zur Grundfläche auf. Die Rohdichte wird nach DIN 105-4/DIN 20000-401 in entsprechende Klassen eingeteilt (0,55 bis $2,4 \text{ kg/dm}^3$) [2.22].

Dasselbe gilt für die Druckfestigkeit. Diese wird nach DIN 105-4/DIN 20000-401 für Mauerziegel in Klassen von 2,0 bis 60,0 MPa eingeteilt (kleinster Einzelwert). Historische Steine haben wie bei den Maßen entsprechende Schwankungen bei der Dichte und der Druckfestigkeit. Die Steine im Reichsformat aus Bild 2.37 wurden der Prüfung der Rohdichte und der Druckfestigkeit unterzogen. Bild 2.38 zeigt die Schwankung der Steineigenschaften. Bei einer Anzahl von neun Steinen treten zwei Rohdichteklassen und sechs Festigkeitsklassen auf. Nach heutigen Qualitätskriterien wären diese Steine nicht mehr zulässig, da die Schwankungsbreite der Eigenschaften die Grenzwerte der Qualitätskriterien übersteigen (s. DIN 105-4/DIN 20000-401, DIN EN 771-1).

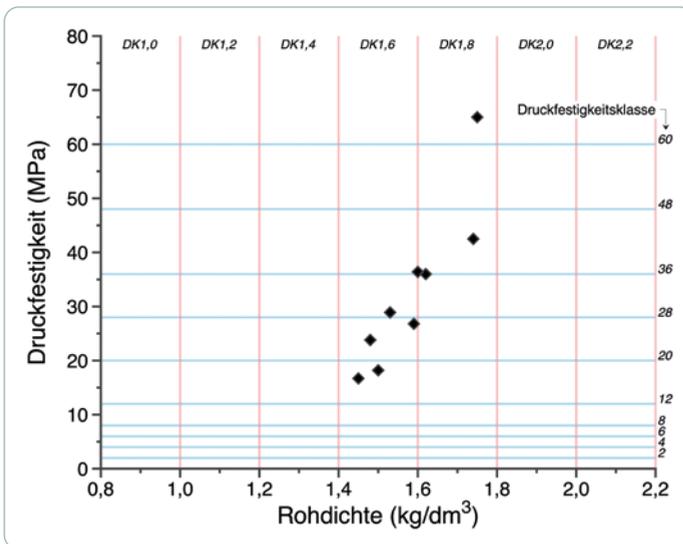


Bild 2.38 Steinrohichte und Druckfestigkeit von Altziegeln mit dem Reichsformat.

Weitere Eigenschaften

Mauerziegel sollten frostbeständig sein und keine treibenden Einschlüsse aufweisen (DIN 105-4/DIN 20000-401). Treibminerale können aus Sulfaten oder Calcium- bzw. Magnesiumoxid bestehen. Weiterhin sollten keine größeren Konzentrationen an löslichen Salzen vorhanden sein, da diese zu Ausblühungen und eventuell zu Putzablösungen führen können. Methoden zur Prüfung der Eigenschaften von Mauerziegeln sind in den Normen aufgeführt.

2.2.3 Regelwerke

Die folgenden Normen geben die wichtigsten Regelwerke für Mauerziegel wieder. Die reinen DIN-Normen legen besondere Produktforderungen fest, die nur in Deutschland gelten.

DIN EN 771-1: Festlegungen für Mauersteine – Teil 1: Mauerziegel.

DIN EN 772-1: Prüfverfahren für Mauersteine – Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit.

DIN EN 772-2: Prüfverfahren für Mauersteine – Teil 2: Bestimmung des prozentualen Lochanteils in Mauersteinen.

DIN EN 772-3: Prüfverfahren für Mauersteine – Teil 3: Bestimmung des Nettolumens und des prozentualen Lochanteils von Mauerziegeln mittels hydrostatischer Wägung (Unterwasserwägung).

DIN EN 772-5: Prüfverfahren für Mauersteine – Teil 5: Bestimmung des Gehaltes an aktiven löslichen Salzen von Mauerziegeln.

DIN EN 772-7: Prüfverfahren für Mauersteine – Teil 7: Bestimmung der Wasseraufnahme von Mauerziegeln für Feuchteisolierschichten durch Lagerung in siedendem Wasser.

DIN EN 772-11: Prüfverfahren für Mauersteine – Teil 11: Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme von Mauersteinen aus Beton, Porenbetonsteinen, Betonwerksteinen und Natursteinen sowie der anfänglichen Wasseraufnahme von Mauerziegeln.

DIN EN 772-13: Prüfverfahren für Mauersteine – Teil 13: Bestimmung der Netto- und Brutto-Trockenrohdichte von Mauersteinen (außer Natursteinen).

DIN EN 772-19: Prüfverfahren für Mauersteine – Teil 19: Bestimmung der Feuchtedehnung von horizontal gelochten großen Mauerziegeln.

DIN 105-100: Mauerziegel – Teil 100: Mauerziegel mit besonderen Eigenschaften (zurückgezogen, durch DIN 105-4/DIN 20000-401 ersetzt).

DIN 105-4: Mauerziegel – Teil 4: Keramikklinker.

DIN 105-5: Mauerziegel – Teil 5: Leichtlanglochziegel und Leichtlanglochziegelplatten.

DIN 105-6: Mauerziegel – Teil 6: Planziegel.

DIN 20000-401: Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken – Teil 401: Regeln für die Verwendung von Mauerziegeln nach DIN EN 771-1.

2.3 Lehmsteine

2.3.1 Lehm und Lehmsteine

Lehmsteine bestehen aus Lehm, der im plastischen Zustand in Model zu regelmäßigen Steinen geformt und an der Luft ausgehärtet (getrocknet) wird. Lehm selbst besteht aus unterschiedlichen Kornfraktionen mit Anteilen von unter $2\ \mu\text{m}$ ($0,002\ \text{mm}$) und bis zu einer Korngröße von 4 bis 8 mm. Kornkomponenten unter $20\ \mu\text{m}$ können der Bindemittelfraktion zugerechnet werden (Bild 2.39). Die eigentlichen bindenden Komponenten im Lehm sind Tonminerale, wie Montmorillonit, Illit und Kaolinit, aber auch Eisenhydroxide und Eisenoxide [2.20]. Lehm kann organische Bestandteile in Form von Pflanzenresten (Wurzelreste, Fasern) und Huminsäure aufweisen. Lehmsteine sind poröse Baumaterialien. Porosität ist in Form von Kornzwickel, Luftporen und Kapillarporen vorhanden (Bild 2.39).

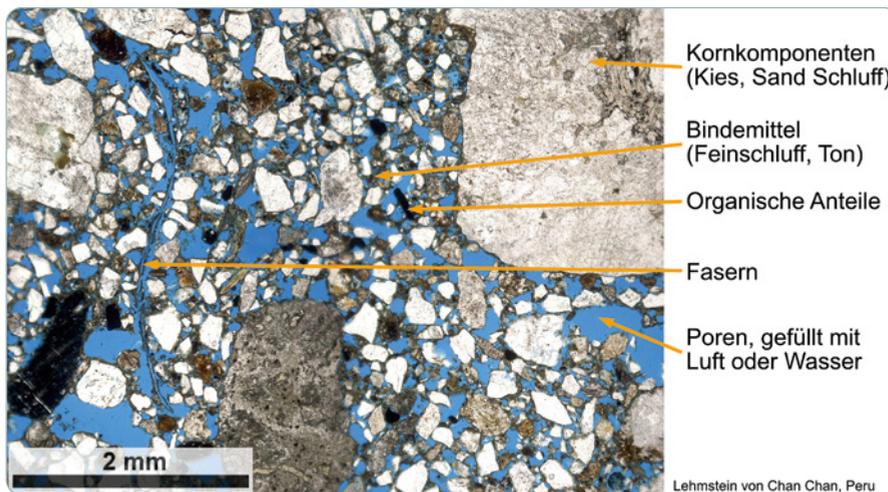


Bild 2.39 Mikroskopische Aufnahme eines Lehmsteins (Dünnschliffbild, Porenraum blau eingefärbt).

Architektur mit Lehmsteinmauerwerk findet sich in Nord- und Südamerika, in Nordafrika, dem mittleren Osten und in Teilen Asiens [2.23]. Auch in Europa wurden Lehmsteine bis ins 20. Jahrhundert verwendet, z. B. in Form von Gewerbegebäuden in Südosteuropa. Viele Kolonialstädte in Südamerika wurden teilweise oder komplett mit Lehmsteinen errichtet (Bild 2.40). Die Tradition des Lehmsteinmauerwerks existierte schon in Südamerika, bevor die Spanier den Kontinent erreichten (Bild 2.40) [2.24] [2.25]. Diese brachten jedoch ihre eigene Tradition

mit, die wiederum über Nordafrika aus dem mittleren Osten in Südwesteuropa eingeführt wurde.



Bild 2.40 Beispiel für Lehmsteinarchitektur der klassischen Maya in El Salvador (links). Eine historische Stadt aus der Kolonialzeit mit überwiegend Lehmsteinbauwerken (Putendo, Chile; rechtes Bild).

2.3.2 Herstellung

Die traditionelle Herstellung von Lehmsteinen, im englischsprachigen Raum oftmals Adobe genannt, besteht aus den folgenden Schritten [2.25] [2.26]:

- › Abbau von Lehm in einer Grube,
- › Aussortieren von größeren Kornbestandteilen und organischem Material,
- › Mischen des Lehms mit Wasser und Mauken (einweichen des Lehms mit gelegentlichem Umschichten),
- › u. U. Einmischen zusätzlicher Bestandteile, z. B. Fasern, Sand, und erneutes Umschichten,
- › Formen des Lehms in Model,
- › Trocknen der Steine im Schatten,
- › Lagern bis zur Endfeuchte, Transport, Anwendung.

Einige der Schritte sind in Bild 2.41 wiedergegeben. In vielen Regionen der Erde werden **Voll-Lehmsteine** manuell in relativ großen Volumina nach diesem Verfahren hergestellt. Wichtig ist, dass der Lehm bei der Herstellung eine plastische Konsistenz aufweist, da er dadurch sehr leicht durch Einwerfen in eine Form geformt werden kann. Der Wassergehalt ist, je nach Tongehalt, zwischen der Plastizitäts- und Fließgrenze (zwischen 15 und 25 %).

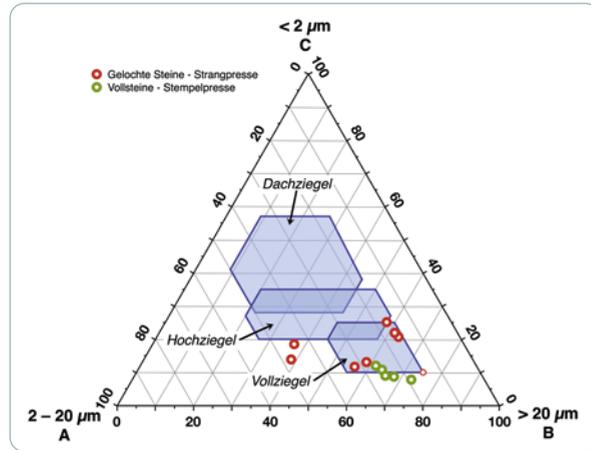
Dieses Herstellungsverfahren ist für industrielle Produktion weniger geeignet. Hersteller sind deshalb dazu übergegangen, die plastische Lehmmasse maschinell in Formen abzufüllen und zu pressen (Stempelpresse). Das Pressen erzielt hierbei keine Verdichtung der Steine, sondern ist vielmehr nur zur Formgebung gedacht, um den Lehm in alle Ecken und Kanten zu verteilen. Durch dieses Verfahren können Lehmvollsteine in großen Mengen automatisiert hergestellt werden.



Bild 2.41 Traditionelle Herstellung von Lehmsteinen in einem kleinen Betrieb in Chile: Mauken (links oben), Formen (rechts oben) und Trocknen (links).

Gelochte Steine werden hingegen überwiegend durch Strangpressen geformt. Einige Hersteller von Mauerziegel bieten Grünlinge aus der Ziegelproduktion als Lehmsteine an. Lehmsteine, die durch Strangpressen hergestellt wurden, haben einen höheren Anteil an feinen Kornfraktionen, da das Strangpressverfahren einen Lehm mit höherer Plastizität und weniger Grobbestandteilen verlangt. Bild 2.42 zeigt einige Korngrößenbereiche von Lehmsteinen, die durch Strangpressen und durch Stempelpressen hergestellt wurden. In Formen gepresste oder geworfene Lehmsteine können etwas gröbere Kornzusammensetzungen aufweisen.

Bild 2.42 Kornzusammensetzung von Lehmsteinen, die mit dem Strangpressverfahren hergestellt wurden (rote Symbole) und Steinen, die durch Pressen von Lehm in eine Form geformt wurde (grüne Symbole).



Ein weiteres Verfahren, auf das hier nicht im Detail eingegangen werden soll, ist die Steinkompaktierung. Bei diesem Verfahren wird erdfeuchter Lehm mit zusätzlichem Bindemittel (meist Zement) in Formen gefüllt und gepresst. Anders als bei plastischem Lehm, führt das Pressen von erdfeuchtem Lehm zu einer starken Kompaktierung der Steine, da der Lehm einen weit geringeren Wassergehalt aufweist. Kompaktierte Lehmsteine werden als Compressed Earth Blocks (CEB) bezeichnet. CEB haben weitaus kürzere Trocknungszeiten als traditionell hergestellte Lehmsteine und können quasi in kürzester Zeit verwendet werden, wohingegen die Trocknungszeiten traditionell hergestellter Lehmsteine von einigen Stunden in Trocknungskammern zu mehr als einer Woche bei Lufttrocknung dauern. CEB werden häufig zur Reparatur historischer Lehmsteinbauwerke oder für Neubauten im afrikanischen bzw. amerikanischen Raum verwendet. In Deutschland spielen sie bisher eine nur untergeordnete Rolle.

2.3.3 Eigenschaften

Formate

Lehmsteinformate unterscheiden sich je nach Region ihrer Herstellung. Historisch beruhen unterschiedliche Formate auf den lokal verwendeten Maßeinheiten. Es wurden z. B. Steinformate verwendet, die auf der Maßeinheit Fuß beruhen: 66 cm × 50 cm × 16 cm (2' × 1'6,7" × 6,3") bzw. 33 cm × 50 cm × 16 cm (1' × 1'6,7" × 6,3").

Formate von in Deutschland produzierten modernen Lehmsteinen unterliegen der DIN 18945 [2.27]. Diese orientiert sich bezüglich der Größe an den Formaten von Mauerziegeln (Tabelle 2.3, Bild 2.43).

Format-Kurzzeichen	Nennmaße in mm			Format-Kurzzeichen	Nennmaße in mm		
	l	b	h		l	b	h
IDF (Dünnformat)	240	115	52	5DF	240	300	113
NF (Normalformat)	240	115	71	6DF	240	365	113
2DF	240	115	113	8DF	240	240	238
3DF	240	175	113	10DF	240	300	238
4DF	240	240	113	12DF	240	365	238

Tabelle 2.3 Maße moderner Lehmsteine nach DIN 18945 [2.27].

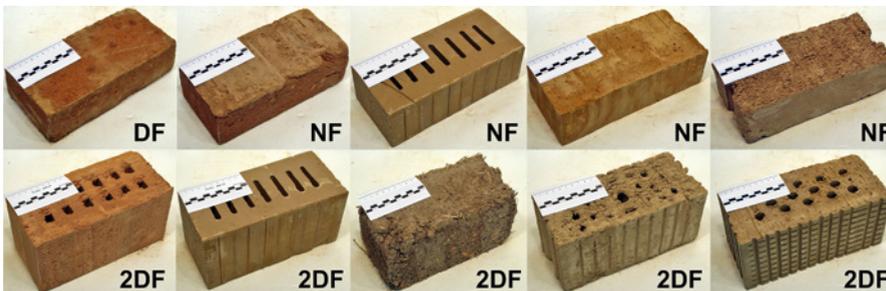


Bild 2.43 Verschiedene moderne Lehmsteine und Lehmsteinformate.

Mechanische und Schwindeigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften von Lehmsteinen hängen von vielen Faktoren ab. Die Materialfeuchte ist hierbei ein ausschlaggebender Faktor. Lehmprodukte sind am stärksten von allen porösen Baustoffen in ihren Eigenschaften vom Feuchtezustand beeinflusst. Für die Festigkeit gilt: je höher die Materialfeuchte, desto geringer die Druckfestigkeit [2.28]. Hierbei können schon Unterschiede in der relativen Luftfeuchte eine wichtige Rolle spielen. Bild 2.44 zeigt ein Beispiel von drei Lehmsteinen, die bei fünf verschiedenen relativen Luftfeuchten bis zum Gleichgewicht gelagert wurden. Anschließend wurden Druckversuche durchgeführt und die Ergebnisse über die korrespondierende Luftfeuchte der Lagerungsatmosphäre und der absoluten Materialfeuchte aufgetragen. Die Ergebnisse zeigen, dass unterschiedliche Steine unterschiedlich stark auf die relative Luftfeuchte/Materialfeuchte reagieren [2.28]. Stein 2 zeigte einen Verlust an Druckfestigkeit von 65 % bei Lagerung in 23 % relativer Luftfeuchte im Vergleich zur Lagerung bei 97 % r. L. (Bild 2.44).

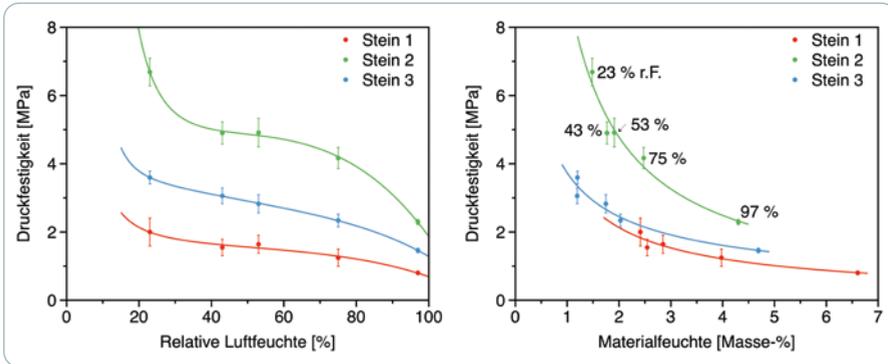


Bild 2.44 Druckfestigkeit von drei verschiedenen Lehmsteinarten in Abhängigkeit von der relativen Lagerungsfeuchte (links) und der korrespondierenden Materialfeuchte (rechts, nach [2.28]).

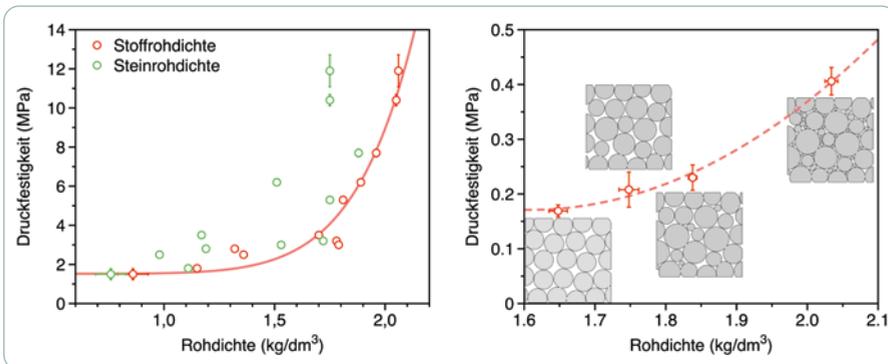


Bild 2.45 Abhängigkeit der Druckfestigkeiten verschiedener Lehmsteine von der Rohdichte (links) und der Packungsdichte von vier verschiedenen künstlichen Lehmen (rechts).

Die Rohdichte hat einen entscheidenden Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften von Lehmsteinen. Analog zu Mauerziegel existieren bei Lehmsteinen zwei verschiedene Rohdichten: Steinrohddichte (beinhaltet die Löcher) und die Stoffrohddichte (nur die Dichte des Materials). Bild 2.45 links stellt die Stein- und Stoffrohddichten verschiedener Lehmsteine und deren Druckfestigkeiten gegenüber. Deutlich ist zu sehen, dass die Steinrohddichten einen geringeren Einfluss auf die Druckfestigkeiten haben als die Stoffrohddichten [2.28]. Stoffrohddichten korrespondieren viel besser mit Druckfestigkeiten als Steinrohddichten (Bild 2.46).

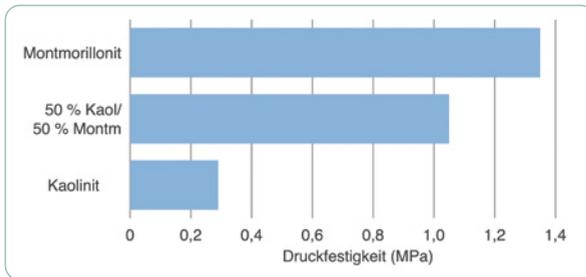


Bild 2.46 Bindemittelzusammensetzung und Druckfestigkeiten von drei verschiedenen künstlichen Lehmen (nach [2.29]).

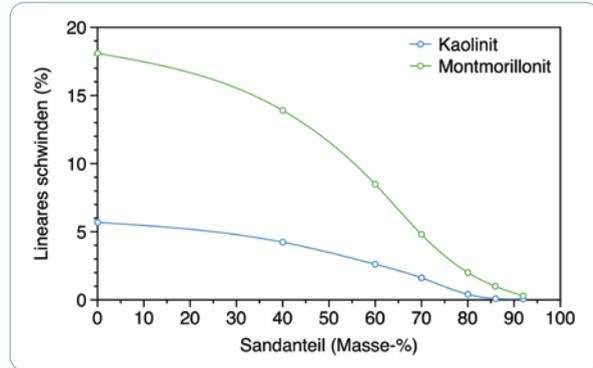
Bei granularen Materialien ist die Stoffrohichte oftmals mit der Packungsdichte verknüpft. Dieser Sachverhalt ist in Bild 2.45 rechts dargestellt. Die Daten stammen von künstlichen Lehmmischungen bei denen der Sand entsprechend mit verschiedenen Kornfraktionen gemischt wurde, um unterschiedliche Packungsdichten zu erzeugen. Der erste Wert mit einer Dichte von $1,65 \text{ kg/dm}^3$ stammt von einem Lehm, der mit ungefähr gleich großen Sandkörnern hergestellt wurde. Bei dem künstlichen Lehm mit einer Rohdichte von $2,05 \text{ kg/dm}^3$ wurde die Sandfraktion mit Körnern unterschiedlicher Größe ersetzt. Im ersten Fall ergab sich eine geringe Packungsdichte mit einer entsprechend geringeren Rohdichte und Druckfestigkeit. Im letzteren Fall ergab sich eine hohe Packungsdichte mit entsprechend höherer Dichte und Druckfestigkeit.

Neben der Rohdichte hat auch die Bindemittel-(Tonmineral-)zusammensetzung einen wichtigen Einfluss auf die Lehmsteinfestigkeit. Bild 2.46 zeigt die Druckfestigkeit von drei künstlichen Lehmen, welche die gleiche Zusammensetzung von Sand und Ton aufweisen und sich lediglich von der Art der Tonminerale unterscheiden. Es zeigt sich, dass Lehme mit Montmorillonit höhere Festigkeiten aufweisen als Lehme mit Kaolinit [2.29]. Eine Mischung von 50/50 Kaolinit/Montmorillonit ergibt eine deutlich höhere Festigkeit als ein Lehm mit nur Kaolinit. Montmorillonit ist ein quellfähiges Dreischichtsilikat und weist im Vergleich zum Kaolinit (nur begrenzt quellfähiges Zweischichtsilikat) eine deutlich geringere Partikelgröße auf. Dadurch ergeben sich größere Bindekräfte, die allerdings auch wiederum stärker vom Feuchtegehalt abhängen.

Im Zusammenhang mit Baustoffen, die Tonminerale enthalten, sind Schwindenschaften wichtig. Das trifft auf Lehmabstoffe, als auch auf Ziegelgrünlinge zu. Je größer der Tongehalt, desto größer das Schwindvermögen. Aber auch die Art der Tonminerale spielen eine wichtige Rolle. Quellfähige Dreischichtsilikate wie z. B. Montmorillonit zeigen ein wesentlich höheres Schwindvermögen als z. B. das Zweischichtsilikat Kaolinit [2.29]. Bild 2.47 zeigt Ergebnisse des linearen Schwindens von künstlichen Lehmen mit verschiedenen Ton-/Sand-Mengen und mit den zwei verschiedenen Tonmineralen Kaolinit und Montmorillonit. Das Schwindmaß des Montmorillonit ist ca. dreimal höher als das von Kaolinit.

Quellfähige Dreischichtsilikate wie Montmorillonit sind zwar gut für die Festigkeitseigenschaften, tragen aber auch wesentlich zu den Schwindeigenschaften bei. Natürliche Lehme sind fast immer aus mehr als nur einem Tonmineral zusammengesetzt. In Deutschland treten häufig als Hauptbestandteile die Tonminerale Kaolinit, Illit und Montmorillonit/Smektit in verschiedenen Mengenverhältnissen auf.

Bild 2.47 Bindemittelzusammensetzung, Sandgehalt und Schwinden von verschiedenen künstlichen Lehmen (nach [2.30]).



Zusammensetzung und Beständigkeit

Die mögliche Zusammensetzung von natürlichen Lehmen ist in Tabelle 2.4 wiedergegeben. Je nach Lagerstätte wechseln die Bestandteile in ihrer Art und Menge. Zur Herstellung von Lehmbauprodukten sind bestimmte Bestandteile weniger geeignet, wie etwa Salze oder Sulfate in Form von Natriumchlorid oder Gips und Anhydrit [2.26]. Treten diese Stoffe in einem Lehm in zu großer Konzentration auf, wird er in der Praxis häufig mit einem Lehm einer anderen Lagerstätte gemischt, der diese Bestandteile nicht aufweist.

Kritisch für die Beständigkeit von Lehmsteinen ist das Verhältnis von Sand, Schluff und Ton sowie die Zusammensetzung der Tonfraktion. Bei Steinen mit einem hohen Anteil Ton aus quellfähigen Dreischichtsilikaten ist ein großes Schwind- und Quellmaß zu erwarten. Lehmsteine sind besonders empfindlich gegenüber flüssigem Wasser. Durch kapillare Absorption nehmen sie Wasser auf und geben es durch Trocknung wieder ab. Die dabei auftretenden Quell- und Schwindverformungen können bei hohen Anteilen quellfähiger Tonminerale bleibend sein und zu Rissen im Steingefüge führen. Zu geringe Tonanteile oder Tone mit nur wenig quellfähigen Tonmineralen können in Kontakt mit Wasser zum Absanden neigen (Bild 2.48). Um einen erhöhten Widerstand gegenüber Wasser zu haben, ist deshalb eine gute Abstimmung der Korngrößen- und der Tonmineralzusammensetzung notwendig. Zur Mischungsoptimierung werden deshalb je nach Bedarf körnige Bestandteile und natürliche Fasern zugemischt [2.27].

Fraktion	Bestandteile
Schluff bis Kies >0,002 mm	Klastische Komponenten: Quarz, Feldspat, Gesteinsbruchstücke, Glimmer, Carbonat, Bims, Keramik
	Fällungsminerale: Gips, Carbonat, Salze, Eisenoxid/-hydroxid
Ton <0,002 mm	Tonminerale, z. B.: nicht quellfähige: Kaolinit, Illit, Chlorit quellfähige: Smektit (Montmorillonit), Halloysit, Wechselagerungsminerale
	Oxide, z. B.: Hämatit (Fe_2O_3), Goethit (FeOOH), Magnetit/Maghemit (Fe_3O_4), Manganit (MnO_2)
	Fällungsminerale: Gips und Anhydrit, Calcit/Aragonit, Salze (Halit, Sylvit, ...)

Tabelle 2.4 Zusammensetzung natürlicher Lehme



Bild 2.48 Verhalten von verschiedenen Lehmsteinen in Kontakt mit Wasser (Tauchprüfung in Wasser für fünf Minuten): bleibende Quellverformung (linker Stein), Absanden (Mitte), keine Schäden (rechts).

2.3.4 Regelwerke

Für die Qualitätsfestlegung von Lehmsteinen ist die Norm DIN 18945 [2.27] maßgebend. Die Norm legt Anforderungen für Lehmsteine fest, die für tragendes und nichttragendes Lehmsteinmauerwerk verwendet werden. In der Norm sind neben den Anforderungen auch Prüfverfahren angegeben. Regeln zur Anwendung von Lehmsteinen finden sich in der Literatur. Wesentlich für die Anforderungen von Lehmsteinen ist deren Anwendung bzw. deren Anwendungsumgebung. Lehmsteine werden deshalb nach DIN 18945 in Anwendungsklassen eingeteilt (Tabelle 2.5). Die Anwendung beschränkt sich auf die Ausfachung von Fachwerkständerbauwerken, Außen-, Innenmauerwerk sowie die trockene Anwendung. Verputzte Ausmauerungen von Sichtfachwerk wurden als der schwierigste Fall

angenommen, da hier im Kontakt zum Holzfachwerk häufig Schwind- und Bewegungsfugen auftreten, über die Feuchtigkeit in Form von Schlagregen eindringen kann. Die in DIN 18945 aufgeführten Prüfmethode bestehen in der Bestimmung der Steinmaße, der Dichten, Druckfestigkeit/E-Modul, des Verhaltens gegenüber Wasser und der Frostbeständigkeit. Weitere Details finden sich in der Norm.

Anwendungsbereich	Anwendungs- klasse (AK)
verputztes, der Witterung ausgesetztes Außenmauerwerk von Sichtfachwerkwänden*	I a
durchgängig verputztes, der Witterung ausgesetztes Außenmauerwerk*	I b
verkleidetes oder witterungsgeschütztes Außenmauerwerk, Innenmauerwerk	II
trockene Anwendungen (z. B. Deckenfüllungen, Stapelwände)	III
* Beanspruchungsgruppe I nach DIN 4108-3 bzw. nach sorgfältiger Prüfung der örtlichen Schlagregenexposition	

Tabelle 2.5 Anwendungsklassen von Lehmsteinen nach DIN 18945 [2.27].

2.4 Kalksandsteine und Porenbeton

Kalksandsteine sind künstliche Steine, die in den 1920er-Jahren entwickelt und seither im Mauerwerksbau eingesetzt wurden. Sie können wie Mauerziegel verarbeitet werden. Kalksandsteine bestehen aus quarzitischer Gesteinskörnung mit C-S-H-Phasen als Bindemittel und werden in Rohdichteklassen von 1,2 bis 2,2 im Handel angeboten.

Poren- oder Gasbeton besteht aus derselben Grundmischung wie Kalksandstein. Das Kalk-Sand-Wasser-Gemisch ist lediglich mit feinem Aluminiumpulver als Treibmittel aufgeschäumt. Anschließend werden die Grünlinge wie Kalksandstein im Autoklaven dampfgehärtet. Der Handelsname der Firma Xella für Porenbetonsteine, Ytong, stammt aus dem schwedischen »Yxhults Anghärdade Gasbetong«. Hier fand 1929 die erste Produktion des Materials statt und die Bezeichnung Ytong wurde der erste registrierte Handelsname für ein Bauprodukt.

2.4.1 Herstellung

Die Herstellung von Kalksandsteinen erfolgt in einer ersten Stufe durch Mischen von Branntkalk und Sand unter Zugabe von Wasser (Bild 2.49). Das Mischungsverhältnis von Kalk zu Sand ist hierbei 1 : 12. Anschließend wird das Gemisch

in Reaktoren gelagert, wobei der Branntkalk (CaO) unter Wärmeentwicklung zu Portlandit bzw. Kalkhydrat (Ca(OH)_2) ablöscht. Im Nachmischer wird das Sand-Kalk-Gemisch nochmal gründlich durchgemischt und mit etwas Wasser auf die endgültige Pressfeuchte gebracht. Die Feuchte wird hierbei so eingestellt, dass eine Verdichtung des Gemisches erreicht werden kann. Danach wird das Gemisch in vollautomatischen Pressen zu Steinrohlingen geformt. Das Aushärten der Steine wird in Dampf-Härtekesseln (Autoklaven) bei ca. $200\text{ }^\circ\text{C}$ unter Wasserdampf-sättigungsdruck (ca. 14 bar) zwischen vier und acht Stunden durchgeführt. Nach dem Abkühlen können die Kalksandsteine ohne werksseitige Nachlagerung gebrauchsfertig eingesetzt werden [2.31].

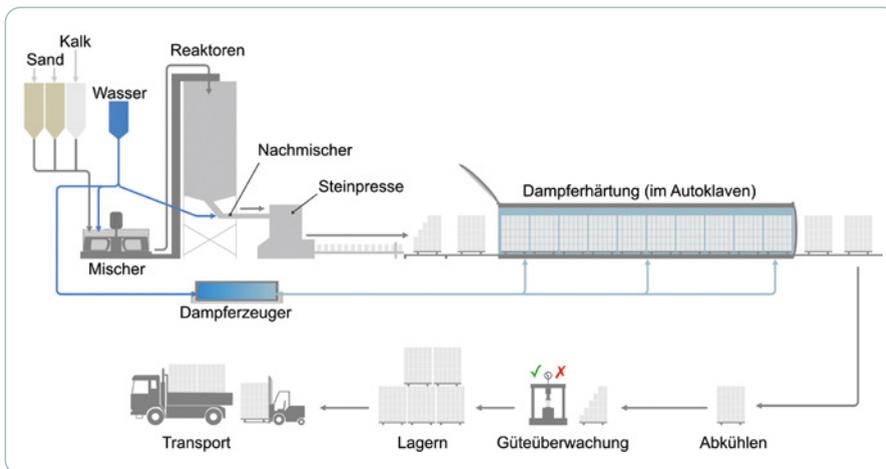
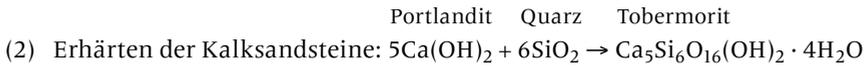


Bild 2.49 Herstellung von Kalksandsteinen (nach [2.31]).

Porenbeton wird aus den gleichen Ausgangsstoffen hergestellt (wobei zusätzlich häufig noch etwas Portlandzement zugemischt wird). Beim Mischen von Sand und Kalk wird jedoch ein feines Aluminiumpulver untergemischt. Nach dem Mischen wird das Rohgemisch in Gießformen eingefüllt. Durch das Löschen des Kalks entsteht ein stark alkalisches Milieu. In diesem reagiert das Aluminiumpulver unter Abgabe von Wasserstoff zu Aluminiumionen. Der Wasserstoff bläht die Rohmischung in Form von fein verteilten Gasbläschen auf. Je nach Menge an Aluminiumpulver ergibt sich für das Rohgemisch eine unterschiedliche Rohdichte, da sich mit mehr Aluminiumpulver mehr Gasbläschen bilden und das Material entsprechend weniger dicht ist und mit weniger Aluminiumpulver sich entsprechend weniger Bläschen bilden. Nach dem Auftreiben und dem anfänglichen Erstarren wird die Gießform entfernt und die Rohblöcke mit Stahldrähten präzise auf die jeweiligen Blockmaße geschnitten. Anschließend erfolgt das Här-

ten der Rohblöcke wie bei Kalksandsteinen im Autoklaven bei 180–200 °C und 12–14 bar Wasserdampfsättigungsdruck.

Beim Löschen des Branntkalks und Erhärten des Kalksandsteins finden folgende Reaktionen statt [2.32]:



Neben Tobermorit entstehen in geringeren Mengen noch weitere Calciumsilikat-Hydratphasen. Tobermorit ist jedoch die Hauptphase, die entsprechend zur Festigkeit der Steine beiträgt. Da Quarz im Vergleich zum Branntkalk/Kalkhydrat in vergleichsweise großen Körnern vorliegt, spielen sich die obigen Reaktionen nur am Randbereich der Quarzkörner ab. Bild 2.50 gibt die morphologischen Änderungen in der Mikrostruktur von Kalksandsteinen während der einzelnen technischen Prozesse wieder. Beim Löschen des Branntkalks wird das Quarz-Kalkgemisch durch die Reaktion mit Wasser im Volumen vergrößert. Beim Erhärten unter Wasserdampfsättigungsdruck bei ca. 200 °C kommt es zur Bildung von Tobermorit im Randbereich der Quarzkörner. Tobermorit entsteht hierbei in massiger Form im Kontakt zu den Quarzkörnern und in Form nadeliger Kristalle, die in die Kornzwickel hineinwachsen.

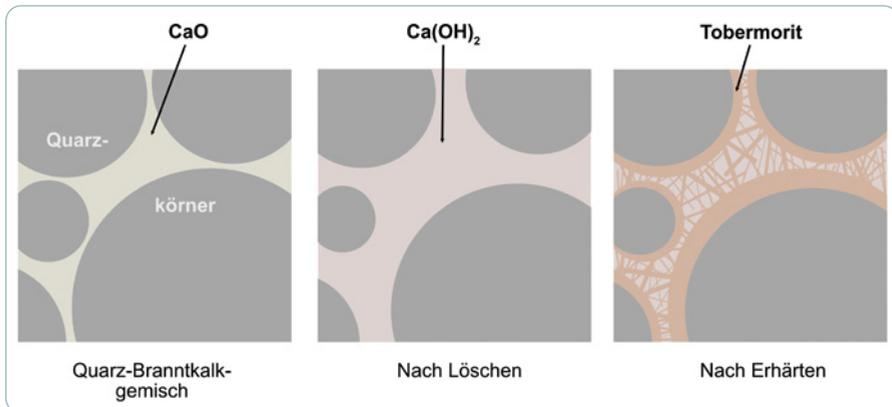


Bild 2.50 Morphologische Änderungen in der Mikrostruktur von Kalksandsteinen beim Löschen und Erhärten.

2.4.2 Eigenschaften

Kalksandsteine werden als Vollsteine, Lochsteine und Steine mit Nut-Feder-System angeboten [2.31]. Daneben gibt es Bauplatten auf Kalksandsteinbasis. Die Formate von Kalksandsteinen und Mauerziegeln sind ähnlich bis identisch. Es werden Steine im Normalformat (NF) und Vielfachen des Dünformats (DF) hergestellt. Übliche mittlere Steindruckfestigkeiten liegen zwischen 12,5 und 35 MPa (Druckfestigkeitsklassen 10 bis 28). Die üblichen Steinrohdichten liegen zwischen 1,01 und 2,20 kg/dm³ (Rohdichteklasse 1,2 bis 2,2). Die wichtigsten Steineigenschaften sind in der deutschen Restnorm DIN V 106 festgelegt. Weitere Festlegungen finden sich in der DIN EN 771-2 [2.34].

Porenbeton wird in Rohdichten von 300 bis 1 000 kg/m³ hergestellt. Typische Steindruckfestigkeiten liegen bei 2,5 bis 10 MPa. Mauerwerk mit Porenbetonsteinen kann nach entsprechender Bemessung tragend eingesetzt werden. Durch die geringere Dichte erreicht Porenbeton gute Wärmedämmeigenschaften und normgerechten Schallschutz. Da es sich bei Porenbeton um ein mineralisches Bauprodukt handelt, wird es gemäß DIN 4102-4 der höchsten Baustoffklasse A1 »nicht brennbar« zugeordnet. Neben Steinen werden Platten und (Fenster-/Tür-) Stürze geformt. Die maßgebenden Normen für Porenbeton sind DIN EN 771-4 [2.35] sowie DIN 20000-404 [2.36].

Porenbeton besitzt meist eine weiße bis sehr hellgraue Farbe. Bei gräulich oder blaugrünlich gefärbten Porenbeton kann es sich um skandinavisches Material handeln, das aus einem Sand sowie aus einem gebrannten Kalk und Schiefer als Bindemittel hergestellt wurde. Das ursprünglich in Südschweden entwickelte Herstellungsverfahren für Porenbeton verwendete ein gebranntes Schiefer-Kalk-Gemisch. Porenbeton dieser Farbe wird in Schweden als »blåbetong« (blauer Beton) bezeichnet und ist seit den 1970er-Jahren verboten. Der Grund ist der hohe Gehalt an Uran im aus Südschweden stammenden Schieferanteil des Porenbetons. Über einen längeren Zeitraum bildet sich dabei Radongas, das durch seine radioaktive Strahlung bleibende Gesundheitsschäden auslösen kann [2.37]. »Weißer« Porenbeton aus moderner Herstellung enthält jedoch keine Schieferbestandteile und ist gesundheitlich absolut unbedenklich.

3 BINDEMITTEL UND MÖRTEL

3.1 Übersicht über Bindemittel im Mauerwerksbau

Bindemittel werden im Mauerwerksbau zur Mauer-, Fugen- und Putzmörtelherstellung verwendet. Moderne Fußbodenestriche sind heute meist zementhaltige Produkte, konnten in der Vergangenheit aber aus Kalk, Gips/Anhydrit oder Lehm bestehen. Bei den heute am meisten eingesetzten Bindemitteln handelt es sich um Brandprodukte: Zement, Kalk, Gips. Daneben werden in geringerem Maße Lehmbindemittel und Produkte auf Wasserglasbasis angewendet. Wasserglas als Bindemittel wird nicht in diesem Abschnitt besprochen, sondern in Kapitel 4 unter Silikatfarben. Wasserglas als Bindemittel kommt außer in Silikatfarben auch in Silikatputzen vor. Eine Übersicht verschiedener Bindemittel zeigt Bild 3.1.

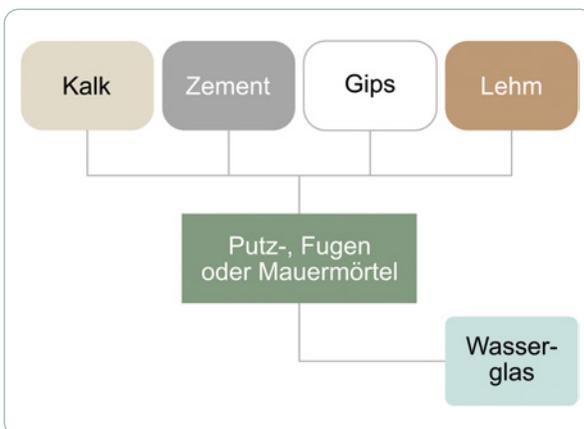


Bild 3.1 Verschiedene Bindemittel, die für Mörtel eingesetzt werden.

Die drei Bindemittel Zement, Kalk und Gips werden durch thermische Aktivierung bei verschiedenen Temperaturen gewonnen. Zement bei ca. 1500 °C, Kalk bei bis zu 1100 °C und Gips bei ca. 130° bis 800 °C, davon abhängig ob Stuckgips, Mehrphasengips oder Anhydrid hergestellt werden soll. Die Brennprozesse sind heute hochoptimierte technische Abläufe, um möglichst wenig Energie zu verbrauchen und auf rationelle Weise qualitätskonstante Bindemittel herzustellen. Dadurch werden letztendlich bezahlbare und technisch ausgereifte Bauprodukte gewährleistet. Bild 3.2 fasst die Herstellungsprozesse von Zement, Kalk und Gips zusammen. Das Bild zeigt, dass die Begriffe Zement, Kalk und Gips eine Vielzahl verschiedener Produkte beinhalten.

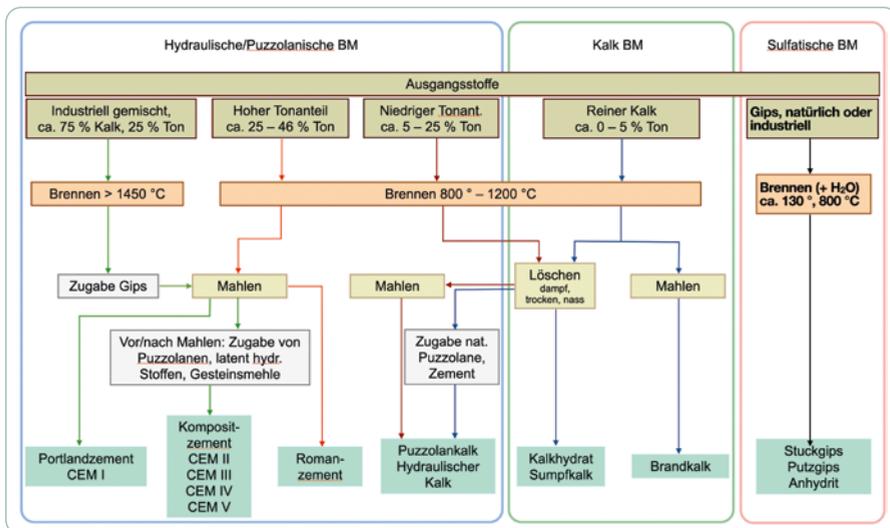


Bild 3.2 Unterschiedliche Bindemittelgruppen, die durch Brennen hergestellt werden sowie ihre Ausgangsstoffe.

3.2 Kalkbasierte Bindemittel und Mörtel

Kalk ist ein sehr altes Bindemittel und wird schon seit Jahrtausenden sowohl für Mauerbinder als auch für Putzmörtel verwendet. Außer in Mörteln wird Kalk auch als Farbe eingesetzt. Kalkfarbe verbindet sich sehr gut mit Kalkputzen, insbesondere wenn die Anwendung nass-in-nass (frische Kalkfarbe auf den noch feuchten Putz) erfolgt.

Kalkbindemittel werden entsprechend ihrer Erhärtung eingeteilt. Reine Luftkalk er härten durch Carbonatisierung. Weiterhin gibt es Kalkbindemittel, die neben der Carbonatisierung über die Bildung von Hydratphasen er härten [3.1]. Letztere

entstehen durch die Reaktion des Kalks mit puzzolanischen Zugabestoffen oder durch hydraulische Anteile (Klinkerphasen).

3.2.1 Einteilung von Kalkbindemittel nach DIN EN 459-1

Kalkgebundene Bindemittel werden nach DIN EN 459-1 [3.2] unterschieden in Weißkalk, Dolomitkalk, hydraulische Kalke, natürliche hydraulische Kalke und formulierte Kalke. Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über die in der Norm definierten Kalkbindemittel.

Typ	Bezeichnung	Erläuterung
Weißkalk	CL 70	CaO + MgO-Gehalt ≥ 70 M-%, MgO ≤ 5 M-%
	CL 80	CaO + MgO-Gehalt ≥ 80 M-%, MgO ≤ 5 M-%
	CL 90	CaO + MgO-Gehalt ≥ 90 M-%, MgO ≤ 5 M-%
Dolomitkalk	DL 80	CaO + MgO-Gehalt ≥ 80 M-%, MgO > 5 M-%
	DL 85	CaO + MgO-Gehalt ≥ 85 M-%, MgO > 30 M-%
Hydraulische Kalke ¹	HL 2	Druckfestigkeit 2–7 MPa nach 28 d
	HL 3,5	3,5–10 MPa
	HL 5	5–15 MPa
Natürliche hydraulische Kalke ²	NHL 2	Druckfestigkeit 2–7 MPa nach 28 d
	NHL 3,5	3,5–10 MPa
	NHL 5	5–15 MPa
Formulierte Kalke ³	FL A/B/C 2	Druckfestigkeit 2–7 MPa nach 28 d
	FL A/B/C 3,5	3,5–10 MPa
	FL A/B/C 5	5–15 MPa

1 Zusatz von Hydraulefaktoren: Puzzolane oder Portlandzement
 2 ohne zusätzliche Hydraulefaktoren
 3 Ausgangsstoff natürliche hydraulische Kalke oder Calciumhydroxid mit zusätzlichen Hydraulefaktoren (Puzzolane, Portlandzement); Zusammensetzung muss deklariert werden.

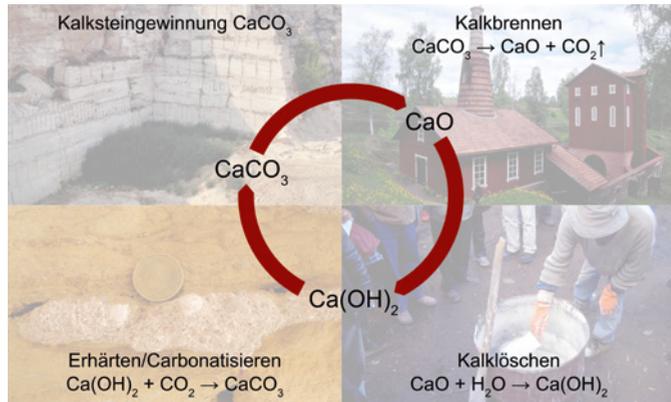
Tabelle 3.1 Einteilung von Kalkbindemittel nach DIN EN 459-1 [3.2].

3.2.2 Kalkkreislauf – Luftkalk

Luftkalk ist ein sehr nachhaltiges Bauprodukt, da ein Luftkalkmörtel beim Erhärten die gleiche Menge an Kohlendioxid bindet, die bei der Herstellung des Bindemittels, beim Brennen des Kalksteins, frei wird. Dieser Prozess vom Bren-

nen bis zur Erhärtung kann als Kalkkreislauf dargestellt werden [3.3]. Bild 3.3 verdeutlicht die wesentlichen Etappen dieses Vorgangs der Umwandlung vom Ausgangsmaterials Kalkstein zum erhärteten Bindemittel anhand der einfachen chemischen Reaktionen, die dabei stattfinden [3.4]. Stofflich stellt das Ausgangsmaterial dasselbe dar wie das erhärtete Endprodukt: Calciumcarbonat CaCO_3 .

Bild 3.3 Der Kalkkreislauf.



3.2.3 Herstellung von Kalkbindemittel und Mörtel

Der Rohstoff für die Herstellung von Kalkbindemitteln ist Kalkstein (Bild 3.3). Kalkstein kann natürliche Beimengungen von Tonmineralen haben (bei Tonanteilen über 5 % wird von Mergel gesprochen). Die Tone können beim Brennen des Kalks mit dem Calciumoxid reagieren und Klinkerphasen bilden, die dem Kalkbindemittel hydraulische Eigenschaften verleihen [3.4]. In küstennahen Gebieten mit einem Mangel an Kalksteinlagerstätten wurde Kalk früher relativ häufig aus Muschel- und Molluskenschalen gebrannt. Dieser Typ des Kalkbindemittels weist eine sehr charakteristische Mikrostruktur auf, da einige der Schalenreste den Brennvorgang relativ gut überstanden haben [3.5].

Kalke wurden traditionell in Feldbrandöfen und später in Schachtofen gebrannt (Bild 3.4) [3.6]. Im Schachtofen wurde zuerst ein Gewölbe aus Kalksteinblöcken aufgemauert. Anschließend wurde zerkleinerter Kalkstein, gemischt mit Brennstoff (Holzkohle, Kohle oder Koks) oder lageweise mit diesem, auf das Gewölbe aufgeschichtet. Der Brennvorgang wurde durch ein Feuer im Gewölberaum des Ofens angefacht. Der mit dem Kalkstein gemischte Brennstoff brannte dabei nach und nach ab und »calcinierte« den Kalk, was eine Umwandlung des Calciumcarbonats in Calciumoxid beschreibt. Der Brennprozess dauerte mehrere Tage und erfolgte nicht kontinuierlich. Nach dem mehrtägigen Brennen wurde das Gewölbe durch Anstechen zum Einsturz gebracht und der Branntkalk aus dem Ofen entnommen.

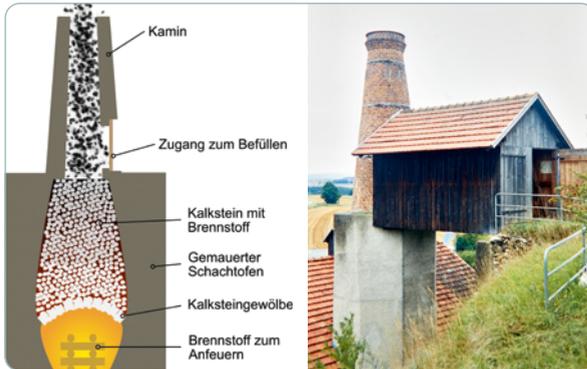


Bild 3.4 Schematischer Schnitt durch einen Schachtofen (links). Historischer Schachtofen in Untermarchtal, Schwäbische Alb (rechts).

Einen großen technischen Fortschritt erbrachten zu Beginn des 19. Jahrhunderts Mehrkammerschachtofen (Rumfordöfen) (Bild 3.5), [3.7]. Diese ermöglichten eine kontinuierliche Beschickung des Ofens mit Kalkstein und eine Trennung des Brennraums und Brennmaterials: Der Kalkstein wurde mit den heißen Brenngasen calciniert und kam nicht in direkten Kontakt mit dem Brenngut. Das ermöglichte eine erhöhte Produktion von qualitativ hochwertigem weißem Branntkalk. Branntkalk, der mit dem Brenngut gemischt war, besaß eine gräuliche Farbe aufgrund der Reste an Brenngut.

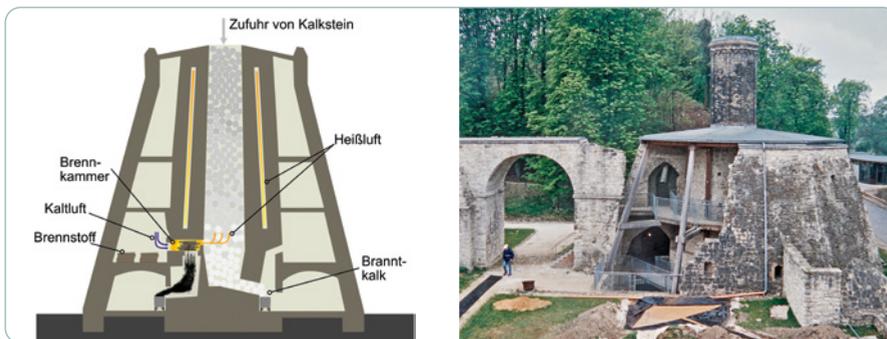
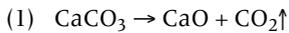


Bild 3.5 Schematischer Schnitt durch einen Rumfordofen. Historischer Rumfordofen in Rüdersdorf östlich von Berlin (rechts).

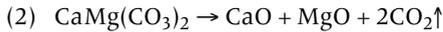
Heutzutage wird Kalk in Drehrohröfen, Mischfeueröfen oder modernen Schachtofen bei Temperaturen von 1 000° bis 1 500 °C kontinuierlich hergestellt. Drehrohröfen ermöglichen eine sehr große Produktionsmenge (bis 1 500 t/d). Moderne Schachtofen erlauben eine gezielte Steuerung der Brenntemperatur und nachhaltigere Nutzung der Brennenergie [3.8].

Kalkstein oder Dolomit calciniert oberhalb von ca. 800 °C (bzw. 650 °C bei Dolomit) zu Calciumoxid/Magnesiumoxid und Kohlendioxid nach folgenden Gleichungen:

Calcit

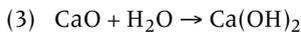


Dolomit



Branntkalk wurde normalerweise nicht direkt als Bindemittel verwendet, sondern vor der Anwendung gelöscht. Dies erfolgte durch vorsichtiges Mischen mit Wasser:

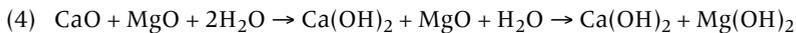
Portlandit



Portlandit

Portlandit

Brucit



Beim Nasslösen wird Wasser im Überschuss zugegeben. Dabei muss sehr vorsichtig vorgegangen werden, da beim Löschvorgang sehr große Wärmemengen freierwerden (Reaktion (1) ist stark exotherm). Die Wärmentwicklung kann so stark werden, dass das Zugabewasser zu kochen beginnt. Das Löschen von Branntkalk ist daher gefährlich und erfordert geschultes Personal und entsprechende Sicherheitsvorkehrungen. Die Reaktion von Magnesiumoxid zu -hydroxid in Gleichung (4) erfolgt in der Praxis sehr langsam. Die Reaktivität von Dolomitkalken nimmt mit Zunahme des MgO-Anteils ab, sie sind deshalb weniger reaktiv als reine Weißkalke (Tabelle 3.1).

Im Mittelalter entwickelte sich eine weitere Löschtechnik. Hier wurde Branntkalk mit feuchtem Sand in Mischtrögen zu Kalkmörteln gemischt. Die Feuchte reagierte mit dem Branntkalk unter Wärmeentwicklung und man sprach deshalb vom Mauern mit »heißer« Kelle.

Beim Trockenlösen wird dem gebrannten Kalk eine Menge an Wasser zugegeben, die gerade dazu ausreicht, das Calciumoxid nach Gleichung (3) in Calciumhydroxid zu überführen. Das Endprodukt ist ein verhältnismäßig trockenes Pulver von Calciumhydroxid, das als Weißkalkhydrat bezeichnet wird (Bild 3.6) [3.8]. Natürlich hydraulischer Kalk muss trocken gelöscht werden, da bei Wasserüberschuss das Dicalciumsilikat ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) verfrüht reagiert und dann unwirksam wird. Das Reagieren von Calciumaluminatphasen wird beim Trockenlösen allerdings nicht verhindert, da die Reaktion von z. B. Tricalciumaluminat ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) sehr schnell erfolgt.

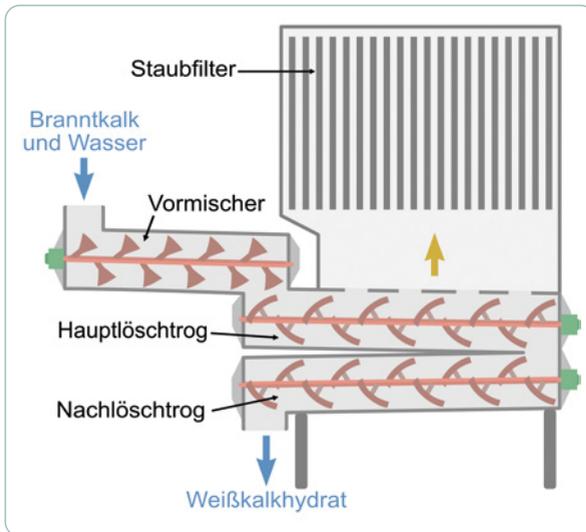


Bild 3.6 Moderne Kalklöschmaschine mit einem Durchsatz von ca. 60 t/Stunde (nach [3.8]).

Nassgelöschter Kalk kann zur Aufbewahrung eingesumpft werden. Vor dem Sumpfen muss der Kalkleim durch Sieben von gröberen Partikeln befreit werden (Bild 3.7). Beim Sumpfen wird der Kalkleim in Kalkgruben oder Plastik- bzw. Metallfässer gefüllt und mit einem Wasserüberstand unter Verschluss gelagert.



Bild 3.7 Sieben und Lagern von Kalkleim (Sumpfkalk). (Fotos: © Hartmut Pliett, Karlsruhe)

Während der Lagerung muss der Wasserüberstand ggf. erneuert werden. Die Lagerung kann über mehrere Jahre erfolgen. Durch die Lagerung verändert sich der Kalkleim [3.9] [3.10]:

- › Die $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Partikel verkleinern sich über einen längeren Zeitraum.
- › Die Partikel sinken in der Grube bzw. im Fass ab. Es entsteht eine dichtere Paste, der Wasser-Bindemittel-Wert wird gesenkt.

Beide Effekte verbessern die Eigenschaften des Frischmörtels, insbesondere dessen Verarbeitbarkeit.

Kalkmörtel können mit folgenden Kalkbindemittel hergestellt werden:

- › Sumpfkalk,
- › Weißkalkhydrat,
- › Branntkalk,
- › Hydraulischer/natürlich hydraulischer Kalk.

Diese Kalkbindemittel werden mit Sand (0–4 mm) gemischt. Historische Mischungsverhältnisse von Bindemittel zu Zuschlag (B/Z) waren meist bindemittelreich, oftmals 1 : 1 bis 1 : 3 in Volumenteilen [3.11]. Heutige Mischungsrezepte sind mit B/Z-Werten von 1 : 3 bis 1 : 4 etwas bindemittelärmer.

Bei Mörtel und Beton wird die Zugabemenge an Wasser über den W/Z- (Wasser/Zement) bzw. W/B-Wert (Wasser/Bindemittel) definiert. Ein W/Z-Wert von 0,6 bedeutet, dass in einem Zementmörtel 0,6 Masseile Wasser zu einem Teil Zement zugemischt werden. Bei einem Mörtel mit hydraulischem Kalk bedeutet ein W/B-Wert von 0,9, dass zu einem Masseil hydraulischem Kalk 0,9 Teile Wasser zugemischt werden. Der W/Z- bzw. W/B-Wert gibt den Wasseranteil nur auf die Menge des Bindemittels und nicht auf die Menge des Gesamtmörtels an. Typische W/Z- bzw. W/B-Werte bei Zement- und Kalkmörtel sind:

- › Zementmörtel W/Z = 0,45 bis 0,70
- › Hydraulischer Kalkmörtel W/B = 0,70 bis 1,4
- › Reiner Kalkmörtel W/B = 1,2 bis 1,9

Bei Mörtelfertigmischungen wird normalerweise die benötigte Menge an Wasser für das Gebinde (z. B. einen Sack) Fertigmörtel angeben.

Anzumerken ist, dass bei Mörtel mit Sumpfkalk die Menge an Wasser im Kalkleim ausreicht und unter Umständen kein Extrawasser zugegeben werden muss. Allerdings ist die Mischzeit bei Sumpfkalkmörtel mit 15 bis 30 Minuten meist länger als bei Mörtel mit hydraulischem Kalk.

Hydraulischen Kalkmörteln können Puzzolane oder Portlandzement zugegeben werden. Typische Puzzolane sind [3.12]:

- › vulkanische Asche, Tephra (z. B. Trass),
- › Ziegelmehl,
- › Flugasche,
- › Mikrosilika,
- › calcinierte Tonminerale (z. B. Metakaolinit).

Puzzolane sind Stoffe, die in alkalischer Umgebung mit Calciumhydroxid zu Calciumsilikathydraten (C-S-H) reagieren. C-S-H-Phasen tragen in hydraulischen Kalkmörteln erheblich zur Festigkeitsentwicklung bei. Der Name »Puzzolan« kommt von der italienischen Gemeinde Pozzuoli bei Neapel, wo schon im Altertum Puzzolanerde als Zusatz für hydraulische Kalke verwendet wurde (Bild 3.8).

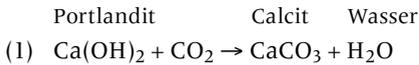


Bild 3.8 Römisches Ziegelmauerwerk mit hydraulischem Kalkmörtel und Puzzolanerde von Pozzuoli als Mörtelzusatz (links; Pompei bei Neapel, Italien). Römischer Wasserzulauf aus Mauerwerk mit einer Auskleidung aus hydraulischem Kalk (rechts; Herculaneum bei Neapel, Italien).

Puzzolanerde von Pozzuoli ist, ähnlich dem Rheinischen Trass, eine relativ unverfestigte vulkanische Asche, die bei den verschiedenen Eruptionsphasen des Vesuvus abgelagert wurden. Mit der Puzzolanerde machten die Römer Kalkmörtel gezielt »wasserfest«. Das bedeutet, dass er auch unter Wasser aushärten konnte und so fest war, dass er, anders als die meisten jungen Luftkalkmörtel, von fließendem Wasser nicht zerstört wurde. Die Römer bauten damit Wasserbauwerke, aber auch Aquädukte, bei denen der wasserführende Kanal mit einem hydraulischen Kalkmörtel verkleidet war (Bild 3.8). Neben Puzzolanerde haben die Römer häufig Ziegelmehl als hydraulischen Zusatz verwendet. Schwach gebrannte, gemahlene Ziegel können C-S-H-Phasen bilden. Heutige Ziegel besitzen in der Regel keine hydraulischen Eigenschaften. Das liegt daran, dass sie in Tunnelöfen bei höheren Temperaturen gebrannt wurden als früher in Feldbrandöfen. Bei höheren Brenntemperaturen ergeben sich fast ausschließlich keramische Phasen, die im Kalkmörtel inert, d. h. nicht hydraulisch aktiv sind. In Deutschland wurde und wird Rheinischer Trass als hydraulische Komponente in Zement und Kalk eingesetzt. Trass ist eine vulkanische Asche, die während des Eifelvulkanismus abgelagert wurde.

3.2.4 Erhärtung von Kalkbindemittel

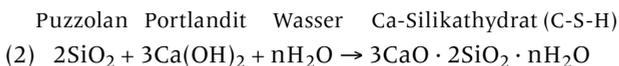
Kalkbindemittel erhärten entsprechend ihrer chemischen Zusammensetzung. Die wichtigste Erhärtungsreaktion in Kalkmörtel ist die Carbonatisierungsreaktion des Calciumhydroxids mit Kohlendioxid aus der Luft [3.12]:



Die Geschwindigkeit der Reaktion hängt von unterschiedlichen Faktoren ab: der Feuchte des Mörtels, der relativen Umgebungsfeuchte, der Temperatur, der Dichte des Mörtels und der Art des Kalkbindemittels (Brantkalk, Weißkalkhydrat, Sumpfkalk). In der Regel ist die Carbonatisierung die langsamste Erhärtungsreaktion, sie kann sich über Monate bis Jahre hin erstrecken. Damit CO_2 in den Mörtel diffundieren kann und die Carbonatisierung ermöglicht, muss der Kalkmörtel einen bestimmten Trocknungsgrad aufweisen. Der Grund hierfür ist, dass CO_2 unter Normalbedingungen kaum wasserlöslich ist. Deshalb können Kalkmörtel, die permanent wassergesättigt sind, auch nicht carbonatisieren.

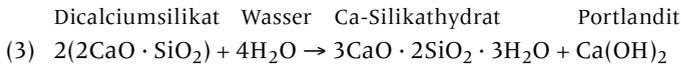
Reine Luftkalkmörtel, die nur durch die Carbonatisierungsreaktion erhärten, besitzen eine sehr geringe Anfangsfestigkeit. Ein Erstarren des Mörtels, wie es z. B. bei Portlandzementmörtel auftritt, findet nicht statt. Vielmehr verliert der Kalkmörtel durch Austrocknen (Wasserverlust) seine Plastizität bzw. Verarbeitbarkeit und erzeugt dadurch eine sehr geringe Frühfestigkeit. Zum Schutz vor plastischem Schwinden und entsprechender Rissbildung müssen reine Luftkalkmörtel jedoch nach der Anwendung vor Austrocknung geschützt werden (z. B. mit Plastikplanen).

Werden Kalkmörteln puzzolanische Zusatzstoffe beigemischt, finden neben der Reaktion (1) noch weitere Reaktionen statt, z. B. [3.12]:



Reaktion (2) ist eine langsame Reaktion, die über mehrere Wochen bis Monate erfolgt. Zur Reaktion des Puzzolans wird Calciumhydroxid aus dem Kalkbindemittel benötigt. Reaktion (2) trägt wesentlich zur Festigkeitserhöhung bei, es wird allerdings Wasser benötigt. Mörtel müssen deshalb nach der Anwendung über mehrere Tage mit Wasser nachbehandelt und vor Austrocknung geschützt werden. In hydraulischen Kalken mit Puzzolanen verlaufen die Reaktionen (1) und (2) parallel. Reaktion (2) stoppt, wenn das Puzzolan komplett reagiert hat oder wenn nicht mehr genügend Wasser für die Hydratation zur Verfügung steht. Da bei der Carbonatisierung Wasser abgegeben wird, kann dieses zur weiteren Hydratation der Puzzolane über einen längeren Zeitraum beitragen.

In natürlichen hydraulischen Kalken oder bei der Zugabe von Portlandzement ist Dicalciumsilikat anwesend. Dicalciumsilikat ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) benötigt zur Reaktion nur Wasser [3.21]:



Reaktion (3) verläuft schnell bis sehr schnell (Tage), je nach den Eigenschaften der vorhandenen hydraulischen Komponenten. In natürlich hydraulischen Kalken treten normalerweise nur Dicalciumsilikat und Calciumaluminat als reaktive hydraulische Komponenten auf. Tricalciumaluminat reagiert jedoch schon beim Löschen des Kalks und steht nicht mehr als hydraulische Phase bei der Herstellung von natürlich hydraulischen Kalkmörteln zur Verfügung. Anders bei Zugabe von Portlandzement. Portlandzement wird in der Regel zugegeben, wenn eine schnelle Anfangsfestigkeit gefordert ist, die auf der Hydratation von Zementphasen beruht. Eine Übersicht der verschiedenen Erhärtungsreaktionen findet sich in der Bild 3.9.

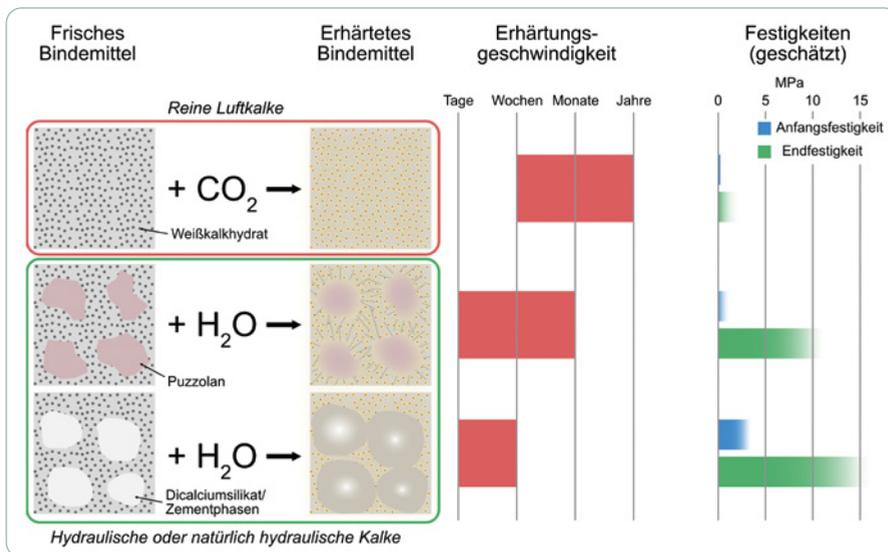


Bild 3.9 Verschiedene Erhärtungsreaktionen in Kalkbindemitteln.

3.2.5 Eigenschaften historischer Kalkmörtel

Historische Kalkmörtel sind oft sehr heterogen. Meist besitzen sie einen hohen Bindemittelanteil und die Druckfestigkeitswerte sind oft unter 10 MPa. Reine Luftkalkmörtel haben eine geringe Rohdichte und entsprechend geringe Festigkeiten [3.3]. Nicht selten finden sich Holzkohlefragmente oder sogenannte Kalkspatzen im Mörtel wieder. Letztere sind Agglomerationen von Kalkhydrat [3.13]. Bild 3.10 bis Bild 3.12 geben einige der typischen Charaktermerkmale verschiedener Kalkmörtel unter dem Mikroskop wieder. Häufig sind Verunreinigungen von Holzkohle zu finden. Diese Bestandteile deuten auf eine Herstellungsweise hin, bei der der Kalk und das Brenngut gemischt wurden, wie z. B. in alten Schacht- oder Feldbrandöfen. In natürlich hydraulischen Kalken finden sich im Mörtelgefüge häufig neben Klinkerphasen (meist in Form von Dicalciumsilikat) noch weitere Schmelzphasen. Oft sind diese Phasen zwar glasig, aber nicht notwendigerweise hydraulisch aktiv [3.5]. Bild 3.12 zeigt einige dieser Phasen im mikroskopischen Bild.

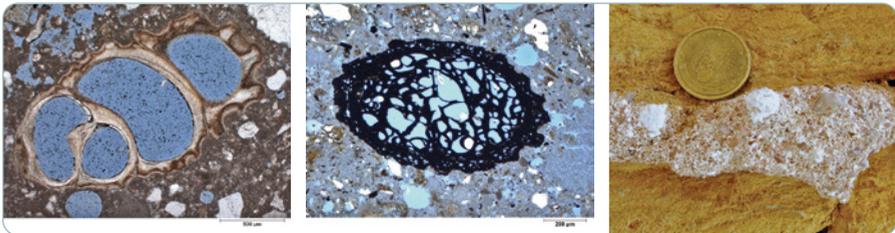


Bild 3.10 Molluskenschale in antikem Kalkmörtel (links); Holzkohlepartikel in Kalkmörtel aus dem 18. Jahrhundert (Mitte; beide Bilder: mikroskopische Dünnschliffbilder unter linear polarisiertem Licht). Kalkspatzen in mittelalterlichem Kalkmörtel (rechts).

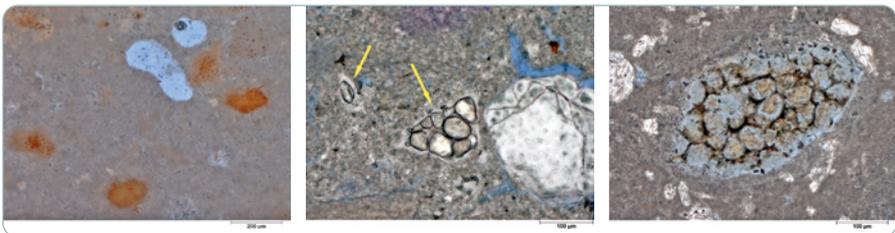


Bild 3.11 Ziegelmehlpartikel (Puzzolan) in Kalkbindemittel (antiker Kalkmörtel; links). Dicalciumsilikatpartikel in einem natürlich hydraulischen Kalk (von einem historischen Gebäude aus dem 14. Jahrhundert; Mitte). Zementklinkerkorn in einem hydraulischen Kalk (rechts). (Mikroskopische Dünnschliffbilder unter linear polarisiertem Licht)

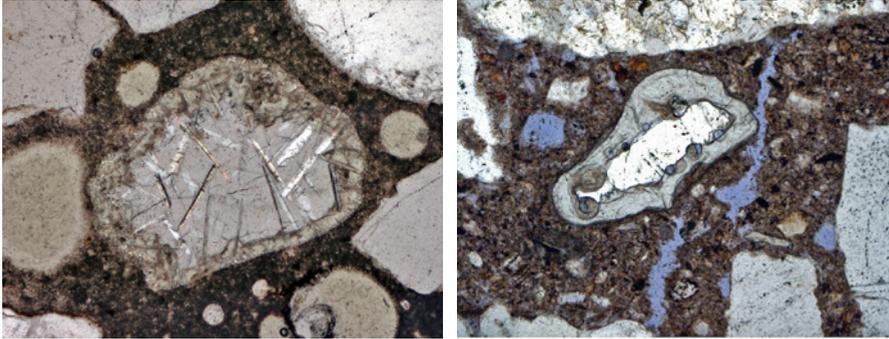


Bild 3.12 Beim Brennen von natürlich hydraulischen Kalken können glasförmige Reaktionsprodukte entstehen. Die in der Glasmatrix eingebetteten Kristalle sind Entglasungsprodukte (links). Ein Quarzkristall hat beim Brennen mit dem Calciumoxid zu einem glasigen Produkt reagiert, das Reste des Quarzkristalls umgibt (rechts). (Mikroskopische Dünnschliffbilder unter linear polarisiertem Licht.)

Reine Luftkalkmörtel sind selbst nach Jahrhunderten nicht immer vollständig carbonatisiert. Wenn die Diffusion von CO_2 in den Mörtel z. B. durch Feuchte behindert wird, wie im Innern von sehr dickem Mauerwerk an Festungsbauten oder in mächtigen Bauteilen (z. B. in Fugen von Säulen mit großem Durchmesser) können auch nach langer Zeit noch nicht carbonatisierte Kalkmörtel vorkommen.

3.3 Gips

Gips ist ein sehr altes Bindemittel, dass aufgrund seiner niedrigeren Calcinerungstemperatur schon lange vor Kalk Verwendung im Baubereich fand [3.14]. Man spricht bei gipshaltigen Bindemitteln auch häufig von Sulfatbindern. Die Anwendung ist einfach und das Bindemittel erhärtet im Fall von Stuckgips in nur wenigen Minuten. Heutzutage wird Gips überwiegend zur Putzherstellung, zur Herstellung von Gipsbauplatten (Gipswandbauplatten, Gipskartonplatten, Gipsfaserplatten) und für Estriche verwendet [3.8]. In der Antike sowie im Mittelalter wurden Gipsmörtel zur Herstellung von Mauerwerk auch im Außenbereich angewendet. Weiter unten werden einige Beispiele besprochen.

Die Ausgangsstoffe von Gipsbindemittel sind Calciumsulfat (CaSO_4) und Wasser (H_2O) [3.8] [3.15]. Es werden verschiedene Arten von Mineralphasen unterschieden, die in diesem System auftreten können. Sie unterscheiden sich in den Herstellungstemperaturen und führen zu unterschiedlichen technischen Eigenschaften in den Bindemitteln (Tabelle 3.2).

Bezeichnung	Weitere Bezeichnungen	Bildung aus	Löslichkeit g/ℓ
Calciumsulfat Dihydrat $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Gips, Dihydrat, Rohgips, Gipsstein	Halbhydrat oder Anhydrit III durch Hydratation	2,0
α -Calciumsulfat Halbhydrat $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$	α -Halbhydrat, Autoklavengips, α -Gips, Hartformgips	Dihydrat bei 80° bis 180 °C (nasses Brennen)	6,7
β -Calciumsulfat Halbhydrat $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$	β -Halbhydrat, Stuckgips, β -Gips, Bassanit	Dihydrat bei 120° bis 180 °C (trockenes Brennen)	8,8
Calciumsulfat I CaSO_4	Anhydrit I, Hochtemperaturanhydrit	Anhydrit II bei >1 180 °C	–
Calciumsulfat II CaSO_4	Anhydrit IIa, Anhydrit, Rohanhydrit, Anhydritstein, nat. Anhydrit	Anhydrit III bei >240 °C	0,27
	Anhydrit IIu, synthetischer Anhydrit, Chemieanhydrit	Anhydrit III bei 500° bis 700 °C	–
	Anhydrit II-E, Estrichanhydrit, erbrannter Anhydrit	Anhydrit III bei >700 °C	–
Calciumsulfat III CaSO_4	Anhydrit III, löslicher Anhydrit, α -Anhydrit III	α -Halbhydrat bei >110 °C (nass)	6,7
	β -Anhydrit III	β -Halbhydrat bei 290 °C (trocken)	8,8

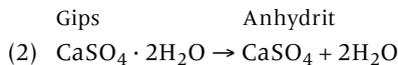
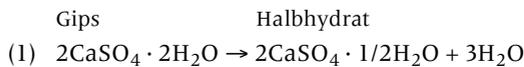
Tabelle 3.2 Einteilung der Phasen im System $\text{CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ (nach [3.8] [3.16]).

Die verschiedenen Phasen in Tabelle 3.2 sind chemisch zum Teil identisch und unterscheiden sich nur in ihrem Kristallgitter (z. B. Anhydrit I, II, III, etc.). Dies wird in der Kristallographie als Polymorphie bezeichnet. Polymorphe Stoffe sind relativ einfach zu finden. So besitzen Eis, Wasser und Wasserdampf dieselbe chemische Zusammensetzung (H_2O), aber unterschiedliche Aggregatzustände. Ein anderes Beispiel ist der Diamant, Graphit und Holzkohle, die alle dieselbe chemische Zusammensetzung aufweisen, nämlich Kohlenstoff, aber unterschiedlicher in ihren Eigenschaften nicht sein könnten. Aufgrund der unterschiedlichen Kristallgitter ergeben sich trotz gleicher chemischer Zusammensetzung andersartige physikalische und chemische Eigenschaften (s. Kapitel 8.1).

3.3.1 Herstellung

Die Herstellung von Sulfatbindern erfolgt über das Brennen von Gips [3.8] [3.15]. Gips kann entweder aus natürlichen Vorkommen stammen oder ein Abfallprodukt großtechnischer Prozesse sein. Ein Teil des Gipses, der in der Baustoffindustrie in Deutschland eingesetzt wird, stammt zum Beispiel aus dem Reinigen von Rauchgasen, die bei der Energiegewinnung aus Kohle oder Öl entstehen. In Rauchgasentschwefelungsanlagen (REA) wird das Schwefeldioxid im Rauchgas über eine Kalkwäsche in Gips umgewandelt. Dieser sogenannte REA-Gips ist feinkörnig und von hoher Reinheit [3.15].

Für die Herstellung von Gips sind zwei Entwässerungsreaktionen von Bedeutung:

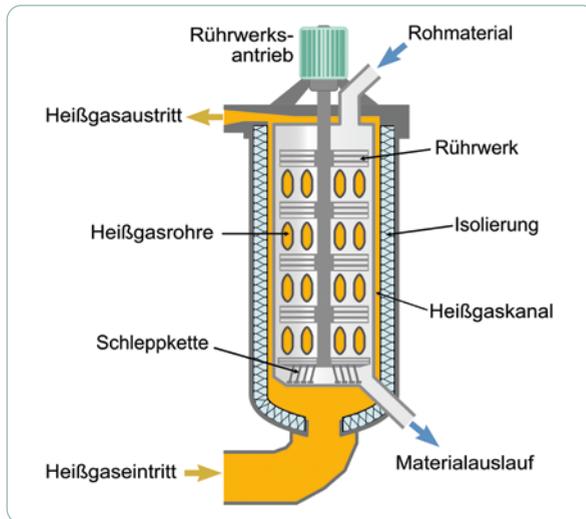


Reaktion (1) führt zur Teilentwässerung von Gips zu α - und β -Halbhydrat (z. B. Stuckgips). Reaktion (2) führt zur vollständigen Entwässerung zu den verschiedenen Calciumsulfatphasen. Reaktion (1) findet bei niedrigen Brenntemperaturen statt (Tabelle 3.2) und es wird daher von Niederbrandgips gesprochen. Reaktion (2) findet bei niedrigen und höheren Temperaturen statt. Produkte, die bei höheren Temperaturen gebrannt werden, werden als Hochbrandgipse bezeichnet (Tabelle 3.2).

Herstellung von Stuckgips (β -Halbhydrat, Bassanit)

Stuckgips wird durch trockenes Brennen im Temperaturbereich von 120° bis 180°C hergestellt (Niederbrandgipse). Heute erfolgt dies in Drehrohröfen, die eine Kapazität von bis zu 500 Tonnen pro Tag besitzen. Eine weitere Herstellungsart findet sich in Form von Großkochern (Bild 3.13), bei denen der Gips in geringer Korngröße vorliegen muss [3.8]. Die Brenntemperatur wird bei Großkochern über Heißluft eingestellt. In Trärgasbrennanlagen wird der Gips in einem Heißluftstrom direkt gebrannt. Mit diesem Verfahren können sowohl Niederbrandgipse als auch Hochbrandgipse hergestellt werden.

Bild 3.13 Großkocher zur industriellen Stuckgips-herstellung (nach [3.8])



Herstellung von Hartformgips (α -Halbhydrat)

Hartformgips wird in Autoklaven bei Temperaturen von 100° bis 140 °C unter einem Wasserdampfdruck von 4 bis 5 bar hergestellt. Bei der Autoklavierung wird das Gipsrohmaterial stückig in Körben in den Autoklaven eingebracht und ca. 4 bis 5 Stunden behandelt. Anschließend muss das Produkt bei 105 °C getrocknet und gemahlen werden [3.8].

Herstellung von Putzgipsen und weiteren Calciumsulfaten

Diese werden in trockenem Brennverfahren zwischen 300° und 900 °C hergestellt (Hochbrandgipse) [3.8]. Putzgipse enthalten die verschiedene Anhydritphasen (Tabelle 3.3) in Form eines Gemisches, das je nach Brenntemperatur und Ausgangsmaterial zusammengesetzt ist.

Hochbrandgipse werden mit Trägergasbrennanlagen hergestellt. Ein weiteres Verfahren stellen Rostbrandöfen dar, in denen das Rohmaterial auf einem Rostband unter einem Heißluftstrom bewegt wird. Die Heißluft wird hierbei über eine Sauganlage im Ofen durch das Gipsbett gesogen. Das Brenngut besitzt eine Korngröße im Bereich zwischen 4 und 60 mm und muss anschließend gemahlen werden.

Die Herstellungsverfahren werden teilweise modifiziert, je nachdem ob das Ausgangsmaterial Natur- oder REA-Gips ist. Bei trockenem Brennen von REA-Gips muss ein Trocknen des Materials vor den eigentlichen Brennvorgang geschaltet werden. Ein Zerkleinern, wie beim Naturgips, entfällt dagegen, da REA-Gips schon in feinen Partikeln vorliegt.

In vorindustrieller Zeit wurden häufig Hochbrandgipse hergestellt, da das Wissen um die stoffliche Zusammensetzung der Brandprodukte und den Einfluss der Brenntemperaturen erst in der Neuzeit systematisch erforscht wurde. Historisch wurde Gips in Öfen einfacher Bauart gebrannt, die mit Holz oder Holzkohle befeuert wurden. Während der Industrialisierung wurden verschiedenartige Öfen gebaut, die mit Kohle oder Koks befeuert wurden und auch größere Mengen an Gips brennen konnten. Bild 3.14 zeigt eine einfachere Ofenanordnung, bei der Brennkammern aus Gips gemauert wurden auf die dann weiterer Gips geschichtet wurde [3.17]. Anders als bei Schächtofen für das Brennen von Kalk wurde der Gips nicht mit Brennmaterial vermischt (auch deshalb, weil die Brenntemperaturen nicht so hoch sein mussten). Die Brennkammern standen auf perforierten Gewölbebögen, die ein Durchfallen der Asche erlaubten. Dadurch wurde ein Kontakt der Asche mit dem gebrannten Gips vermieden und dieser behielt seine weiße Farbe. Die Brenntemperaturen konnten nicht exakt gesteuert werden und lagen im Schnitt bei über 300 °C. Gips, der sich nahe der Brennkammer befand, war normalerweise »totgebrannt« und Gips in den oberen Lagen war teilweise ungenügend dehydriert [3.17]. Das Brandprodukt aus solchen Öfen bestand deshalb meist aus einem Mehrphasenanhydrit mit Anteilen von totgebranntem Gips und Bassanit. Während des 19. Jahrhunderts kamen dann modernere Kammeröfen zum Einsatz, die eine bessere Kontrolle des Brennvorgangs und der Brenntemperatur erlaubten. Künstler und Stuckateure des Barocks brannten Gips in kleineren Mengen auch selbst. Für diesen Zweck wurde reinweißer Naturgips feingemahlen zur Verfügung gestellt. Das Material konnten dann über offener Flamme auf einer Platte oder einem Behälter bei niedriger Temperatur zum β -Halbhydrat entwässert werden [3.18].

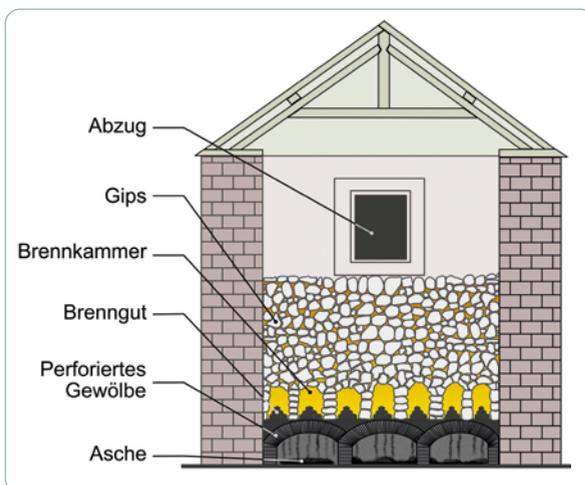
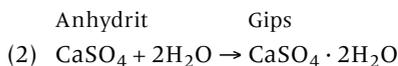
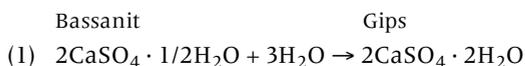


Bild 3.14 Einfacher Ofen zur Herstellung von Hochbrandgips (nach [3.17])

Seit dem Mittelalter war Paris ein wichtiges Zentrum der Gipsproduktion in Europa. Dort befanden sich große Gipsvorkommen, die teilweise untertage abgebaut wurden. Der besonders reine, gebrannte Gips wurde in viele europäische Länder exportiert. Die englische Bezeichnung für Stuckgips, »Plaster of Paris«, deutet auf die Wichtigkeit der Pariser Gipsvorkommen hin.

3.3.2 Erhärtung von Gips

Die Erhärtung von Gips erfolgt durch Aufnahme von Wasser durch die entsprechenden Phasen, dem Bassanit (Halbhydrat) bzw. dem Anhydrit und stellt exakt die Umkehrung der Reaktionen beim Brennen dar [3.16]:



Reaktion (1) ist eine sehr schnelle Reaktion für beide, α - und β -Halbhydrat. Da Reaktion (1) innerhalb von Minuten erfolgt, wird in der Praxis häufig mit Abbindeverzögerern gearbeitet. Diese bestehen z. B. aus Zitronen-, Wein- oder Milchsäure oder deren Salzen. Früher wurden auch Leime zur Verzögerung verwendet. Die einfachste Art der Verzögerung von Stuckgips ist das Hinzufügen von frisch gepresstem Zitronen- oder Limettensaft. Je nach Menge an Zitronensaft lässt sich das Abbinden von Stuckgips um ca. 20 bis 40 Minuten verzögern [3.14].

Das Erhärten von Anhydrit nach Reaktion (2) erfolgt nach Art der Phase langsam bis sehr langsam. Aus diesem Grund wird Putzgips oder Anhydritestrich meist ein Abbindebeschleuniger, beispielsweise in Form von Alkalisulfaten (z. B. K_2SO_4), Weißkalkhydrat ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) oder Natriumhydrogensulfat (NaHSO_4) zugegeben. Durch Abbindebeschleuniger hydratisiert auch der relativ langsam reagierende Anhydrit II zügig [3.16].

Bei der Hydratation von Gips finden nicht nur chemische und Phasenumwandlungen statt, sondern auch das Gefüge des Bindemittels ändert sich. Aus den oft feinen, körnigen Brandprodukten findet beim Anrühren mit Wasser eine Änderung der Morphologie statt, oftmals als Neubildungen von nadeligen oder langsäuligen Kristallen, die regelrecht miteinander verfilzt sind und ein sehr festes Gefüge erzeugen.

3.3.3 Anwendung und Eigenschaften

Die heutige Anwendung von Gipsbauprodukten beschränkt sich meist auf den Innenausbau bei Neubauten oder bei der Bauinstandsetzung. Tabelle 3.3 gibt einen Überblick über die angewendeten Produkte nach DIN 18550 [3.19]. Diese Bauprodukte können Zuschläge, Füllstoffe und Zusatzmittel enthalten, um die Eigenschaften des Frischmörtels und erhärteten Mörtels zu verbessern. Eine sehr gute Übersicht über die Eigenschaften, Voraussetzungen und Anwendung von Gipsbaustoffen finden sich im Gips-Datenbuch [3.15] und IGB Handbuch Gipsputze [3.18].

Bauprodukt	Anwendung	Enthaltene Phasen
Stuckgips	Stuckaturarbeiten	β -Halbhydrat
Hartformgips	Formarbeiten, z. B. Dentalbereich	α -Halbhydrat
Putzgips, Maschinenputzgips	Verputzen von Oberflächen im Innenbereich	Anhydrit II, III
Estrichgips (Anhydritestrich), Fließestrich	Estriche im Innenbereich (Trockenbau), z. B. im Bereich von Fußbodenheizungen (Heizestrich)	Anhydrit II, III
Haftgips	zur Befestigung von Bauteilen, z. B. Wandbauplatten	α -Halbhydrat
Spachtelgips	zur Beseitigung von Wandunebenheiten	β -Halbhydrat
Mörtelgips	zum Einmauern von z. B. Steckdosen	β -Halbhydrat
Gipsbauplatten (Gipskarton- und Gipsfaserplatten)	Innenausbau (Trockenbau)	α -Halbhydrat

Tabelle 3.3 Verschiedene Gipsbauprodukte, teilweise nach [3.18] und DIN 18550-2 [3.19].

In der Vergangenheit wurden Sulfatbinder für Putze, Mauer Mörtel und Stuckaturarbeiten verwendet. Bekannte Beispiele finden sich in der Architektur des antiken Ägyptens und Griechenlands (Bild 3.15). Dort wurde Gipsmörtel häufig zum Ausgießen von mehrschaligem Mauerwerk angewendet. Aber auch im Römischen Reich wurden Gipsmörtel zum Mauerwerksbau eingesetzt. Oftmals geschah dies, wenn Gips in größeren Mengen zur Verfügung stand, z. B. in ariden Gebieten. Es ist deshalb nicht verwunderlich, dass sich im regenarmen arabischen und nordafrikanischen Kulturbereich die Gipsverarbeitung besonders durchgesetzt hat, da in den wüsten- und steppenartigen Gebieten Gipsvorkommen in großen Mengen und nahe der Oberfläche mit einfachsten Mitteln abzubauen waren. Ein weiterer Punkt waren die niedrigeren Brenntemperaturen, die den Verbrauch von Brennstoff, z. B. im Vergleich zu Kalkbindemitteln, wesentlich verringerten, was in brennstoffarmen Gebieten ein wichtiger Aspekt ist.

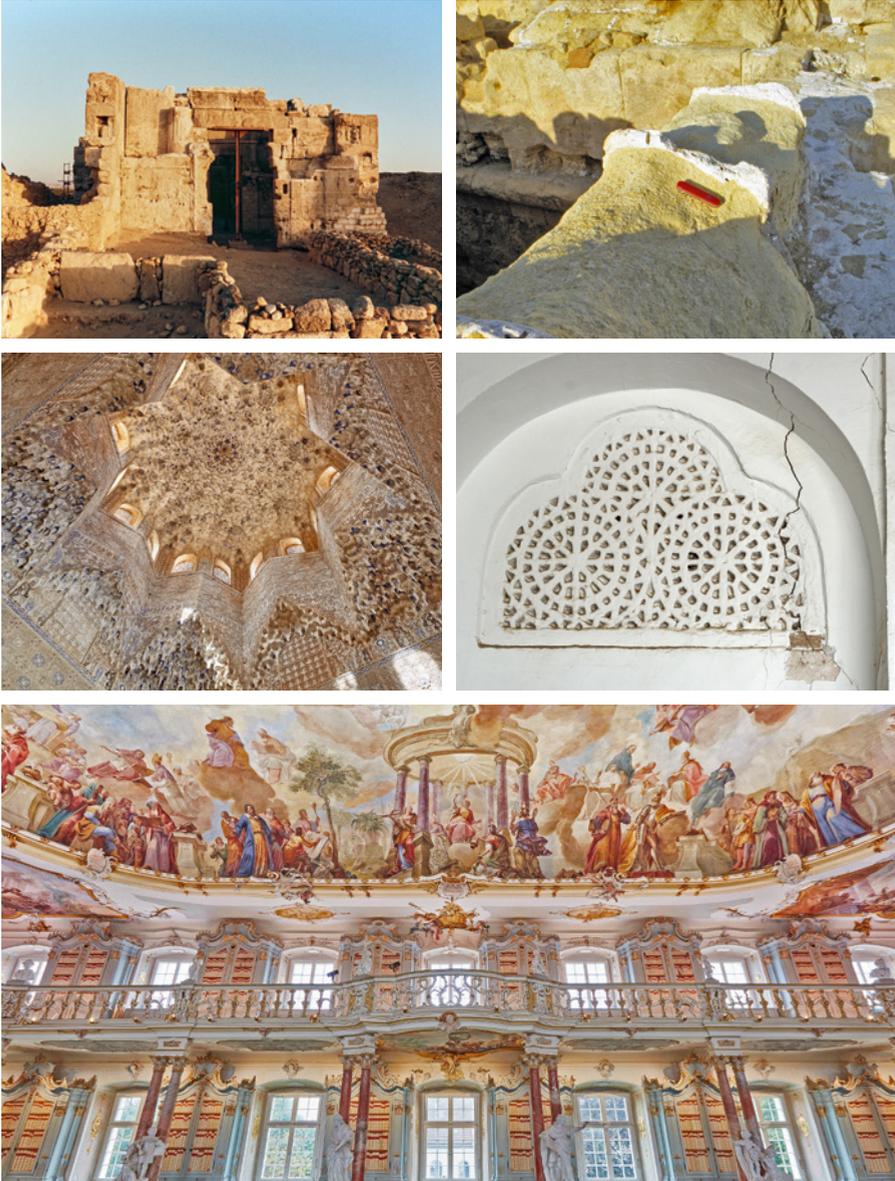


Bild 3.15 Amuntempel des Orakels von Siwa, Ägypten (obere Reihe). Das Mauerwerk besteht aus zwei Schalen, das mit Gipsmörtel ausgegossen wurde. Stalaktitengewölbe aus Gips in der Alhambra, Granada, Spanien (Mitte links). Gipschnitzereien am Amiri-Palast in Doha, Katar (Mitte rechts). Stuckgipsdekorationen im Bibliothekssaal des barocken Klosters Schussenried in Oberschwaben (unten).

Durch die arabische Expansion in den südeuropäischen Raum (Spanien, Portugal, Sizilien) im 8. Jahrhundert erreichte die Kunst der Oberflächendekoration durch Gipsschnitzereien und Gipsstuckaturen auch Europa (Bild 3.15). Im Barock erfreuten sich die Möglichkeiten der Dekoration mit Stuckgips ungeheurer Beliebtheit. Aufgrund der Abbindeigenschaften des Gipses konnten erstmals relativ problemlos freigeformte Halbplastiken hergestellt werden. Dabei wurde nicht nur geformter Stuckgips mit Farbfassungen versehen, sondern durch das Schichten von Lagen mit unterschiedlich pigmentierten Gipsmaterial gefärbter Marmor und andere Gesteine imitiert. Die künstlichen Marmore wurden häufig zusätzlich poliert, was ihnen ein täuschend echtes Erscheinungsbild verlieh. Innenraumdekorationen aus Stuckgips erfreuten sich noch bis zu Anfang des 20. Jahrhunderts einer gewissen Beliebtheit. Im Zuge der aufkommenden Moderne fielen diese jedoch zusehends aus dem Zeitgeschmack [3.18].

Historische Gipsputze und -mauermörtel zeigen in der Regel eine sehr hohe Porosität und nur wenig Gesteinskörnungen (Bild 3.16) [3.13] [3.14]. Ausnahmen bilden Gips- oder Gipskalkmörtel, die mit Zuschlägen zubereitet wurden. Allerdings ist das Mörtelgefüge wesentlich inhomogener als der heutige Gipsmörtel. Oftmals finden sich Verunreinigungen von Lehm oder Kalk und teilweise organische Bestandteile wie Fasern oder Holzkohle.

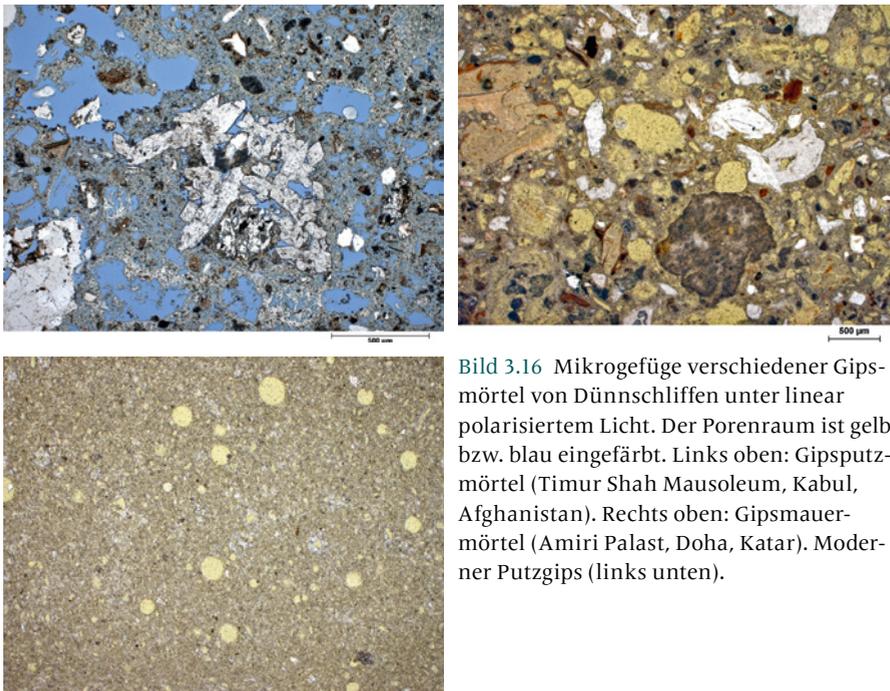


Bild 3.16 Mikrogefüge verschiedener Gipsmörtel von Dünnschliffen unter linear polarisiertem Licht. Der Porenraum ist gelb bzw. blau eingefärbt. Links oben: Gipsputzmörtel (Timur Shah Mausoleum, Kabul, Afghanistan). Rechts oben: Gipsmauermörtel (Amiri Palast, Doha, Katar). Moderner Putzgips (links unten).

Trotz der häufigen hohen Porosität erreichen selbst historische Gipsmörtel Festigkeiten im Bereich 2 bis 10 MPa. Mittelalterliche Hochbrandgipse des mitteldeutschen Raums, die mit Gipssteinsand abgemagert wurden, sind mit weniger Wasser angerührt worden und deshalb entsprechend dichter (Rohdichten bis 2000 kg/m^3) und fester (Druckfestigkeiten bis zu 20 MPa) [3.18]. Nicht zu vergessen ist jedoch die Löslichkeit von Gips in Wasser, die mit 2 g/l relativ hoch ist. Dies ist zu berücksichtigen, wenn Renovierungs- oder Restaurierungsarbeiten durchgeführt werden, bei denen größere Mengen an Wasser Verwendung finden.

Gipsputze werden heute mit Wasser/Gips-Werten von 0,45 bis 0,80 hergestellt, je nachdem, ob es sich um einen Maschinenputz oder Haftputz handelt [3.16] [3.18]. Die Druckfestigkeiten liegen hierbei bei 2 bis 5 MPa mit Rohdichten zwischen 900 und 1200 kg/m^3 was einem Porenvolumen von 50 bis 60 % entspricht. In modernen Werk trockenmörteln sind alle Bestandteile entsprechend verarbeitet und werden für verschiedene Putz- oder Wandarbeiten vermarktet. Das Anmischen erfolgt lediglich mit der Zugabe von sauberem Wasser.

In ariden Gegenden sind historische Gipsbauprodukte häufig mit Salzen befrachtet (zumeist NaCl und KCl). Alkalichloride zeigen einen interessanten Effekt bezüglich des Gipsbindemittels. Sie verändern die Stabilitätstemperatur von Anhydrit zu niedrigeren Temperaturen. Aus einer übersättigten Sulfatlösung kristallisiert normalerweise oberhalb von 50°C Anhydrit, darunter Gips aus. Werden Alkalichloride zur Lösung zugegeben, verschiebt sich die Temperaturgrenze von 50°C zu bis zu 20°C (abhängig von der Alkalichloridkonzentration). In historischen salzhaltigen Gipsmörteln aus ariden Gebieten finden sich deshalb neben Gips häufig Anhydrit [3.14].

3.4 Zement und Portlandzement

Zement ist verglichen zu Gips- und Kalkbindemitteln verhältnismäßig jung. Das erste Patent für ein schnell erhärtendes hydraulisches Bindemittel, das aus einem natürlichen Kalkmergel gebrannt wurde, und das auch unter Wasser reagierte, wurde 1796 in England eingereicht [3.1]. Es handelte sich um ein Bindemittel, das unter dem Begriff Romanzement eingeführt wurde. Im Jahr 1843 erfolgte in England dann erstmals die Herstellung eines Zements, der dem modernen Portlandzement schon sehr nahekam. Ab 1850 wurde dann auch in Deutschland Zement produziert. Zement wurde verhältnismäßig früh qualitätsüberwacht. 1878 erfolgte ein erstes »Reinheitsgebot«, das später zu einer Zementnorm führte [3.1].

Relativ früh wurde Zement produziert, der nicht nur aus Portlandzementklinker bestand, sondern dem gemahlene Hochofenschlacke, sogenannter Hüttensand,

zugemischt wurde. Dieser »Eisenportlandzement« wurde seit dem Anfang des 20. Jahrhunderts verwendet und enthielt bis zu 30 % Hüttensand. Zement, der mit Hüttensand hergestellt wird, wird heute als Hochofenzement bezeichnet.

3.4.1 Herstellung

Portlandzement wird aus Kalkstein oder Kalkmergel und Ton hergestellt [3.20]. Die Ausgangsprodukte müssen CaO , SiO_2 , Al_2O_3 und Fe_2O_3 enthalten. Da Kalkstein und Tone natürlichen chemischen Schwankungen unterliegen, wird zur Regulierung der chemischen Zusammensetzung Quarz (SiO_2) verwendet. Die Zusammensetzung des Rohmehls für die Herstellung des Zements wird hierbei ständig überwacht. Kalkstein und Ton werden in nahegelegenen Steinbrüchen bzw. Gruben gewonnen. Kalkstein wird in Backenbrechern gebrochen und mit dem Ton in großen Mischbetten gemischt (Rund-/Längsmischbett, Bild 3.17). Anschließend wird das Mischgut in der Rohmehlmühle auf die erforderliche Feinheit gemahlen. Bei diesen handelt es sich heute meist um Wälzmühlen, die mit einem kontinuierlichen Heißluftstrom durchflutet werden, um das Rohmaterial zu trocknen. Nach dem Mahlen wird das Rohmehl in den Zyklonvorwärmer eingebracht. Heute arbeiten die meisten Zyklonvorwärmer mit einem Calcinator in der letzten Stufe, der bei Temperaturen zwischen 800 und 900 °C ca. 90 % des Kalksteinmehls decarbonatisiert (calcinert). Der Calcinator wird teilweise mit der Abwärme des Drehrohrens und Klinkerkühlers betrieben.

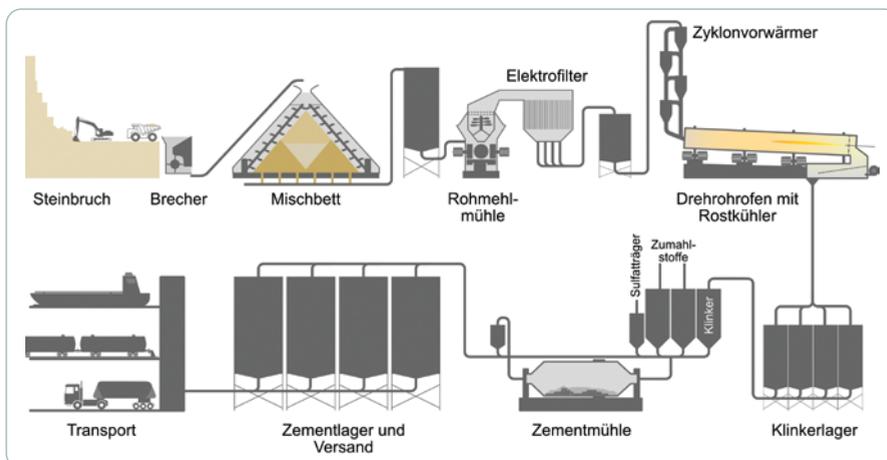


Bild 3.17 Ablaufschema der Zementherstellung

Die eigentliche Umwandlung des Kalkstein-Tongemisches in Zement erfolgt durch die thermische Behandlung im Drehrohrofen (Bild 3.18).

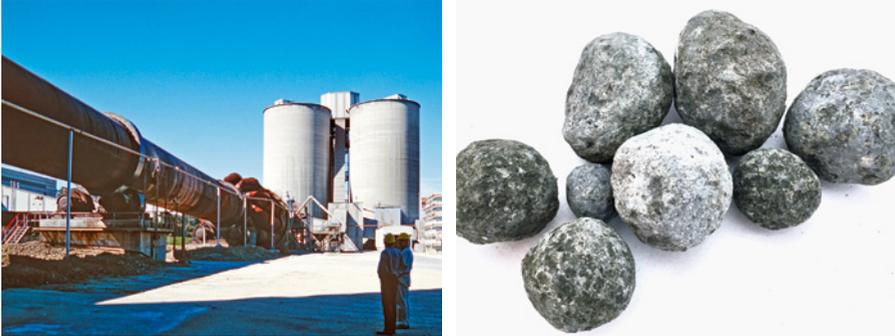


Bild 3.18 Drehrohrofen zur Zementherstellung (links). Zementklinker aus dem Drehrohrofen (rechts). Die Kugeln sind zwischen 5 und 25 mm groß.

Im Drehrohrofen reagiert das aus dem Kalkstein gebrannte Calciumoxid mit den silikatischen Anteilen im Ton zu Calciumsilikaten und Calciumaluminaten, welche als Klinker bezeichnet werden und die eigentlichen Zementbestandteile darstellen [3.21]. Durch das Drehen des Ofens werden die Reaktionsprodukte langsam von einem Ende zum anderen transportiert, wo eine Brennflamme für die höchsten Temperaturen von ca. 1400° bis 1450 °C sorgt. Aus dem Drehrohrofen rollen dann die kugelförmigen Zementklinkerbestandteile, die im Klinkerkühler schnell abgekühlt werden müssen (Bild 3.18). Anschließend werden die Klinker gelagert und dann in der Zementmühle zusammen mit Gips als Erstarrungsregler und mit weiteren Zusatzstoffen (z. B. Hüttensand oder Flugasche) gemahlen [3.20]. Die Zementmühle ist meist eine Kugelmühle, in der das Mahlgut zusammen mit Stahlkugeln bis zur gewünschten Mahlfeinheit kontinuierlich gemahlen wird. In den letzten Jahren wurden auch vermehrt vertikale Wälzmühlen eingesetzt. Der feingemahlene Zement wird dann bis zur Verpackung und dem Transport gelagert. Zement ist ein streng überwachtes Bauprodukt. Entsprechend wird die Zusammensetzung des Rohmehls und die des Klinkers mindestens einmal pro Tag, in modernen Zementwerken alle 4 bis 6 Stunden, bei internen Qualitätskontrollen überprüft. Zement muss außerdem durch unabhängige Prüfeinrichtungen regelmäßig extern qualitätsüberwacht werden [3.22].

Die ersten Herstellungsweisen von modernem Zement erfolgten in Schachtofen. Ab ca. 1850 wurde Portlandzement in Hoffmannschen Ringöfen quasi kontinuierlich produziert. Erst ab ca. 1890 wurde Portlandzement in Drehrohrofen in großen Mengen kontinuierlich hergestellt [3.23]. Seit dieser Zeit hat sich prinzipiell nichts Wesentliches geändert. Lediglich die Prozesstechnik wurde sukzessive optimiert und verfeinert. Dies betraf besonders den Mischungsprozess und die

Aufmahlung der Rohmaterialien sowie das Calcinieren des Rohmehls und das Brennen und Abkühlen des Klinkers. Heute besitzen die meisten Zementwerke feinabgestimmte Prozessabläufe, die auf einen hohen Rohstoffdurchlauf und einen optimierten Einsatz elektrischer Energie und fossiler oder alternativer Brennstoffe abgestimmt sind [3.20] [3.21].

Eine weltweite jährliche Zementproduktion von ca. 4 Milliarden Tonnen trägt zu ca. 6 % der jährlichen globalen CO₂-Emissionen bei. Ein Großteil der Kohlendioxidemissionen stammen von der Calcination des Kalksteins, was pro Tonne Zementklinker ca. 530 kg entspricht. Die durch den Brennstoffverbrauch erzeugten CO₂-Emissionen liegen bei ca. 200 kg/t Klinker, und die durch den Verbrauch elektrischer Energie bei ca. 100 kg/t Klinker. Damit liegen die Gesamtemissionen an CO₂ bei ca. 800 kg/t Klinker, was ca. 750 kg/t Portlandzement entspricht. Da rein prozesstechnisch Emissionen des Treibhausgases CO₂ nicht mehr weiter gemindert werden können, haben sich die Zementhersteller auf eine andere Strategie besonnen. Diese zielt darauf ab, den Klinkergehalt im Zement zu reduzieren. Dies kann dadurch realisiert werden, dass dem Zement Ersatzstoffe zugemahlen werden, die eine neutrale CO₂-Emissionsbilanz aufweisen. Beispiele solcher Stoffe sind Hüttensand (Schlacke aus der Roheisenproduktion), Steinkohlenflugasche (Asche aus der Verbrennung von Steinkohle), Kalksteinmehl oder andere Gesteinsmehle. Wichtig ist, dass die zugemahlenden oder zugegebenen Stoffe keine negativen Auswirkungen auf die Gebrauchsdauer von Betonkonstruktionen haben [2.35]. Zusatzstoffe werden zusammen mit dem Zementklinker in der Zementmühle gemahlen (Bild 3.17).

3.4.2 Zementbestandteile, Erstarrungs- und Erhärtungsreaktionen (Hydratation)

In der Zementchemie werden Formeln nicht ausgeschrieben, sondern weiter abgekürzt. Dies führt zu den folgenden Abkürzungen für die Oxidformen der Elemente:

Na₂O = N, K₂O = K, CaO = C, MgO = M, Al₂O₃ = A, Fe₂O₃ = F, SiO₂ = S, SO₃ = \hat{S} ,
CO₂ = \hat{C} , H₂O = H

Daraus ergibt sich z. B. für:

- › Alit: $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_3\text{S}$
- › Gips: $\text{CaO} \cdot \text{SO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{C}\hat{\text{S}}\text{H}_2$
- › Calcit: $\text{CaO} \cdot \text{CO}_2 = \text{C}\hat{\text{C}}$
- › Portlandit: $\text{CaO} \cdot \text{H}_2\text{O} = \text{CH}$
- › Ettringit: $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3(\text{CaO} \cdot \text{SO}_3) \cdot 32\text{H}_2\text{O} = \text{C}_3\text{A}(\text{C}\hat{\text{S}})_3\text{H}_{32}$

Portlandzement besteht im Wesentlichen aus vier Hauptkomponenten, den sogenannten Klinkerphasen:

- › Alit, Ca_3SiO_5 , $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, C_3S
- › Belit, Ca_2SiO_4 , $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, C_2S
- › Calciumaluminat, $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, C_3A
- › Ferrit, $\text{Ca}_2(\text{AlFe})_2\text{O}_5$, $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, C_4AF

Daneben treten noch weitere Phasen in geringeren Mengen auf (<5 %): Freikalk (CaO), Magnesiumoxid (MgO) und Alkalisulfate [3.20] [3.21].

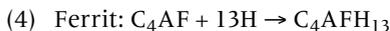
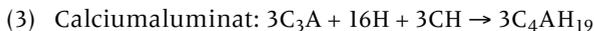
Wenn die kugelförmigen Klinkerkörner aus dem Drehrohröfen rollen, bestehen sie im Wesentlichen aus diesen Komponenten.

Wenn Zement mit Wasser in Berührung kommt, spielen sich eine Reihe komplexer Reaktionen ab, bei denen sich die oxydischen Zementklinkerkomponenten in Hydratphasen umwandeln. Man spricht hier auch von Hydratationsreaktionen. Die Calciumsilikate Alit und Belit sind für die Festigkeit und Dauerhaftigkeit des Zementsteins verantwortlich (als Zementstein wird der hydratisierte, ausgehärtete Zement bezeichnet) [3.21]:



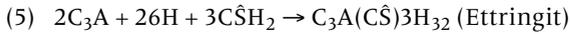
$\text{C}_9\text{S}_6\text{H}_{11}$ ist eine kristalline Variante (Jennit) einer Calciumsilikathydratphase oder kürzer C-S-H-Phase, die so im hydratisierten Zement nicht vorkommt. C-S-H-Phasen besitzen zwar eine Nanostruktur, aber keine Kristallstruktur im klassischen Sinn. Die exakte chemische Zusammensetzung variiert stark, abhängig vom Verhältnis von Calcium zu Silizium und dem Einbau von Aluminium in die Struktur der C-S-H-Ketten. Bei allen Calciumsilikatreaktionen (1) und (2) wird CH frei, der als Portlandit oder Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) bezeichnet wird. Portlandit ist zusammen mit den Alkalisulfaten für die Passivierung von Stahlbewehrung in Beton verantwortlich und erzeugt das alkalische Milieu im Beton. Reaktion (1) erfolgt schnell innerhalb weniger Stunden bis zu einem Monat, Reaktion (2) benötigt mehrere Tage bis zu mehreren Monaten.

Calciumaluminat und Ferrit reagieren mit Wasser und Portlandit ebenfalls zu Hydratphasen [3.21]:



Reaktion (4) verläuft sehr langsam über einen Zeitraum von mehreren Tagen bis Monaten. Reaktion (3) erfolgt sehr schnell innerhalb von einigen Minuten und das Reaktionsprodukt Calciumaluminathydrat verursacht ein schnelles Erstarren des Zements, wenn es mit Wasser gemischt wird. Um dieses plötzliche Erstarren

zu verhindern, wird dem Zement Gips zugemischt, der mit Calciumaluminat zu Ettringit reagiert [3.21]:



Reaktion (5) erfolgt ebenfalls innerhalb der ersten Sekunden der Hydratation. Allerdings werden fast ausschließlich kurzsäulige Ettringitkristalle auf den Zementklinkerkörnern gebildet, welche ein schnelles Erstarren verhindern und die Zementmasse plastisch halten (Bild 3.19 links). Nach einigen Stunden der Hydratation wandeln sich die kurzsäuligen Ettringitkristalle in lange Nadeln um und gleichzeitig erhöht sich die Menge an gebildeten C-S-H-Phasen aus Reaktion (1) ab ca. 2 bis 3 Stunden (Bild 3.19 rechts). Der Beginn der Erstarrung erfolgt entsprechend nach ca. 3 bis 4 Stunden. Ab dann verhält sich der Zementleim nicht mehr plastisch, sondern er erstarrt.

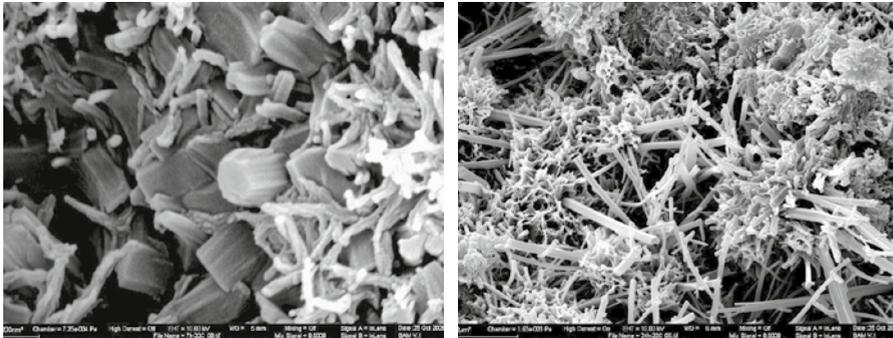


Bild 3.19 Kurzsäulige Ettringitkristalle auf einem Klinkerkorn in den ersten Minuten der Zementhydratation (links). Langnadelige Ettringitkristalle mit faserigen C-S-H-Phasen nach 24 h Hydratation (rechts).

Nach einigen Tagen wird Ettringit durch die weitere Reaktion mit Calciumaluminat in Calciumaluminatmonosulfathydrat, oder kurz Monosulfat, umgewandelt:



Bild 3.20 verdeutlicht die Reaktionsverläufe der wichtigsten Hydratphasen, wenn Zement mit Wasser gemischt wird. Die Reaktionen sind am Anfang verzögert, was das Bindemittel plastisch hält. Das ermöglicht die Verarbeitung von Beton über einen Zeitraum von 2 bis 4 Stunden. Danach werden verstärkt C-S-H-Phasen über die Reaktion (1) gebildet, die zusammen mit der Ettringitbildung das Erstarren einleitet und dann nach ca. 7 bis 12 Stunden für die Erhärtung verantwortlich ist. Die gewünschten Festigkeitseigenschaften werden ausschließlich durch C-S-H-Phasen nach einer Hydratationszeit von vier Wochen erreicht. Andere Hydratphasen, wie Portlandit, Monosulfat oder Ettringit, tragen nicht zur Endfestigkeit bei, sind aber für die Beständigkeit des Bindemittels wichtig. Im Normalfall wird

nicht der gesamte Zement hydratisiert, sondern es bleiben zwischen 20 und 40 % der Klinkerphasen im nichthydratisierten Zustand, d.h. im Bindemittel finden sich immer Zementkörner, die nicht vollständig hydratisiert sind. Die Reaktionen zeigen, dass Zement ein sehr komplexer Werkstoff ist und die gezielte Steuerung von dessen Eigenschaften im erhärteten Zustand nur mit einem tieferen Verständnis der chemischen Prozesse möglich ist.

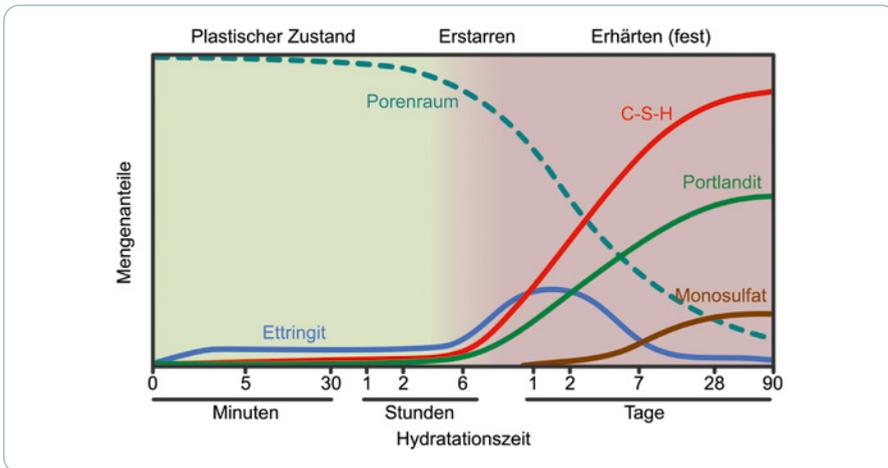


Bild 3.20 Qualitativer Verlauf der Bildung von Hydratphasen beim Mischen von Zement mit Wasser (nach: [3.20]; bearbeitet).

Die Hydratation von Zement ist exotherm. Das heißt, bei den Reaktionen wird Wärme frei. Die freigewordene Wärme führt zu einer Temperaturerhöhung im Zement bzw. Beton. Steigt die Temperatur zu stark an, kann es bei massiven Betonkonstruktionen zu Rissbildungen kommen. Bei Konstruktionen wie Staudämmen oder ähnlich massiven Bauwerken, wird der Beton deshalb während der Hydratation über Kühlschlangen, die mit einbetoniert werden, gekühlt. Bild 3.21 zeigt die Wärmeentwicklung und den Wärmefluss eines Portlandzements, die in einem isothermen Kalorimeter gemessen wurden. Mit der gemessenen Wärmeentwicklung lässt sich in etwa bestimmen, wie viel Gesamtwärme ein Zement bei der Hydratation entwickelt. Der Wärmefluss ermöglicht Aussagen zur Reaktivität des Zements, da gezeigt wird, wann wieviel Wärme freigesetzt wird. Dies ist insbesondere dann interessant, wenn Zusatzstoffe wie Flugasche oder Hüttensand im Zement enthalten sind. Diese Zusätze können die Wärmeentwicklung in den ersten Stunden bedeutend verringern [3.24]. Sie werden deshalb oft zur Herstellung von Zementen mit geringer oder moderater Wärmeentwicklung verwendet.

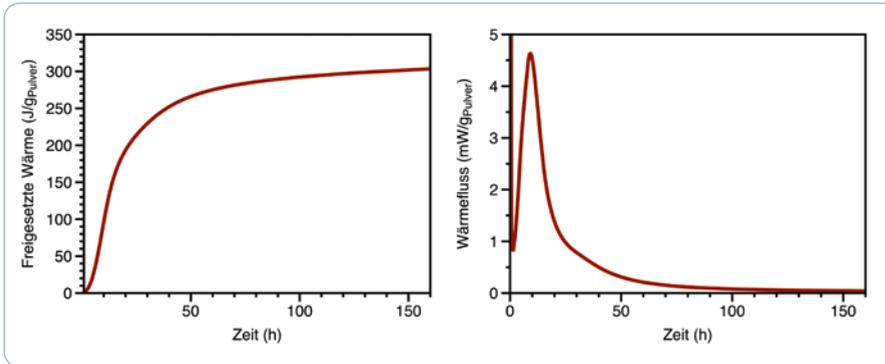


Bild 3.21 Wärmefreisetzungskurve eines Portlandzements (links). Rechts ist die Wärmeflusskurve desselben Zements zu sehen. Die Kurven wurden mit isothermer Kalorimetrie bestimmt.

3.4.3 Zementarten

Zemente sind streng genormte Bauprodukte, die regelmäßig intern und extern überwacht werden. In Deutschland wird die europäisch harmonisierte Norm DIN EN 197-1 [3.25] angewendet, um die Qualitätskriterien und die Arten von Zementen festzulegen. Zemente werden in fünf verschiedene Hauptgruppen eingeteilt:

- › CEM I – Portlandzemente: Bestehen zu 95 % aus Zementklinker (bis zu 5 % können nicht zu deklarierende Nebenbestandteile sein).
- › CEM II – Portlandkompositzemente: Zementklinker kann bis zu 35 % durch Ersatzstoffe ersetzt werden (Hüttensand, Flugasche, Mikrosilika, Gesteinsmehle, etc.); sie können aus mehr als einem Klinkerersatz-/Zusatzstoff bestehen.
- › CEM III – Hochofenzemente: Zwischen 35 und 95 % des Zementklinkers ist ersetzt durch Hüttensand.
- › CEM IV – Puzzolanzemente: Zwischen 11 und 55 % des Zementklinkers ist ersetzt durch Puzzolane (Mikrosilika, Flugasche, natürliche Puzzolane, calcinierte Tone).
- › CEM V – Kompositzemente: Zwischen 18 und 50 % des Zementklinkers ist ersetzt durch Hüttensand und ein Puzzolan (Flugasche, natürliche Puzzolane, calcinierte Tone); sie bestehen aus mehr als einem Klinkerersatzstoff.

Neben der Zusammensetzung werden drei Festigkeitsklassen unterschieden:

- › eine charakteristische Mindestfestigkeit von 32,5 MPa, bestimmt an Standardmörtelprismen nach 28 Tage Aushärtung,
- › eine Festigkeit von 42,5 MPa,
- › eine Festigkeit von 52,5 MPa.

Die Zemente unterscheiden sich außerdem in ihrer Hydratationswärme, Anfangsfestigkeit, dem Alkaligehalt und ihrem Sulfatwiderstand. Eine gute Übersicht der Zementarten und -eigenschaften findet sich unter der Webseite der deutschen Zement- und Betonindustrie [3.26].

3.4.4 Eigenschaften historischer Zementmörtel

Historische Zementmörtel wurden meist händisch hergestellt. Heute werden im Normalfall Mörtelfertigmischungen verwendet, die alle Mörtelkomponenten (Zement, Gesteinskörnung, Zusatzmittel) in den entsprechenden Mengenanteilen enthalten und die durch Mischen mit der vorgeschriebenen Menge an Wasser gebrauchsfertig sind. Dagegen wurden früher zur Mörtelherstellung alle Komponenten manuell über Volumenteile in den Mischtrog oder Mischer gegeben und dann entweder von Hand oder mit einfachen Mischern gemischt. Um die richtige Mörtelkonsistenz zu erreichen, wurde meist mehr Wasser (höhere W/Z-Werte) und Zement zugegeben als heute üblich. Außerdem können, bedingt durch das händische Bemessen und Mischen, deutliche Unterschiede in der Mörtelzusammensetzung und den Mörtel Eigenschaften auftreten.

Historische Zemente sind in der Regel wesentlich gröber gemahlen als heutige Zemente. Dadurch zeigen sich in mikroskopischen Dünnschliffen von historischen Zementmörteln eine größere Anzahl von größeren Restklinkerkörnern im Mörtelgefüge. Durch den höheren Wasser/Zement-Wert (W/Z-Wert) sind kleinere Zementklinkerkörner meist vollständig hydratisiert und die Matrix weist höhere Porositäten auf (Bild 3.22) [3.1].

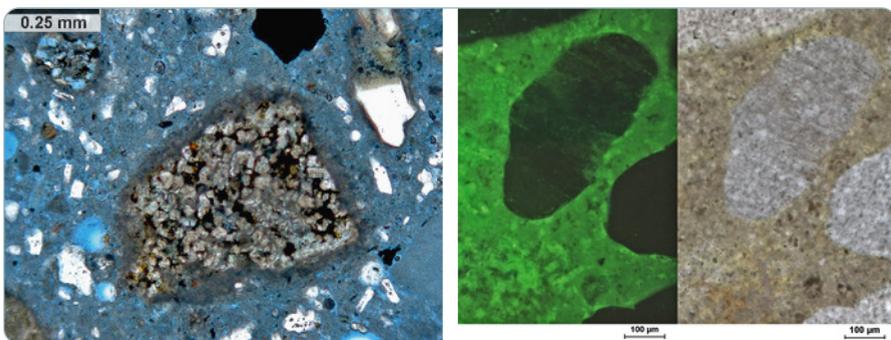


Bild 3.22 Mikroskopische Dünnschliffaufnahmen von historischen Zementmörteln: ein großes Restklinkerkorn (links); Bindemittel unter Durchlicht (rechts) und UV-Licht (Mitte). Die grüne Farbe im mittleren Foto weist auf eine hohe Porosität des mit fluoreszierendem Harz getränkten Bindemittels hin.

Da Zementmörtel meist andere mechanische Eigenschaften als andere historische Mörtel haben und darüber hinaus lösliche Alkalien in Form von NaOH und KOH, sowie Calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ besitzen, führt die unbedachte Anwendung von Zementmörteln in historischem Mauerwerk in manchen Fällen zu Folgeschäden. Ein zu steifer Zementmörtel schädigt bei Feuchte- und Temperaturwechseln weniger steife Steine (z. B. weiche Sandsteine, Kalksteine oder Ziegel). Das Auslaugen der löslichen Bestandteile in den Zementmörteln führt zur Kristallisation von Salzen in poröseren Mauersteinen, was zu deren schnellen Verwitterung beiträgt. Der Versuch aufsteigende Feuchte im Mauerwerk mit einem dichten Zementputz zu »kaschieren« führt dazu, dass die Feuchte aufgrund der Verdunstungsbehinderung wesentlich höher im Mauerwerk aufsteigt. Die Anwendung von Zement als Bindemittel in historischem Mauerwerk muss daher gut voruntersucht und abgewogen werden.

3.4.5 Romanzement

Romanzement ist eine frühe Form des modernen Zements, der Anfang des 19. Jahrhunderts erstmals angewendet wurde, später jedoch in Vergessenheit geriet. Er wurde anfangs zur Herstellung von unbewehrtem Stampfbeton benutzt, aber dann vom Portlandzement bei der Betonherstellung verdrängt [3.27].

Romanzement wurde ursprünglich aus natürlichen Kalkmergeln hergestellt. Mergel sind Gesteine, in denen Kalkstein und Tonstein zusammen vorkommen und dadurch eine natürliche Mischung zwischen Kalk und Ton vorliegt. Kalkmergel sind Mergel, bei denen Kalk der Hauptbestandteil und Ton ein Nebenbestandteil ist, im Gegensatz zu Tonmergel. Die Kalkmergel wurden zerkleinert und dann bei bis zu $1\,200\text{ }^\circ\text{C}$ in Schächtofen gebrannt. Dadurch ergab sich ein Bindemittel, das zum größten Teil aus Dicalciumsilikat C_2S und Calciumaluminaten bestand (zur Bildung von C_3S war die Brenntemperatur zu niedrig). Nach dem Brennen wurde der Zement gemahlen und z. B. als Sackware verpackt direkt auf der Baustelle angewendet. Durch die Phasenzusammensetzung bestehend aus C_2S und Ca-Aluminaten ist der Romanzement verhältnismäßig zügig erstarrt und musste deshalb schnell verarbeitet werden. Durch das schnelle Erstarren ergab sich eine höhere Anfangsfestigkeit, danach aber eine nur langsame weitere Erhärtung.

Romanzement wurde Mitte des 19. Jahrhunderts häufig als Materialkomponente zur Fassadengestaltung genutzt (Bild 3.23, Bild 3.24). In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wuchsen die urbanen Zentren in Europa sehr schnell und wurden teilweise komplett umgestaltet (z. B. Paris und London). Alte Quartiere wurden zerstört, Straßenzüge verbreitert und neue Plätze geschaffen. Neue Wohnsiedlungen entstanden in den Stadtzentren und am Rande der Metropolen. Die vorherrschende Tragkonstruktion war in dieser Zeit das Ziegelmauerwerk, da Ziegel durch die neue Technik des Strangpressens und des anschließenden Bren-

nens in den neuen Hoffmannschen Ringöfen kontinuierlich und in großen Mengen preisgünstig produziert werden konnten. Ziegelfassaden waren aber nicht immer gewünscht und eine Verkleidung des Ziegelmauerwerks durch Naturstein sehr teuer. Eine preisgünstige Alternative war das Versehen der Ziegelfassaden mit einem Putzmörtel basierend auf Romanzement [3.28] [3.29]. Die schnelle Erstarrung dieser Mörtel ermöglichte das Herausarbeiten von dekorativen Elementen, die steinmetzgerecht bearbeitetem Naturstein sehr ähnlich waren und dem damaligen Zeitgeschmack entsprachen. Dekorative Putzelemente für Hausfassaden konnten vorgefertigt werden und wurden in Musterkatalogen angeboten. Dies war möglich, da Romanzement neben dem zügigen Erstarren sehr gute Haftungseigenschaften und außerdem eine geringe Schwindneigung besitzt [3.30]. Vorteilhaft war auch die beige Farbe des Mörtels und eine hervorragende Verträglichkeit mit der ebenfalls zu dieser Zeit neu aufgekommenen Silikatfarbe.

Bild 3.23 Ziegelmauerwerk an einem Berliner Gründerzeithaus, welches mit einem dekorativen Romanzementputz versehen wurde, um eine Natursteinfassade nachzuahmen.





Bild 3.24 Imitation einer Natursteinfassade in Ljubljana, Slowenien (links). Die Putzdekoration aus Romanzementmörtel wurde mit einer Silikatfarbe versehen, um einen gräulichen Kalkstein zu imitieren.

Nach dem Ersten Weltkrieg änderte sich die Stilrichtung in der Architektur und mit dem Bauhaus und der modernistischen Bewegung wurden funktionale und einfache, klare Formen bevorzugt. Dekorative Elemente an Hausfassaden verschwanden fast vollständig und mit diesen auch der Bedarf an einem formbaren, schnell erstarrenden Bindemittel [3.31]. In Deutschland verschwand die Romanzementproduktion nach dem Ersten Weltkrieg komplett. In Südeuropa, z. B. in Spanien, wurde sie teilweise bis in die 1930er-Jahre aufrechterhalten [3.27]. Heute werden zwar keine Romanzemente mehr produziert, aber Belitzemente, die diesen ähnlich sind, werden noch teilweise zur Renovierung von Gründerzeitfassaden eingesetzt [3.28].

3.5 Lehmmörtel

Lehmmörtel lassen sich in Mauermörtel, Putze und Dünnlagenputze sowie Lehmanstrichstoffe einteilen [2.26] [2.28]. Bild 3.25 gibt einen Überblick über die verwendeten Ausgangsmaterialien und eventuelle Zusätze für heutige, industriell hergestellte Lehmbauprodukte wieder. Das Bild zeigt, dass für Lehmmauermörtel und Lehmputzmörtel in der Regel ein feinkörniger Baulehm verwendet und dann entsprechend abgemagert wird. Zusätzlich werden Fasern hinzugegeben, um die Schwindrissbildung besser unter Kontrolle zu haben. Putze werden in Lagen bis zu 15 mm aufgebracht. Dünnlagenputze werden meist aus reinem Ton und durch die Zugabe von Feinsand und weiteren Zusätzen (z. B. Cellulose) hergestellt. Sie werden in Lagendicken von nicht über 5 mm angewendet. Lehmanstrichstoffe sind zwar keine Putze, sie werden aber in Form von sehr dicken Farben bzw. Schlämmen auf den Untergrund aufgebracht [2.26].

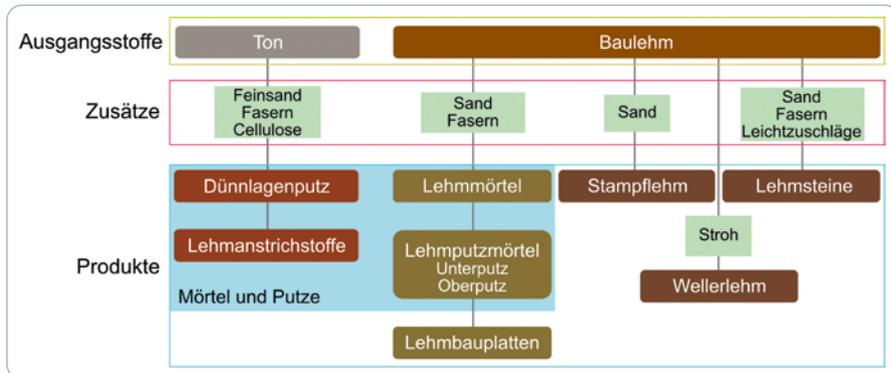


Bild 3.25 Einteilung von heutigen, industriell hergestellten Lehmbauprodukten bezüglich ihrer Ausgangsstoffe und Anwendung.

Alle Lehmmörtelprodukte erhärten durch Austrocknung. Bei der Erhärtung finden keine chemischen Reaktionen statt, sondern die Tonteilchen werden durch den Trocknungsvorgang eng aneinandergerückt, was ihre Bindekraft und damit die Festigkeit des Mörtels erhöht. Beim Befeuchten der Mörtel mit Wasser wird der Abstand der Tonteilchen wieder erhöht. Dies führt zu einer drastischen Verringerung der Festigkeit, wie bei den Lehmsteinen in Kapitel 2.3 erläutert wurde (Bild 2.44).

3.5.1 Herstellung

Traditionell wurden Lehmmörtel aus vorhandenem lokalem Lehm hergestellt, bei dem die Grobbestandteile ausgesiebt oder von Hand entfernt wurden. Mauermörtel wurde zur Errichtung von Lehmsteinmauerwerk verwendet. Bei Mauern aus Natursteinmauerwerk wurden Lehmmörtel häufig mit Kalk oder Zement versehen, in dem Versuch, deren Festigkeiten und Beständigkeit zu erhöhen. Lehmputze wurden im Innen- als auch im Außenbereich auf Lehmstein-, Ziegel- oder Natursteinmauerwerk aufgebracht (Bild 3.26). Im Fall starker Schwindneigung wurden gerne Strohfasern zugemischt, um die Schwindrissbildung zu kontrollieren. Die Faserzugabe erhöhte gleichzeitig die Biegezugfestigkeit, minderte in den meisten Fällen aber die Druckfestigkeit. Lehmmörtel wurden unter Zugabe von Wasser und ggf. Fasern wie jeder andere Mörtel in einen plastischen Zustand gemischt. Wenn die Mischung zu feinkörnig war, wurde mit Sand abgemagert. Bei Putzen sind zu fette Lehmmischungen anfällig für zu hohes Schwinden mit entsprechender Schwindrissneigung. Lehmputzmörtel wurden im Außenbereich häufig durch einen Kalkoberputz oder Kalkanstrich geschützt.

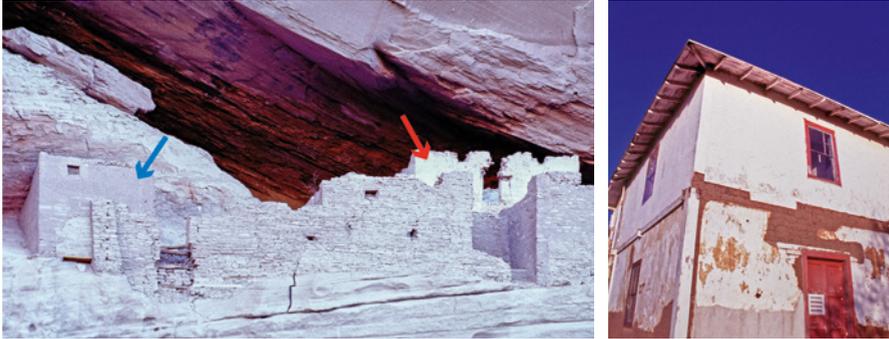


Bild 3.26 Historische Lehmmörtel und Lehmputze. White House Ruins, Canyon de Chelly, Arizona, U.S.A (links). Der blaue Pfeil zeigt Lehmputz, der rote Pfeil Lehmputz mit Kalkschlämme. Das Natursteinmauerwerk wurde mit Lehmmauermörtel hergestellt. Rancho Las Flores, Südkalifornien, U.S.A (rechts); Lehmsteinmauerwerk, gemauert und verputzt mit Lehmmörtel. Auf den Lehmputz wurde ein dünner Kalkputz aufgebracht.

Wie weiter oben erläutert, werden heutige Lehmmörtel aus feinkörnigem Bau-lehm hergestellt und dann durch Mischen mit entsprechenden Zusätzen (z. B. Sand, Fasern) den jeweiligen geforderten Eigenschaften angepasst. Durch diese Verfahrensweise können Werk trockenmörtel von konstanter und kontrollierter Qualität produziert werden, die auch maschinengängig angeboten werden [2.26]. Die Herstellung von Mörteln aus Baustellenlehm ist zwar machbar, aber ohne entsprechende Eignungsprüfungen und aus Qualitätsgründen weniger zu empfehlen. Heutige Lehmmörtel (mauern und verputzen), die als Werkmörtel in den Handel kommen, müssen den Anforderungen der DIN 18946 [3.32] und DIN 18947 [3.33] genügen.

3.5.2 Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften von Lehmmörteln liegen im Bereich von Luftkalkmörteln. In der Regel können für reine Lehmmörtel keine Druckfestigkeiten über 5 MPa erwartet werden [2.28]. Für Lehmmörtel liegen diese häufig zwischen 1 und 4 MPa. Das gilt auch für historische Lehmmörtel. Für Putzmörtel sind darüber hinaus die Haftzugfestigkeit, die Schwindneigung und der Oberflächenabrieb wichtig. Typische Dichten liegen im Bereich 1,0 bis 2,0 kg/dm³, entsprechende Druckfestigkeiten zwischen 1 und 3 MPa (Bild 3.27). Lehmputze haben außerdem eine gute Wasserdampfdiffusionsfähigkeit. μ -Werte liegen um den Wert 10; entsprechend ist der Transport von Feuchte aus und zur Innenraumluft durch einen entsprechenden Wandaufbau hervorragend.

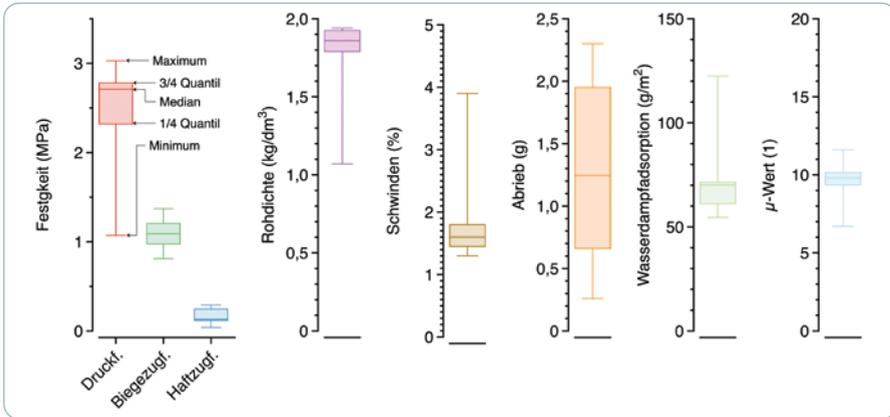
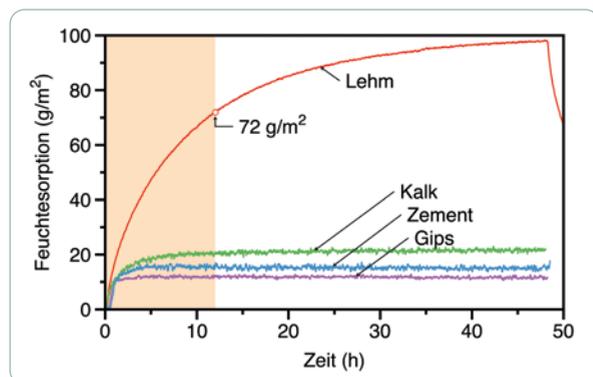


Bild 3.27 Einige Eigenschaften moderner Lehmputze, bestimmt an ca. 15 verschiedenen industriell hergestellten Mörteln und Putzen (nach [2.27]).

Neben der guten Wasserdampfdiffusion ist die Wasserdampfsorption von Lehmputzen hervorzuheben [2.28]. Diese beinhaltet, dass Lehmputze ein Vielfaches an Wasserdampf aufnehmen können, sollte die Innenraumluft infolge einer Temperaturabsenkung (z. B. in der Nacht) oder nutzungsbedingt (z. B. Küche, Bad) zeitlich begrenzt eine erhöhte relative Luftfeuchte aufweisen. Bei Senkung der Innenraumluftfeuchte, beispielsweise durch Heizen oder durch Lüften, kann die im Lehmputz gespeicherte Feuchte wieder an den Innenraum abgegeben werden. Lehmputze stellen deshalb einen sehr effektiven Feuchtepuffer dar, der die Kapazität anderer Putzmaterialien (Gips, Kalk, Zement) bei weitem übersteigt. Bild 3.28 zeigt Adsorptionskurven für Wasserdampf von verschiedenen Putzen. Es ist ersichtlich, dass Lehmputze nach 12 Stunden ungefähr eine dreimal höhere Wasserdampfsorption besitzen als Gips-, Kalk- oder Zementputze. Dies führt in der Praxis zu einem kontrollierten Raumklima, mit einer nicht zu hohen und nicht zu niedrigen relativen Luftfeuchte.

Bild 3.28 Wasserdampfadsorption verschiedener Putzmaterialien, wenn die relative Luftfeuchte von 50 % auf 80 % erhöht wird. Der 12-Stunden-Bereich, der einem normalen Tageszyklus entspricht, ist orange markiert.



Historische Lehmputze wurden meist aus lokal gewonnenen Rohstoffen zubereitet und weisen eine entsprechend hohe Variabilität in ihren Eigenschaften auf. Bild 3.29 zeigt ein Beispiel eines Putzaufbaus, wie er historisch zur Anwendung kam. Das Beispiel stammt von einem Adobehaus in Südkalifornien (Rancho Las Flores). Der Lehmputz wurde direkt auf das Lehmsteinmauerwerk aufgebracht. Die Putzprobe in Bild 3.29 wurde zwischen den Lehmsteinen entnommen, weshalb etwas von dem Mauermörtel anhaftete. Die Putzlage zeigte einen verhältnismäßig mageren (tonarmen) Lehm mit Korngrößen bis 2 mm. Der Putz war porös mit einem hohen Anteil an organischem Material. Eine Kalkschlämme wurde regelmäßig zum Schutz des Putzes aufgebracht. Bei genauerer Untersuchung zeigte sich, dass die Kalkschlämme aus mehreren dünnen Lagen bestand.

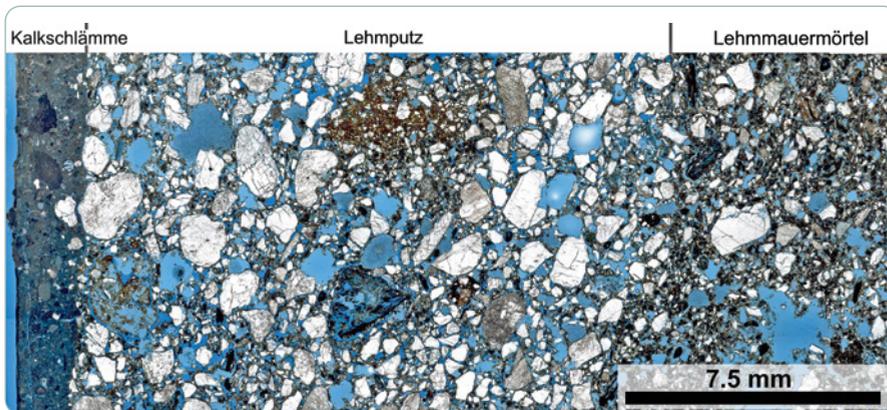


Bild 3.29 Dünnschliffbild eines historischen Lehmputzes von einem Lehmsteinhaus (Rancho Las Flores, Bild 3.26). Zu erkennen sind eine dichte Kalkschlämme, ein verhältnismäßig magerer Lehmputz und der Lehmmauermörtel. Der Porenraum ist blau eingefärbt.

Lehmputze sind schwierig zu konservieren, insbesondere, wenn sie dekorierte Oberflächen aufweisen, etwa in Form einer Bemalung auf einer dünnen Kalkputzschicht. Lehmputze, die sich vom Substrat lösen, können unter Umständen mit einem mineralischen Bindemittel, beispielsweise mit einem schwach hydraulischen Kalk, wieder an das Substrat angebunden werden. In allen Fällen ist mit Vorsicht vorzugehen und ein Einbringen von zu viel Feuchtigkeit ist zu verhindern.

3.6 Bindemittel und Mörtel – Regelwerke

3.6.1 Bindemittel

DIN EN 459-1. Baukalk – Teil 1: Definitionen, Anforderungen und Konformitätskriterien.

DIN EN 459-2. Baukalk – Teil 2: Prüfverfahren.

DIN EN 459-3. Baukalk – Teil 3: Konformitätsbewertung.

DIN EN 13454-1. Calciumsulfat-Binder, Calciumsulfat-Kompositbinder und Calciumsulfat-Werkmörtel für Estriche – Teil 1: Begriffe und Anforderungen.

DIN EN 13454-2. Calciumsulfat-Binder, Calciumsulfat-Kompositbinder und Calciumsulfat-Werkmörtel für Estriche – Teil 2: Prüfverfahren.

DIN EN 196-1. Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit.

DIN EN 196-2. Prüfverfahren für Zement – Teil 2: Chemische Analyse von Zement.

DIN EN 196-3. Prüfverfahren für Zement – Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit.

DIN EN 196-5. Prüfverfahren für Zement – Teil 5: Prüfung der Puzzolanität von Puzzolanzementen.

DIN EN 196-6. Prüfverfahren für Zement – Teil 6: Bestimmung der Mahlfeinheit.

DIN EN 196-7. Prüfverfahren für Zement – Teil 7: Verfahren für die Probenahme und Probenauswahl von Zement.

DIN EN 196-8. Prüfverfahren für Zement – Teil 8: Hydratationswärme – Lösungsverfahren

DIN EN 196-9. Prüfverfahren für Zement – Teil 9: Hydratationswärme – Teil-adiabatisches Verfahren.

DIN EN 196-10. Prüfverfahren für Zement – Teil 10: Bestimmung des Gehaltes an wasserlöslichem Chrom (VI) in Zement.

DIN EN 197-1. Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement.

DIN EN 197-2. Zement – Teil 2: Konformitätsbewertung.

Technisches Merkblatt TM05 : Qualitätsüberwachung von Baulehm als Ausgangsstoff für industriell hergestellte Lehmbaumstoffe – Richtlinie (Dachverband Lehm e. V.).

3.6.2 Mörtel

- DIN EN 998-1. Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau – Teil 1: Putzmörtel.
- DIN EN 998-2. Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau – Teil 2: Mauer-
mörtel.
- DIN V 18580. Mauermörtel mit besonderen Eigenschaften.
- DIN 18555. Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln.
- DIN 18946. Lehmmauermörtel – Begriffe, Anforderungen, Prüfverfahren.
- DIN 18947, Lehmputzmörtel – Begriffe, Anforderungen, Prüfverfahren.
- DIN EN 13914-1. Planung, Zubereitung und Ausführung von Innen- und Außen-
putzen – Teil 1: Planung und wesentliche Grundsätze für Außenputz.
- DIN 18550-1. Planung, Zubereitung und Ausführung von Innen- und Außen-
putzen – Teil 1: Ergänzende Festlegungen zu DIN EN 13914-1 für Außen-
putze.
- DIN EN 13914-2. Planung, Zubereitung und Ausführung von Innen- und
Außenputzen – Teil 2: Planung und wesentliche Grundsätze für Innen-
putz.
- DIN 18550-2. Planung, Zubereitung und Ausführung von Innen- und Außen-
putzen – Teil 2: Ergänzende Festlegungen zu DIN EN 13914-2 für Innen-
putze.
- DIN EN 16572. Erhaltung des kulturellen Erbes – Glossar für Mauermörtel,
Putzmörtel und Gipsmörtel zur Verwendung am kulturellen Erbe.
- DIN EN 1015-1. Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 1: Bestimmung
der Korngrößenverteilung (durch Siebanalyse).
- DIN EN 1015-2. Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 2: Probenahme
von Mörteln und Herstellung von Prüfmörteln.
- DIN EN 1015-3. Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 3: Bestimmung
der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch)
- DIN EN 1015-4. Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 4: Bestimmung
der Konsistenz von Frischmörtel (mit Eindringgerät)
- DIN EN 1015-6. Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 6: Bestimmung
der Rohdichte von Frischmörtel.
- DIN EN 1015-7. Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 7: Bestimmung
des Luftgehaltes von Frischmörtel.
- DIN EN 1015-9. Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 9: Bestimmung
der Verarbeitbarkeitszeit und der Korrigierbarkeitszeit von Frisch-
mörtel.
- DIN EN 1015-10. Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 10:
Bestimmung der Trockenrohddichte von Festmörtel.
- DIN EN 1015-11. Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 11: Bestimmung
der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel.

- DIN EN 1015-12. Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 12:
Bestimmung der Haftzugfestigkeit zwischen Putz und Untergrund.
- DIN EN 1015-14. Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 14:
Bestimmung der Dauerhaftigkeit von erhärtetem Mauermörtel (Festmörtel) (mit einem Zementanteil an der Gesamtbindemittelmenge von mehr als 50 %).
- DIN EN 1015-17. Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 17: Bestimmung des Gehalts an wasserlöslichem Chlorid von Frischmörtel.
- DIN EN 1015-18. Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 18:
Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme von erhärtetem Mörtel (Festmörtel).
- DIN EN 1015-19. Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 19: Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Festmörteln aus Putzmörteln
- DIN EN 1015-21. Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 21: Bestimmung der Verträglichkeit von Einlagenputzmörteln mit Untergründen.

4 BETON

4.1 Was ist Beton?

Beton ist weltweit das am meisten verwendete Baumaterial. Das liegt an seinem Preis, der universellen Verfügbarkeit der Ausgangsstoffe, seiner Qualität sowie seiner Dauerhaftigkeit und Leistungsfähigkeit. Es ist bisher das einzige Material, das im globalen Maßstab den Bedarf einer steigenden Weltbevölkerung und der Urbanisierung der Städte langfristig decken kann. Das Material wurde in der Antike entwickelt, geriet dann in Vergessenheit und wurde im 19. Jahrhundert wiederentdeckt, um seit dem 20. Jahrhundert der meistverwendete Baustoff zu werden (Bild 4.1). Mögliche Alternativen zu Beton sind in der nahen Zukunft nicht in Sicht und das Material wird wahrscheinlich noch sehr lange verwendet werden.



Bild 4.1 Drei Beispiele von Architektur mit Beton aus drei verschiedenen Zeitperioden. Die Jahrhunderthalle in Wrocław (Fertigstellung 1913, Architekt: Max Berg; links). Mitte: Sportpalast in Rom (Fertigstellung 1957, Architekt: Annibale Vitellozzi, Ingenieur: Pier Luigi Nervi). Königliches Nationaltheater in London, Fertigstellung: 1977, Architekt: Denys Lasdun; rechts).

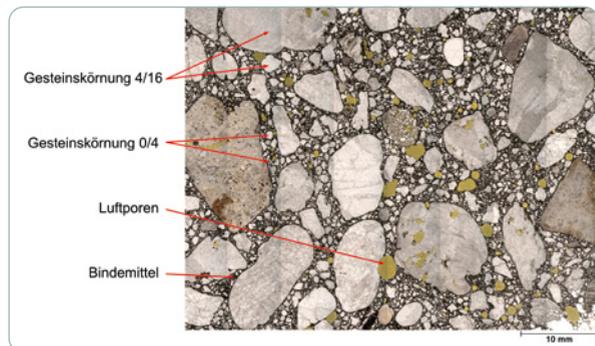
Beton kann als künstlicher Stein aufgefasst werden, der aus verschiedenen Komponenten zusammengemischt wird [4.1]. Per Definition besitzt Beton Gesteinskörnungen mit einem Größtkorn im Kiesbereich (>4 mm), die durch ein Bindemittel gebunden sind. Ein antikes Beispiel ist der römische Beton, bei dem das Bindemittel ein Kalk war, dem Puzzolanerde zugemischt wurde [4.2]. Als gröbere Gesteinskörnung wurde häufig Ziegelsplit verwendet, eine frühe Form des Recyclings.

Moderner Beton, der heute im Bauwesen eingesetzt wird, ist genormt und streng güteüberwacht. Die wichtigste Betonnorm ist die DIN EN 206 [4.3], die die Qualitätskriterien für Beton und dessen Ausgangsprodukte festlegt. Neben dieser europäisch harmonisierten Norm werden in fast jedem Land nationale Normen festgelegt, welche die Anwendung von Beton in den einzelnen Ländern bestimmen und lokale Gegebenheiten berücksichtigen, z. B. die Art der Ausgangsmaterialien oder die klimatischen Gegebenheiten.

Entsprechen der DIN EN 206 kann Beton die folgenden Komponenten besitzen (Bild 4.2):

- › Bindemittelmatrix:
 - › Zement nach DIN EN 197-1,
 - › Zugabewasser,
 - › Zusatzstoffe,
 - › Zusatzmittel.
- › Korngerüst:
 - › Gesteinskörnung der Größe 0 bis 4 mm (0/4 Sand),
 - › Gesteinskörnungen der Größe 4 bis 16 (4/16), 4 bis 32 (4/32) oder 4 bis 64 mm (4/64) – Kies (4/32, gerundet), Split (4/32, gebrochen), Schotter (32/64, gerundet/gebrochen).
- › Bewehrung:
 - › Baustahlstäbe oder -matten,
 - › Faserbewehrung (Stahl oder Polymer),
 - › Textilbewehrung (Glas- oder Carbonfasern).

Bild 4.2 Dünnschliffbild eines Betons. Es zeigt die unterschiedlichen Komponenten. Luftporen sind Luftblasen, die beim Mischen des Betons in die frische Masse gelangt sind. Der Porenraum ist gelb eingefärbt.



Das Bindemittel besitzt die Fähigkeit, Gesteinskörnung und Bewehrung zusammenzubinden und basiert heute überwiegend auf Portlandzement. Das Zugabewasser ist essentiell, da es erst die hydraulische Reaktion im Zement initiiert und das Material für eine bestimmte Zeit formbar macht.

Zusatzstoffe sind ein Bestandteil des Bindemittels und haben zwei Funktionen. Zum einen minimieren sie den Anteil an Zementklinker im Bindemittel, was den Beton nachhaltiger macht, da es sich bei Zusatzstoffen entweder um industrielle Reststoffe handelt oder um Gesteinsmehle, die mit wesentlich geringerem Energieaufwand gewonnen werden können. Zum anderen verbessern sie die Eigenschaften bezüglich der Verarbeitung und Dauerhaftigkeit des Betons. Bei Zusatzstoffen werden nach DIN EN 206 zwei verschiedene Typen unterschieden:

- › Typ I, inerte Zusatzstoffe, z. B. Gesteinsmehle oder Pigmente.
- › Typ II, reaktive Zusatzstoffe, wie Hüttensand, Flugasche, natürliche Puzzolane oder Mikrosilika.

Hüttensand (HS) ist eine Schlacke, die bei der Roheisenherstellung in Hochöfen anfällt [4.4]. Für die Verwendung in Zement oder Beton wird die Schlacke mit Wasser oder im Luftstrom abgeschreckt, was zu einem millimetergroßen Granulat führt (Bild 4.3). Das Granulat wird für die Herstellung von Hochofenzement zusammen mit dem Zementklinker in der Klinkermühle oder für die Anwendung in Beton separat in Kugel- oder Rollermühlen gemahlen und dann bei der Betonherstellung als Zusatzstoff zugemischt. Hüttensand hat Gehalte von 30–45 % CaO, 30–45 % SiO₂, 5–15 % Al₂O₃, 4–17 % MgO, 0,5–1 % S und Spuren anderer Elemente.

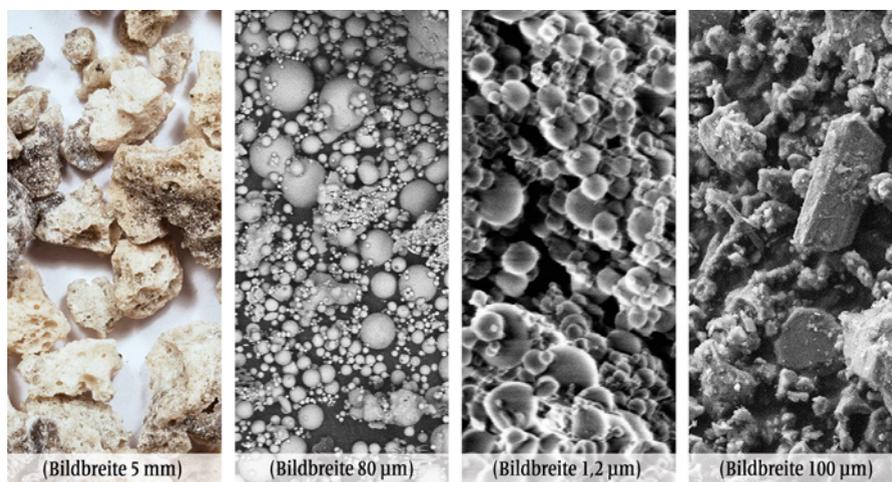


Bild 4.3 Verschiedene Zusatzstoffe, die im Beton eingesetzt werden können. Von links nach rechts: Granulierter Hüttensand, Steinkohleflugasche, Mikrosilika und Trass aus der Eifel. Die drei rechten Bilder wurden mit einem Elektronenmikroskop aufgenommen (in-lens Detektor).

Flugasche (FA) ist ein Restprodukt aus der Verbrennung von festen Brennstoffen (Kohle, Holz, landwirtschaftliche Abfälle, etc.) [4.5]. Flugasche wird aus den Rauchgasen z. B. der Kohlekraftwerke über Elektrofilter abgeschiedenen. Für die Verwendung in Beton braucht die Flugasche nicht weiter aufgemahlen zu werden, da sie schon ausreichend fein ist (Bild 4.3). In Europa sind nur Flugaschen mit einem Calciumoxidgehalt von 10 Masse-% oder darunter genormt (calciumarme FA aus der Steinkohleverbrennung). Für calciumreiche (>10 % CaO) Flugaschen aus der Braunkohle- oder Biomasseverbrennung ist eine bauaufsichtliche Zulassung oder eine Europäische Technische Zulassung notwendig. Steinkohleflugaschen besitzen Gehalte von 50–60 % SiO₂, 30–40 % Al₂O₃, ≤10 % CaO, ≤5 % (Na₂O, K₂O).

Mikrosilika (MS), manchmal auch als Silikastaub bezeichnet, ist ein Restprodukt, das beim Aufschmelzen von Quarz (SiO₂) und Reduktion von Quarz zu Silizium in Elektroöfen anfällt [4.6]. Wie Flugasche wird Mikrosilika über Elektrofilter aus den Rauchgasen abgeschieden. Mikrosilika hat einen SiO₂-Gehalt von über 90 % und ist lediglich durch Kohleverunreinigungen grau gefärbt. Kohle wird als Reduktionsmittel bei der Herstellung von Silizium verwendet. Mikrosilika ist viel feiner als Flugasche (Bild 4.3) und zeigt daher eine stärkere puzzolanische Reaktion.

Natürliche Puzzolane werden in Deutschland in Form von Trass [4.7] und Suevit [4.8] eingesetzt. Trass ist eine vulkanische Asche aus der Eifel, die schon seit Römerzeiten zur Herstellung hydraulischer Kalke und Kalkbetone verwendet wurde. Suevit ist ein Sediment, das beim Einschlag des Riesmeteoriten entstanden ist. Es besteht im Wesentlichen aus den beim Einschlag vorhandenen Gesteinen, die zertrümmert, in die Luft geschleudert und teilweise aufgeschmolzen wieder in den Krater zurückregneten. Beide Formen von Puzzolanen werden zur Zementherstellung verwendet, aber weniger zur Zubereitung von Beton.

Zusatzstoffe bestehen im Wesentlichen aus denselben Materialien, die auch dem Zement als Zuschlagstoff beigemischt werden können, welche die Zementtypen CEM II bis CEM V (vgl. Kapitel 3.4.3) bilden. Das Verwenden von Zusatzstoffen ist traditionell entstanden, da die Hersteller von Beton oftmals aus eigener Erfahrung und innerhalb der vorgegebenen Normen die Zusammensetzung des Bindemittels den Anforderungsbedingungen an den Beton entsprechend anpassen wollten. Das eröffnet den Betonherstellern mehr Möglichkeiten, als es die Anwendung von genormten Kompositzementen erlaubt.

Zusatzmittel dagegen sind chemische Komponenten, die dem Beton in geringen Mengen beigemischt werden, um bestimmte Eigenschaften zu erreichen [4.1] [4.9]. Hier einige Beispiele:

- › **Fließmittel** verbessern die Konsistenz des Betons, d. h. er lässt sich leichter verarbeiten und verdichten, wobei die Menge an Zugabewasser reduziert werden kann.
- › **Erstarrungsverzögerer** verhindern ein zu frühes Erstarren der Betonmasse im Mischfahrzeug bei Betonen, die über größere Distanzen transportiert werden müssen.
- › **Erstarrungsbeschleuniger** werden zugegeben, wenn ein sehr schnelles Erstarren des Betons erforderlich ist, z. B. bei Spritzbeton, der auf Tunnelwänden aufgebracht wird.
- › **Luftporenbildner** werden zugesetzt, um Beton frostbeständiger zu machen.
- › **Schwindreduzierer** minimieren das Schwinden des Betons. Insbesondere bei Betonen mit hohem Bindemittelanteil sind sie notwendig, weil diese zum Schwinden neigen und ein höheres Rissbildungsrisiko aufweisen.

Sand und Kies- bzw. Splittfraktionen werden im Beton **Gesteinskörnungen** genannt (bei Mörteln wird noch gerne der Begriff »Zuschlag« verwendet). Gesteinskörnungen werden entweder von fluviatilen bzw. glazialen Ablagerungen in Kiesgruben gewonnen (Flussschotter oder Gletschergeschiebe), aufbereitet (bei Bedarf gebrochen) und fraktioniert oder es werden Gesteine im Steinbruch in verschiedene Fraktionen gebrochen und sortiert (z. B. Granite, Gneise oder Basalte). In heutigen Betonen machen gebrochene Gesteinskörnungen aus Hartgesteinen in überwiegenden Fällen die Fraktionen ≥ 4 mm aus. Zwar werden in der Sandfraktion nach wie vor noch gut gerundete Sande aus Fluss- oder Gletscherablagerungen verwendet (beispielsweise im Oberrheingebiet, im Alpenvorland oder in Nordostdeutschland), es werden aber mehr und mehr Brechsande verwendet, da die natürlichen Sandablagerungen beinahe erschöpft sind und oftmals aus Umweltgründen keine neuen Schottergruben erschlossen werden können.

Gesteinskörnungen werden nicht willkürlich zugegeben, sondern müssen einem Sieblinienbereich nach DIN 1045 [4.26] folgen. Dadurch wird sichergestellt, dass nicht zu viel Fein- oder Überkorn in die Mischung eingebracht wird, was die Qualität des Betons verschlechtern würde. Nach DIN EN 206 können heute auch recycelte Gesteinskörnungen angewendet werden, wenn sie den Qualitätsanforderungen der entsprechenden Norm genügen [4.10]. Aus ökonomischen Gründen und mangels politischen Drucks finden diese jedoch noch keine weite Verbreitung.

Die Bewehrung wird im Beton eingesetzt, um ihm bessere Eigenschaften unter Zug- und Biegebeanspruchung zu verleihen. Beton hat eine einstellbare Druckfestigkeit, die über die Menge an Bindemittel und den W/Z-Wert geregelt wird. Die Zugfestigkeit von Beton ist jedoch ca. 10- bis 15-fach geringer. Außerdem hat unbewehrter Beton, wie alle anderen mineralischen Baustoffe, ein sprödes mechanisches Verhalten: Bei einer bestimmten Belastung versagt das Material plötzlich, ohne sichtbare Vorankündigung. Die Bewehrung bewirkt, dass der Beton

besonders bei Zug- und Biegebeanspruchung nicht plötzlich versagt, sondern nach Überschreiten seiner Festigkeit noch begrenzt Kräfte aufnehmen kann [4.11]. Zum Beispiel würde ein unbewehrter horizontaler Betonbalken bei vertikaler Überlastung plötzlich versagen (brechen). Ein mit Stahl bewehrter Betonbalken biegt zuerst durch und bildet in der Zugzone Risse. Die Bewehrung nimmt die entstehenden Zugkräfte auf und ermöglicht eine sichtbare Verformung des Balkens, bevor das Versagen eintritt. Ein solches Materialverhalten trägt im Falle einer Überbeanspruchung von Bauteilen erheblich zur Sicherheit eines Bauwerks bei. Weiterhin wird die Bewehrung zur Begrenzung der Rissneigung von Beton eingesetzt. Beton hat im erhärteten Zustand ein geringeres Volumen als Frischbeton – er schwindet während der Erhärtung. Wird das Schwinden von Beton beispielsweise durch die Geometrie eines Bauteils behindert, bilden sich Risse. Risse im Beton sind allgegenwärtig. Die Bewehrung hat die zusätzliche Aufgabe, die Anzahl der Risse und deren Breiten zu begrenzen [4.12].

Stahl- bzw. Eisenbewehrungen werden seit der Mitte des 19. Jahrhunderts verwendet. Heutige Bewehrungsstäbe und Stahlmatten sind gerippt. Sie zeichnen sich durch auf zwei Seiten schräg verlaufende Rippen aus (Bild 4.4). Die Rippen verbessern wesentlich die Verbundeigenschaften zum Beton [4.11]. Vor dem Zweiten Weltkrieg wurden ungerippte, glatte Stäbe, Matten oder Flacheisen verwendet (Bild 4.4). Oftmals war es erwünscht, dass die Stahlbewehrung vor dem Einbringen in den Beton etwas korrodiert war, da durch die raueren korrodierten Oberflächen des Stahls ein besserer Haftverbund zum Beton erreicht wurde. In neuerer Zeit werden auch glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) als Bewehrung eingesetzt, meist in Form von Stäben [4.13]. GFK-Stäbe sind in der Regel nicht gerippt, sondern weisen zur Verbesserung des Haftverbunds entweder eine angeklebte Sandschicht auf oder ein Gewinde bzw. spiralförmig angeklebte Glasfaserbündel (Bild 4.4). Bewehrungen aus GFK haben nicht dieselben Eigenschaften wie Stahl und sind teurer. In bestimmten Situationen kann bei der Instandsetzung von historischen Bauwerken jedoch diese Art der Bewehrung vorteilhaft sein, wenn z. B. auf eine Bewehrung nicht verzichtet werden, aber ein ausreichender Korrosionsschutz nicht gewährleistet werden kann. Neben Bewehrungen in Form von Stäben oder Matten setzt sich immer mehr die Faserbewehrung durch, besonders bei Fußböden, Spritzbetonanwendungen oder Fertigteilen [4.14]. Neben Stahlfasern werden zunehmend Kunststofffasern verwendet. Fasern verbessern die mechanischen Eigenschaften des Betons und verringern die Rissneigung. Zuletzt sollen Bewehrungen aus Textilien genannt werden (Bild 4.4). Textilbewehrungen kommen zunehmend zum Einsatz, wo Bauteile schlank und geringer in der Masse sein müssen [4.15], wie zum Beispiel Fassadenelemente [4.16]. Aber auch zur schonenden und nachhaltigen Reparatur eignen sich Textilbewehrungen in Verbindung mit einem mineralischen Mörtel [4.17]. Die Textilien bestehen aus Glas-

oder Carbonfasern, die in ein Reaktionsharz getaucht wurden. Verwendet werden entweder Textilnetze oder -gewebe.



Bild 4.4 Verschiedene Arten der Bewehrung in Beton. Von links nach rechts: Glatte Stahlstäbe, gerippte Stahlstäbe, GFK-Bewehrung mit Gewindegängen, Textilbewehrung bestehend aus einem Carbonfasernetz, das in Epoxidharz getränkt wurde (mittlere zwei Bilder: © ZRS Architekten Ingenieure, Berlin)

4.2 Bezugsgrößen bei frischem und erhärtetem Beton

Die Betonkomponenten werden im Raummaß abgemessen und zugemischt. Hierbei wird angegeben wie viele Volumenteile gebraucht werden, um einen Kubikmeter Beton herzustellen:

- › $V_B = 1 \text{ m}^3 = V_{GK} + V_Z + V_W + V_{ZS} + V_{ZM} + V_{LP}$
 B = Beton; GK = Gesteinskörnung; Z = Zement; W = Wasser; ZS = Zusatzstoffe;
 ZM = Zusatzmittel; LP = Luftporen.

Da das Abmessen von exakten Volumina, besonders, wenn diese in Form von Körnern oder Partikeln vorliegen, sehr schwierig ist, werden die Volumenanteile der einzelnen Komponenten über deren Dichte in Massen umgerechnet. Massen können einfach mit einer Waage bestimmt werden:

- › $V_B = 1 \text{ m}^3 = m_{GK}/\rho_{GK} + m_Z/\rho_Z + m_W/\rho_W + m_{ZS}/\rho_{ZS} + m_{ZM}/\rho_{ZM} + V_{LP}$

Zu beachten ist, dass es sich bei den Dichten (ρ) um Rein- und nicht um Schüttdichten handelt. Die Mengen der unterschiedlichen Komponenten sind auf einen Kubikmeter Beton normalisiert und werden deshalb in kg/m^3 angegeben.

Das Zugabewasser wird ebenfalls durch Wiegen genau abgemessen. Da das Wasser ausreichen muss, um das Bindemittel chemisch abzubinden, wurde der W/Z (Wasser/Zement-Wert) bzw. W/B (Wasser/Bindemittel-Wert) definiert. Der W/Z-Wert gibt die Massenanteile des Wassers im Verhältnis zum Zement an. Der Bindemittelwert wird angegeben, wenn Zusatzstoffe in Form von Flugasche, Hüttensand oder Mikrosilika beigemischt werden. Da diese Stoffe zum Abbinden beitragen, wurde der k-Wert eingeführt, der die Reaktivität des Stoffes im Vergleich zum Zement angibt: Ein Wert von 0,5 gibt an, dass der Zusatzstoff halb so reaktiv wie Zement ist. Für Flugasche ergibt sich ein k-Wert von 0,4, für Hüttensand ein k-Wert von 0,6 und für Mikrosilika ein k-Wert von 1,0. Mithilfe der k-Werte lässt sich ein effektiver W/Z-Wert und W/Z_{eff} berechnen [4.1] [4.3]:

$$\frac{W}{Z_{\text{eff}}} = \frac{m_{\text{Wasser}}}{m_{\text{Zement}} + k \cdot m_{\text{Zusatzstoff}}}$$

Bei der Formulierung von Betonrezepturen werden normalerweise die Mengen des Zements und der Zusatzstoffe (wenn verwendet) sowie der W/Z-Wert vorgegeben und die Menge an Gesteinskörnung berechnet. Der Luftporengehalt wird bei Betonen ohne Luftporenbildner im Bereich 1 bis 2 % angenommen. Wird ein Luftporenbildner zur Verbesserung der Frostbeständigkeit zugemischt, wird in den meisten Fällen ein Luftporengehalt zwischen 4 und 6 % eingestellt. Tabelle 4.1 zeigt ein Berechnungsbeispiel und alle drei Werte von W/Z, W/B und W/Z_{eff} . Deutlich ist zu sehen, dass der W/B-Wert wesentlich kleiner als der W/Z-Wert ist; der W/Z_{eff} -Wert liegt dazwischen. Je nach k-Wert ist er dem W/B-Wert näher (z. B. im Fall von Mikrosilika) oder dem W/Z-Wert (im Fall von Flugasche).

Komponente	Masse in kg/m ³	Dichte in kg/m ³	Volumen in m ³
Zement	320	3 100	0,103
Flugasche	96	2 540	0,038
Wasser	185	995	0,185
Fließmittel	5	1 090	0,005
Gesteinskörnung (0/16)	1 720	2 650	0,649
Luftporenvolumen (2 Vol.-%)			0,02
Gesamt	2 326		1,000
W/Z-Wert in Masseteilen	0,578		
W/B-Wert in Masseteilen	0,445		
W/Z_{eff}	0,516		

Tabelle 4.1 Beispiel einer Mischungszusammensetzung eines modernen Betons.

Bei der Verarbeitung von Beton spielt die Konsistenz des frischen Materials eine wichtige Rolle. Bis Anfang des 20. Jahrhunderts wurden Betonkonstruktionen häufig mit erdfeuchtem Beton hergestellt. Bei dieser Konsistenz wird der Wasser- und Bindemittelgehalt so eingestellt, dass der Frischbeton praktisch keine Plastizität aufweist. Der Frischbeton muss dann mit viel Kraft in eine Schalung eingestampft werden (daher der Name »Stampfbeton«). Der Vorteil dieser Konsistenz ist jedoch, dass nach relativ kurzer Zeit die Schalung entfernt werden kann, ohne dass der noch sehr frische Beton davonfließen würde. Die erdfeuchte Konsistenz wird deshalb heute noch häufig bei der Herstellung von Betonwaren, wie Betonsteine oder Betonrohre, verwendet, da nach dem Einfüllen und mechanischem Einrütteln der erdfeuchten Mischung die Form sofort entfernt wird und dadurch große Mengen an Steinen in kurzer Zeit hergestellt werden können. Heutiger normaler Frischbeton besitzt eine plastische Konsistenz, d. h. der Beton setzt sich nach dem Einfüllen in eine Form von selbst ein gewisses Maß, muss aber mechanisch verteilt und durch Vibration (z. B. Rüttelflaschen) verdichtet werden. Bei einer neueren Technik, die seit ca. zehn Jahren verbreitet ist, wird der Beton fließfähig eingestellt. Sogenannte selbstverdichtende Betone (SVB) müssen nicht mehr mechanisch verteilt und durch Vibration verdichtet werden. SVB sind jedoch nicht so robust wie Normalbetone und werden deshalb am häufigsten in der Betonfertigteilerstellung eingesetzt. Die Konsistenz von Beton wird in Klassen eingeteilt, die in der DIN EN 206 festgelegt sind.

In DIN EN 206 finden sich auch die Festigkeitsklassen von Betonen wieder. Die Europäische Normung erlaubt die Druckfestigkeitsprüfung an Würfeln und an Zylindern. Entsprechend werden bei der Angabe der Druckfestigkeitsklassen zwei Werte genannt, einer für die Prüfung am Zylinder und einer für die Prüfung am Würfel. Druckfestigkeitsklassen nach DIN EN 206 beginnen bei C8/10 und gehen bis C100/115, was bedeutet, dass bei der geringsten Klasse am Zylinder 8 MPa bzw. am Würfel mindestens 10 MPa und bei der höchsten am Zylinder 100 MPa und am Würfel 115 MPa erbracht werden müssen. Für Leichtbetone gelten eigene Klassen die von LC8/9 bis LC80/88 reichen.

Bei der Angabe des Festigkeitswerts nach DIN EN 206 handelt es sich nicht um den Mittelwert aus mehreren Prüfkörpern, sondern um deren charakteristische Druckfestigkeit. Die charakteristische Druckfestigkeit ist das 5 % Perzentil aller ermittelten Festigkeiten der Prüfkörper, d. h. es ist der Wert, der beschreibt, dass 95 % aller Ergebnisse gleich der charakteristischen Festigkeit oder darüber sind. Dies ist besonders dann zu berücksichtigen, wenn die Festigkeitswerte von Altbetonen in moderne Druckfestigkeitsklassen nach DIN EN 206 eingeordnet werden sollen.

4.3 Die Geschichte des Betons und seine heutige Bedeutung

Beton wurde bereits im Altertum entwickelt und im Römischen Reich breit angewendet [4.2]. Die Römer entdeckten, dass beim Zumischen eines bestimmten Stoffes vulkanischen Ursprungs ein Kalkmörtel wesentlich widerstandsfähiger wurde, höhere Festigkeiten erreichte und im feuchten Zustand aushärtete. Später entdeckten sie eine ähnliche Wirkung beim Zumischen von Ziegelmehl. Da die römischen Armeen weite Teile von Süd- und Mitteleuropa, Nordafrika sowie Teile des Nahen Ostens erobert hatten, verbreitete sich die Technologie der Mörtel- und Betonzubereitung mit formulierten hydraulischen Bindemitteln in der antiken Welt. Dabei nutzten die Römer nicht nur die Puzzolane aus Süditalien, sondern auch Puzzolanlagerstätten in den jeweiligen eroberten Ländern, z. B. den Trass in Westdeutschland, Tufflagerstätten in Ungarn oder vulkanische Aschen in Griechenland.

Neben der Zugabe von Sand verwendeten die Römer auch größere Gesteinskörnungen, was aus einem hydraulischen Kalkmörtel einen Beton mit hydraulischem Kalkbindemittel machte. Mit diesem neuen Material, einem künstlichen Stein, revolutionierten sie die damalige Bauweise und Architektur. Bauteile mussten nicht mehr mühsam aus Mauerwerk hergestellt, sondern konnten durch Einbringen und Verdichten in Schalungen geformt werden. Zum Beispiel konnten Gewölbe und Kuppeln aus Beton hergestellt werden, wie zahlreiche Beispiele aus Rom zeigen (Bild 4.5) [4.18]. Die Kuppel, mit der größten Spannweite aus unbewehrtem Beton besitzt das Pantheon in Rom [4.19]. Durch die gezielte Verwendung von Leichtzuschlägen konnten beim Bau der Kuppel des Pantheons die Dichte des Betons sukzessive zum Scheitel hin verringert und dadurch das Tragverhalten der gesamten Baukonstruktion optimiert werden (Bild 4.5).



Bild 4.5 Caracalla Thermen in Rom: Wände und Kuppel sind aus römischem Beton, der mit einer dünnen Ziegelschale verkleidet und mit einem Kalkstuck dekoriert war (links). Kuppel des Pantheons in Rom. Verwendet wurde ein Leichtbeton mit variierender Dichte (rechts).

Beton wurde im 19. Jahrhundert überwiegend in Stampfbauweise mit erdfuchtem Material hergestellt. Im antiken Griechenland finden sich Vorbilder für diese Stampfbauweise, die bis in das zweite Jahrhundert v. Chr. zurückreichen (Emplekton = Eingestampftes) [4.20]. Nach der Einführung des Romanzements wurde es erstmals möglich, massive, unbewehrte Betonbauwerke, meist in Stampfmanier, herzustellen. Gleichzeitig konnten unbewehrte Betonwaren in Form von Blumenkübeln, Statuen oder anderen Gegenständen produziert werden [4.21]. Nach der Entwicklung des Portlandzements verbreitete sich die Betonbauweise sukzessive, insbesondere nachdem der Franzose Joseph Monier erfolgreich die Rissbildungsneigung und die niedrige Zugfestigkeit von Beton durch Eisenbewehrung kompensieren konnte. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts entwickelte François Hennebique ein System der Stahlbewehrung in Beton, das Stützen und Deckenbalken monolithisch verband (Hennebique-System) [4.22]. Dieses System stellte die erste moderne Anwendung einer monolithischen Bauweise dar, die eine neue Art der schlanken Tragkonstruktion mit Betonträgern und -balken ermöglichte (Bild 4.6). Über die Jahre verfeinerte sich das Designkonzept für Betontragkonstruktionen, vor allem nachdem das Material erfolgreich für vielstöckige Hochbauten eingesetzt wurde.



Bild 4.6 Links – System Hennebique (Quelle: [4.23]). Betontragrahmen in einem Gewerbegebäude aus dem 19. Jahrhundert (rechts)

Schon relativ früh, im Jahr 1902, wurde Transportbeton patentiert. Das Verfahren setzte sich jedoch erst viel später durch, da zu Anfang immer noch überwiegend Baustellenmischungen vorherrschten. Einen Schub bekam das Bauen mit Beton, nachdem 1925 die ersten Normen, DIN 1045, DIN 1047 und DIN 1048, für bewehrten Beton und Betonkonstruktionen veröffentlicht wurden. Diese gaben eine Bemessungsgrundlage und Materialanforderungen im praktischen Gebrauch wieder.

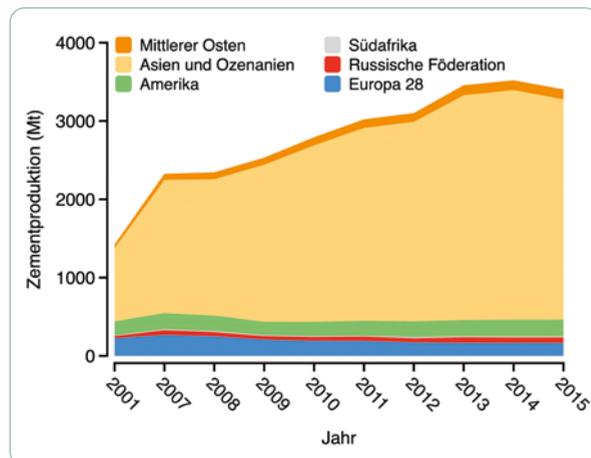
Erste längere Straßenabschnitte aus Beton wurden 1929 unter Verwendung von Stahlgewebematten gebaut [4.1]. 1948 wurde in Westdeutschland die erste Spann-

betonbrücke, die Kanalhafenbrücke bei Heilbronn, eingeweiht. In den folgenden 1950er-Jahren setzte sich bei der Herstellung der Transportbeton durch, bei dem der Beton unter kontrollierten Bedingungen im Betonwerk gemischt und dann mit dem Transportmischer auf die Baustelle gefahren wurde. Nach dem Krieg wurden Bauteile zunehmend in Betonfertigteilwerken hergestellt und auf der Baustelle zusammengefügt, z. B. im Wohnungsbau der 1960er- und 1970er-Jahre. In den 1990er-Jahren wurde selbstverdichtender und Hochleistungsbeton entwickelt, die heute zunehmend eingesetzt werden.

Heute kann man Beton als das wichtigste konstruktive Material im Bauwesen ansehen. Zwar wird Stahl nach wie vor eingesetzt, ist jedoch im Preis-Leistungs-Verhältnis dem Beton unterlegen. Auch aus ökologischer Sicht ist die Herstellung von Stahl, selbst unter Verwendung von Altmetall, wesentlich energieintensiver als die von Beton: der Primärenergiegehalt von Stahl beträgt ca. 20 MJ/kg, der von bewehrtem Beton ca. 2 MJ/kg.

Weltweit werden jährlich ca. 3,8 Milliarden Tonnen Zement hergestellt (Bild 4.7) [4.24]. Der überwiegende Anteil geht in die Produktion von Beton, was ungefähr einer Menge von 20 Milliarden Tonnen entspricht. Dies ist ein Volumen von acht Kubikkilometer Beton, die pro Jahr benötigt werden oder anders ausgedrückt, ein Würfel mit je zwei Kilometer Kantenlänge. Diese Menge an Baumaterial lässt sich nicht durch andere Materialien ersetzen, ohne die Ökosphäre einschneidend zu verändern. Zwar ist die Herstellung von Zement für ca. sechs Prozent der weltweiten CO₂-Emissionen verantwortlich. Für Alternativmaterialien sind Rohstoffe derzeit jedoch nicht in ausreichenden Quantitäten vorhanden, diese Materialien haben minderwertige Eigenschaften oder sind bei der Herstellung energieintensiver als Beton.

Bild 4.7 Weltzementproduktion von 2001 bis 2015 (Regionen mit geringerer Zementproduktion sind nicht berücksichtigt), [4.24].



4.4 Herstellung

Beton wird durch Vermischen der Ausgangskomponenten Zement, Gesteinskörnung, Wasser, Zusatzstoffe und Zusatzmittel im Zwangsmischer gemischt [4.1]. Die Bestandteile werden präzise in den Mischer eingewogen. Dies erfolgt heute automatisch und unter kontrollierten Bedingungen im Betonwerk [4.25]. Der eigentliche Mischvorgang dauert drei bis vier Minuten, dann kann die nächste Charge eingewogen werden.

Beton, der auf der Baustelle verarbeitet wird, wird im Transportbetonwerk hergestellt, das normalerweise nicht weiter als ein bis zwei Stunden entfernt ist. Es gibt auch mobile Betonwerke, die in unmittelbarer Nähe zur Baustelle platziert werden können. Die Herstellung von Beton durch händisches Mischen bzw. im Freifallmischer, wobei die Ausgangsstoffe manuell per Augenmaß zugegeben werden, existiert in Deutschland so gut wie nicht mehr. Dies ist eine Folge der Qualitätsanforderungen an Beton als konstruktivem Baustoff, die in DIN EN 206 [4.3] und DIN 1045 [4.26] geregelt sind.

Neben Transportbeton werden im Bauwesen Betonfertigteile verwendet, die nicht auf der Baustelle gegossen, sondern in einem Betonfertigteilwerk vorgefertigt und dann auf der Baustelle montiert werden [4.27]. Der Vorteil von Betonfertigteilen ist die Vorfertigung in einem kontrollierten Umfeld (hier einer Fabrikhalle), das unabhängig vom Außenklima ist. Der Nachteil besteht darin, dass nur teilweise monolithisch gebaut werden kann. Fertigteile müssen durch Konstruktionsfugen verbunden werden, die entweder verschraubt sind oder über Zapfen/Dübel und Verpressen zusammengefügt werden.

4.5 Eigenschaften historische Betone

Historische Betone wurden vor dem Zweiten Weltkrieg häufig händisch direkt auf der Baustelle verarbeitet. In der Regel wurden in dieser Zeit geringere Zementgehalte für Betone verwendet. Die Zementgehalte heute üblicher Betone liegen im Bereich zwischen 320 bis 420 kg/m³, bei den historischen Betonen sind es meist unter 300 kg/m³ (Bild 4.8) [4.28]. Diese Betone weisen infolgedessen mehr Verdichtungsporen auf und sind im Ganzen poröser als die heutigen Betone (Bild 4.9). Häufig besitzt die Gesteinskörnung alter Betone eine Kornabstufung, die heute nicht mehr verwendet wird [4.20].

Bild 4.8 Gefüge eines historischen Betons aus den 1920er-Jahren, der einen extrem geringen Zementgehalt aufweist. Der Beton stammt von einem Stauwerk des Neckars bei Stuttgart (Dünnschliffbild mit gelber Epoxydeinbettung).

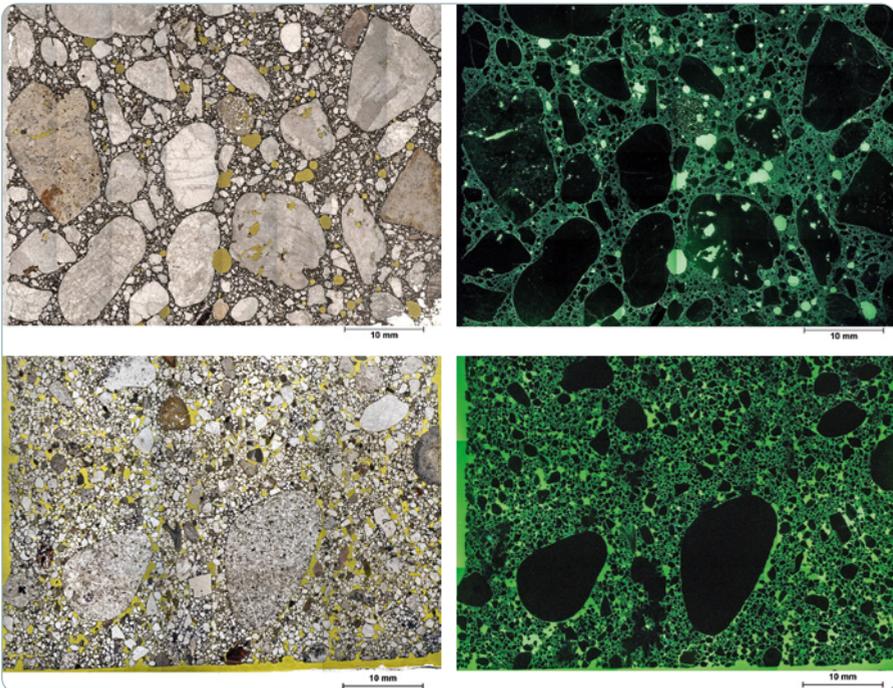
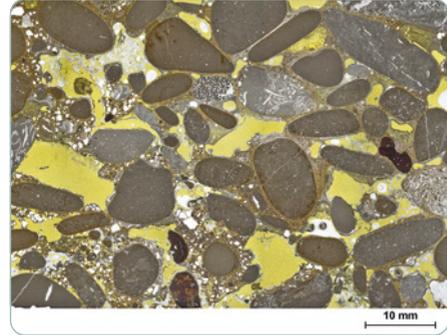


Bild 4.9 Vergleich des Gefüges eines modernen Betons (oben) mit einem, der in 1930er-Jahren hergestellt wurde (unten). Deutlich sind unter UV-Licht (rechte Bildspalte) in dem alten Beton auffällig viele kleinere Poren erkennbar. Auffällig ist auch, dass die Gesteinskörnung im Altbeton nicht den heutigen Anforderungen an die Kornabstufung entspricht (Dünnschliffbilder; Porenraum in gelbes fluoreszierendes Epoxidharz eingebettet).

Der geringere Zementgehalt, die erhöhte Porosität und die nicht mehr üblichen Kornabstufungen erbringen im Normalfall geringere Festigkeiten, als heutige Betone sie aufweisen. Dies ist besonders bei der Umnutzung von Bauwerken zu berücksichtigen, die ein Betontragwerk aufweisen. Bevor Gebrauchslasten erhöht werden, sollten die Festigkeitseigenschaften der vorhandenen Betone durch Materialuntersuchungen geprüft werden. Die Materialuntersuchungen sollten Teil einer gründlichen Bestandsaufnahme sein, bei der der Zustand der Tragkonstruktion, des Betons und der Bewehrung bewertet werden.

Historische Betone können unterschiedliche Bindemittelzusammensetzungen aufweisen. Neben reinem Portlandzement wurden seit den 1880er-Jahren auch Hochofenzemente produziert, die Portlandzementklinker und unterschiedliche Anteile an Hüttensand (granulierte und gemahlene Hochofenschlacke) enthielten. Zur damaligen Zeit wurden sie als Eisenportlandzemente bezeichnet (Bild 4.10). Weiterhin wurde frühzeitig Trasszement verwendet, der neben Portlandzementklinker auch Trass enthielt, ein natürliches Puzzolan vulkanischen Ursprungs, das in der Eifel noch heute abgebaut wird.

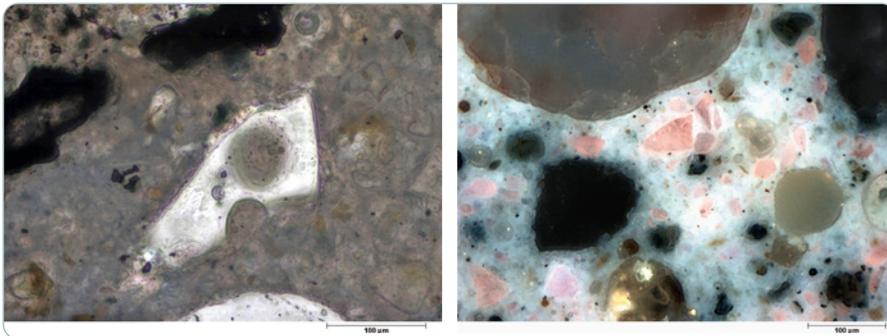


Bild 4.10 Dünnschliffe von Hüttensand in Beton mit Hochofenzement. Ein typisches scharfkantiges Korn (links). Rosa fluoreszierende Hüttensandkörner unter UV-Licht (rechts).

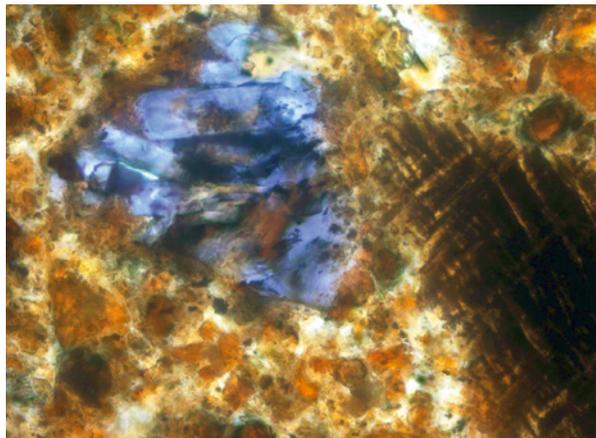
Typisch für Betone mit Hochofenzement ist deren bläuliche Farbe im frischen Zustand. Nach Oxidation der Oberfläche wandelt sich die Farbe von bläulich nach hellgrau um [4.1] (Bild 4.11). Betonoberflächen mit Hochofenzement sind deshalb wesentlich heller als Oberflächen mit Portlandzement. Allerdings kann bei relativ jungen Bauwerksoberflächen die bläuliche Farbe durchkommen (Bild 4.11), was unter Umständen bei Sichtbetonoberflächen zu Beanstandungen führen kann.

Bild 4.11 Bohrkern eines hochfocenzementhaltigen Betons (links). Typisch graubläuliche Sichtflächen von Beton mit Hüttensand (rechts).



Bis kurz nach dem Zweiten Weltkrieg wurden für tragende Konstruktionen gelegentlich Aluminatzemente im Beton eingesetzt (Bild 4.12). Anders als beim Portlandzement reagiert Aluminatzement mit Wasser zu Calciumaluminat-hydraten. Der Vorteil dieser Zemente ist eine schnelle Festigkeitsentwicklung [4.29]. Der Nachteil ist, dass sich unter ungünstigen Bedingungen während der Nutzung eines Bauwerks instabile Reaktionsprodukte bilden können, welche die Festigkeit und damit auch die Tragfähigkeit eines Bauteils drastisch reduzieren [4.29]. Aufgrund von Konstruktionsversagen bei Betonbauteilen, die mit Aluminatzement hergestellt wurden, ist dieser seit Anfang der 1950er-Jahre nicht mehr für tragende Bauteile zugelassen.

Bild 4.12 Hydratphasen im Aluminatzement, bestehend größtenteils aus eisenhaltigen Calciumaluminathydratphasen (Dünnschliffbild).



Andere Bindemittelbestandteile, wie Flugasche oder Mikrosilika werden erst seit den 1970er- bzw. 1980er-Jahren eingesetzt [4.5] [4.30]. Die Verwendung von Flugasche macht die Betonfarbe etwas dunkler, erhöht aber die Betondauerhaftigkeit. Historische Betone und Betonwaren können in seltenen Fällen anstatt natürlicher Gesteinskörnung Stahlschlacke (z. B. Kupolofenschlacke) enthalten. Dieser Typ von Gesteinskörnung wurde noch bis in die 1920er-Jahre verwendet. Tabelle 4.2 gibt einen Überblick über makroskopische und mikroskopische Eigenschaften von historischen Betonen mit unterschiedlichen Bindemitteln.

Bindemittel	Farbe, makroskopisch	Mikroskopische Merkmale im Dünnschliffpräparat			
		nicht hydratisierte Bestandteile	Hydratphasen/ Matrix	Gefüge	sonstiges
Portlandzement (PZ)	grau; carbonatisiert: beige	Klinkerkörner, bestehend aus Alit (C_3S) und/oder Belit (C_2S) mit bräunlicher Schmelzphase aus C_4AF und C_3A	feinkörnige Matrix aus CSH Phasen; Calciumhydroxid (CH) in Matrix, in Rissen und Luftporen; Ettringit in Rissen und Luftporen	Porosität abhängig vom W/Z-Wert, meist höherer Kapillarporenanteil; bei händischer Verarbeitung zahlreiche Luft- und Verdichtungsporen	bei gekreuzten Polarisatoren: nicht carbonatisiert erscheint die Zementsteinmatrix schwarz; carbonatisiert erscheint sie beigefarben
Hochofenzement	oxidiert: hellgrau; nicht oxidiert: blaugrau; carbonatisiert: beige	wie PZ; zusätzlich scharfkantige Hütten sandkörner (teilweise mit dünner Hydrathülle)	wie PZ aber u. U. mit weniger CH	Porosität abhängig vom W/Z-Wert, meist aber dichter als bei PZ; bei händischer Verarbeitung zahlreiche Luft- und Verdichtungsporen	wie bei PZ

Bindemittel	Farbe, makroskopisch	Mikroskopische Merkmale im Dünnschliffpräparat			
		nicht hydratisierte Bestandteile	Hydratphasen/Matrix	Gefüge	sonstiges
PZ und Puzzolane	hell- bis dunkelgrau; carbonatisiert: beige	wie PZ; zusätzlich kugelige Flugaschenpartikel oder kantige, blasige Trass bzw. vulkanische Aschepartikel	wie PZ aber u. U. mit weniger CH	Porosität abhängig vom W/Z-Wert, meist aber dichter als bei PZ; bei händischer Verarbeitung zahlreiche Luft- und Verdichtungs-poren	wie bei PZ Trasspartikel sind teilweise schwierig und nur mittels REM nachzuweisen
Romanzement	beige bis bräunlich	überwiegend Belit (C_2S) und Quarzkörner mit Reaktions-säumen von Wollastonit (CS) bzw. Belit	feinkörnige Matrix aus C-S-H- und C-A-H-Phasen	Porosität abhängig vom W/Z-Wert, meist hoher Kapillarporenanteil; da händische Verarbeitung zahlreiche Luft- und Verdichtungs-poren	Zementstein ist meist vollständig carbonatisiert; lokal kann CH auftreten

Tabelle 4.2 Einige Merkmale von unterschiedlichen Bindemitteln in Beton.

5 STAMPF- UND WELLERLEHM

5.1 Einleitung

Lehm ist neben Holz das wohl am längsten verwendete und nachhaltigste Baumaterial. Es ist fast überall verfügbar und kann mit einfachsten Mitteln als Baustoff genutzt werden. Zur Bereitung von Lehm wird lediglich Wasser, Arbeitskraft und einfachste Hilfsmittel (z. B. Formen) benötigt [5.1]. Ist die Lebensdauer eines Lehmbauwerks erreicht, kann der Baustoff durch Abbruch, zerkleinern und einfachstes Aufarbeiten mit Wasser wieder rückgewonnen und für das nächste Bauprojekt wiederverwertet werden. Der Energieaufwand bei der Herstellung und Wiederverwertung des Baustoffs Lehm ist minimal, entsprechend ist der CO₂-Fußabdruck im Vergleich zu anderen Baustoffen sehr gering. Es ist lediglich mit einem höheren Wartungsaufwand zu rechnen, da das Material gegenüber Bewitterung nicht so widerstandsfähig ist wie andere Bauprodukte. Letzteres wirkt sich jedoch, bei fachgerechter Ausführung von Lehmbauarbeiten, nur gering auf die Gesamtnachhaltigkeitsbilanz aus.

Lehm wurde und wird als Baustoff in verschiedenen Formen verwendet. Lehmsteine sowie Lehmmörtel und -putze wurden bereits in den vorherigen Kapiteln besprochen. Sie bilden die Grundlage für Lehmsteinmauerwerk in tragender oder nichttragender Form, letzteres z. B. als Ausfachungsmaterial bei Fachwerkständerbauten oder als nichttragende Innenwände. Lehm als Konstruktionsmaterial wird aber noch in anderen Formen angewendet, von denen Stampflehm und Wellerlehm in den folgenden Abschnitten besprochen werden. Eine gute Übersicht über Lehm als Konstruktionswerkstoff geben Houben/Guillaud in [5.1].

Stampflehm ist eine Technologie, die im gesamten eurasischen und nordafrikanischen Raum verwendet wurde (Bild 5.1). Prominente Beispiel der Architektur mit Stampflehm ist die Chinesische Mauer, die besonders in den frühen

Perioden mit diesem Material errichtet wurde. Stampflehm ist ein Material, das in Schalungen verdichtet wird und das unter den reinen Lehmbaumaterialien ohne hydraulische Zusätze die höchsten Druckfestigkeiten erreicht. Historische Stampflehmgebäude wurden oft massiv mit großen Wandquerschnitten gebaut, was ihnen, sogar bei widrigen Witterungsbedingungen, das Überdauern bis in die heutige Zeit erleichtert hat.



Bild 5.1 Historisches Stampflehmhaus, Albufeira, Portugal (links). Scheune in Wellerlehm, Albersroda, Sachsen-Anhalt (rechts; Foto: © Christof Ziegert, ZRS Architekten Ingenieure, Berlin).

Wellerlehm, ein Gemisch aus fettem Lehm und Pflanzenfasern, wurde weltweit verwendet, wobei von Region zu Region unterschiedliche Verarbeitungsweisen angewendet wurden. In Amerika, Afrika und Asien wurden Lehmklumpen lagenweise auf eine Wand aufgeworfen und die Wandflächen anschließend mit den Handflächen glattgestrichen [5.1]. In Europa, speziell in Deutschland, wurden Wandabschnitte mit dem Lehm lagenweise aufgeschichtet und anschließend mit dem Wellerlaten vertikal abgestochen [5.2]. Wellerlehmgebäude wurden oft für Wirtschaftsgebäude, wie Scheunen oder Ställe, verwendet (Bild 5.1). Auf diese Weise erbaute historische Gebäude sind noch erhalten, wenn sie ausreichend vor der Verwitterung geschützt wurden. Wellerlehm an sich ist weniger witterungsresistent als Stampflehm oder Lehmsteinmauerwerk [5.1] [5.2].

Stampf- und Wellerlehm wurden und werden, ähnlich Beton, für eine überwiegend monolithische Bauweise eingesetzt. Beide Bauweisen eignen sich für tragende Elemente wie Wände und Stützen, aber auch für nichttragende Wände. Stampflehm ist darüber hinaus auch für Fußböden geeignet [5.2].

5.2 Stampflehm

5.2.1 Anwendung

Stampflehm wurde überwiegend für vertikale Wandelemente verwendet, die ebene oder ovale bzw. rundliche Formen haben können. Historische Stampflehmwände sind typischerweise zwischen 40 und 80 cm dick. Gewölbe oder Kuppeln wurden in Stampflehm historisch so gut wie nicht realisiert. Eine weitere Anwendung sind Fußböden, die durch Stampfen wesentlich robuster und abriebfester gemacht werden können.

Typische historische Beispiele für Stampflehm, der im englischen »rammed earth«, im französischen »pisé« und im spanischen »tapial« genannt wird, finden sich im europäischen Raum besonders in Portugal, Spanien, Frankreich, England und Deutschland [5.2] [5.3] [5.4]. Die Bauweise selbst wurde schon bei den antiken Griechen, sowie im süd- und mitteleuropäischen Raum von den Römern eingesetzt, z. B. das Römerkastell in Xanten [5.2]. Auf der iberischen Halbinsel wurde die Stampflehm-Bauweise besonders durch die Mauren verbreitet und für Verteidigungsanlagen, Profanbauten und Paläste verwendet [5.4]. Das vielleicht bekannteste Beispiel in Spanien ist die Alhambra in Granada, welche teilweise mit Stampflehm als Baustoff errichtet wurde (Bild 5.2) aber auch viele andere Beispiele von Befestigungsanlagen und Burgen. Häufig findet sich eine Mischbauweise mit anderen Baustoffen, was darauf beruht, dass vormals intakte Stampflehmwände bei Witterungsschäden mit anderen Materialien instandgesetzt oder besonders exponierte Bauteile von Beginn an mit einem widerstandsfähigeren Material errichtet wurden (Bild 5.2).



Bild 5.2 Stampflehm-Bauweise in der Alhambra, Granada. Teile der Bauteile wurden mit Ziegeln verstärkt bzw. ausgebessert.

In Europa gibt es noch Millionen von historischen Stampflehmgebäuden aus allen Zeitperioden [5.3]. In Deutschland befindet sich das höchste Stampflehmgebäude der Welt. Es wurde in Weilburg um 1830 mit fünf Stockwerken realisiert. Stampflehm wird auch heute noch für tragende Konstruktionen verwendet. Beispiele dieser Art der Konstruktion ist die Kapelle der Versöhnung in Berlin (Bild 5.3) [5.5], die Kirche in der Karlsruher Nordstadt [5.6] oder auch Projekte von Privatpersonen wie das Stampflehmhaus bei Ihlow [5.7].

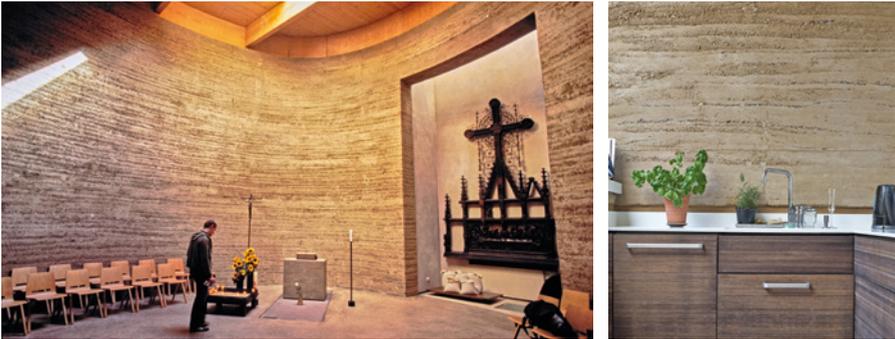


Bild 5.3 Tragende Stampflehmwänden in der Kapelle der Versöhnung, Berlin (links). Stampflehmwand als Gestaltungselement in einer Küche (rechts).

Außerhalb von Europa ist die Stadt Sana'a im Jemen zu nennen, deren historische Wohntürme teilweise aus Stampflehm errichtet wurden [5.8]. Auch genannt werden sollten die Rundbauten in Fujian, welche die lokale und traditionelle Bauweise im ländlichen China auf beeindruckender Weise repräsentieren [5.9]. Das Konzept des Verdichtens von Lehm in Schalungen wurde weltweit angewendet, da mit der Technik schnell relativ große Bauwerke mit einfachen Mitteln errichtet werden können.

Stampflehm wird heute aber auch gezielt als Gestaltungselement in der Architektur eingesetzt. Da das Material in Schalungen verdichtet wird, ergibt sich ein typisches Lagenmuster, das besonders in Verbindung mit modernen Baustoffen (z. B. Beton oder Holz) interessante Akzente setzt (Bild 5.3), [5.10]. Die heutige Anwendung von Stampflehm in Deutschland ist in den Lehmbauregeln festgelegt [5.11].

5.2.2 Herstellung

Die Herstellung von Stampflehm erfolgt mit einem erdfeuchten, relativ tonarmen Lehm. Das bedeutet, dass der Feuchtegehalt des Lehms viel geringer ist als z. B. bei der Herstellung von Lehmsteinen und -putzen [5.1] [5.10]. Erdfeuchte Lehme haben einen Wassergehalt von 9 bis 12 %, zeigen somit einen wesentlich niedri-

geren und engeren Feuchtebereich als plastische Lehme mit 18 bis 25 % Wasser. Der geringere Wassergehalt ist von Vorteil, da der Lehm mechanisch verdichtet werden kann, was bei einem plastischen Lehm (aufgrund des höheren Wassergehalts) nicht möglich ist. Der optimale Feuchtegehalt kann bei Stampflehm hinreichend genau mit einer einfachen Handprüfung ermittelt werden. Dabei wird ein Klumpen Lehm in der Hand zusammengedrückt. Lässt er sich gut zusammendrücken, ohne sich plastisch zu verformen und hält das Material gut zusammen, hat der Lehm den richtige Feuchtegehalt [5.2]. Ist der Wassergehalt zu niedrig, kann die Lehmmischung vorsichtig angefeuchtet werden und mit einer Schaufel umgeschichtet werden. Anschließend muss die Mischung ruhen, damit sich die Feuchte gleichmäßiger verteilt.

Historisch wurden bei Stampflehm auch größere Kornfraktionen bis 64 mm oder darüber verwendet, wobei Material benutzt wurde, das in der Nähe der Baustelle aufzufinden war. Heutige Fabrikmischungen sind normalerweise in ihrer Kornabstufung optimiert, arbeiten mit 8 bis 30 mm Größtkorn und werden bezüglich ihres Tongehalts optimiert, d.h. mit Gesteinskörnungen abgemagert, wenn der Tongehalt zu hoch ist oder mit Tonmehl angereichert, wenn dieser zu niedrig ist [5.2]. Fabrikmischungen werden normalerweise im Bigbag angeliefert und können direkt angewendet werden. Bei Bedarf muss lediglich nachgefeuchtet werden, sollte der Feuchtegehalt der Mischung zu niedrig sein. Sollen eigene Mischungen aus verschiedenen Kornfraktionen hergestellt werden, müssen diese im Zwangsmischer homogenisiert werden, um eine gute Durchmischung sicherzustellen [5.2]. Manuelles Mischen oder Freifallmischer sind nicht zur Durchmischung größerer Mengen an Stampflehm geeignet.

Traditionell erfolgte die mechanische Verdichtung mit einem einfachen Holzstößel in einer Schalung, die eine Höhe zwischen 50 und 80 cm besaß [5.1] [5.10]. Die Schalung hatte genau die richtige Größe, um von zwei Personen leicht versetzt werden zu können. Sie musste zerlegbar sein, da eine Stampflehmwand nicht in einer Lage, sondern segmentweise hergestellt wurde (Bild 5.4). Die Herstellung von Stampflehm erfolgte durch Einstreuen des erdfeuchten Lehms in einer Lage von 10 bis 15 cm. Diese wurde anschließend mit dem Stößel verdichtet. Die Lage verringerte sich hierbei um bis zu 50 % der ursprünglichen Höhe. Nach und nach wurden dann weitere Lagen verdichtet, bis die Schalung gefüllt war. Nach dem Auffüllen wurde die Schalung zerlegt und einen Stoß weiterbewegt, wo dann ein neues Segment verdichtet wurde (Bild 5.4 und Bild 5.5). Das segmentweise Verdichten erzeugte bei stark schwindenden Lehmen sichtbare einzelne Blöcke mit Schwindfugen, die jeweils einem Stoß entsprachen (Bild 5.6). Um eine Rissbildung in einem Segment durch eine darunter liegende Schwindfuge zu verhindern, wurden manchmal lagenweise Fasern, z. B. Strohhäxel, eingemischt (Bild 5.5 und Bild 5.6). Bei geringer Schwindneigung des Lehmgemisches traten Schwindfugen zwischen den Segmenten jedoch nicht auf und eine entsprechende Wand hatte ein

eher monolithisches Erscheinungsbild. Je nach Schalungsart konnten auch Löcher zurückbleiben, welche von den horizontalen Verbindungshölzern der Schalungswangen (z. B. Vierkanthölzer) stammten.

Bild 5.4 Beispiel einer einfachen Schalung für die Herstellung von Stampflehmwänden. Die Schalung ist zerlegbar und im einfachsten Fall von zwei Personen versetzbar.

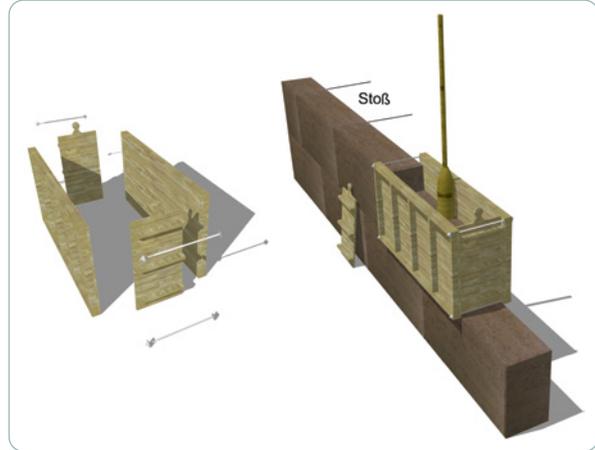


Bild 5.5 Arbeitsschritte beim Stampfen von Lehm: Schalung aufbauen, mit Lehm befüllen und verdichten, Schalung abbauen und um eine Stoßlänge versetzen.



Bild 5.6 Stampflehmwände mit starker Schwindverformung. Durch die Schwindfugen werden die einzelnen Stöße der Schalung deutlich sichtbar. Im linken Bild wurde der Giebelbereich mit Lehmsteinen aufgemauert. Im rechten Bild sind deutlich Lagen von Strohhäcksel zu erkennen, die ein Überspringen der Schwindfugen in den darüber liegenden Stoß verhindern sollten. Sichtbar ist auch, dass die Stöße versetzt sind (Putando, Chile).

Manchmal wurden zusätzliche Materialien in die Stampflehmagen eingemischt, z. B. größere Steine, die bei jedem neuen Stoß sorgfältig im Boden der Schalung eingefügt wurden. Eine Besonderheit kann bei manchen Stampflehmbauwerken in Spanien beobachtet werden. Hier wurden häufig Lagen mit ungelöschtem Kalk (CaO) abwechselnd mit dem Lehm in die Schalungen gestreut und verdichtet. Da der Lehm einen Feuchtegehalt von 9-12 % besaß, reagierte der ungelöschte Kalk mit der Feuchte zu Calciumhydroxid und mit den Tonmineralen teilweise zu Calciumsilikathydraten. Bild 5.7 zeigt einen Wandabschnitt in der Alhambra in Granada, wo durch Witterung die tonreichen Lagen des Stampflehms ausgewaschen und die resistenteren Kalklagen, die teilweise mit dem Ton puzolanisch reagiert hatten, freigewittert wurden. In der Vergangenheit wurde manchmal versucht, Kalk oder Zement mit dem erdfuchten Lehm zu mischen. Durch den geringeren Feuchtegehalt des Lehms kam es jedoch häufig dazu, dass der Kalk oder der Zement verklumpte und sich nicht mit einfachen Methoden durchmischen lies. Bild 5.7 zeigt einen Dünnschliff eines Stampflehms, bei dem zur Verstärkung hydraulischer Kalk zugemischt wurde, der sich allerdings beim Mischen stark verklumpt hatte. Stampflehm wird zwar heute noch mit festigkeitssteigernden Zusatzstoffen, wie Portlandzement, gemischt [5.12] [5.13], es muss jedoch gewährleistet werden, dass sich der Zusatzstoff homogen mit dem Lehm verbindet (am besten im Zwangsmischer), sollte er nicht lagenweise in die Schalung mit eingestreut werden.

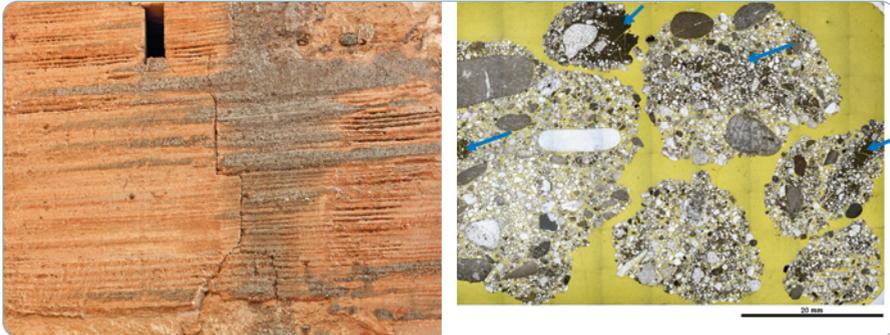


Bild 5.7 Stampflehmwand eines Gebäudes in der Alhambra, Granada (Spanien). Deutlich sind verwitterungsresistente Lagen zu erkennen, bei denen es sich um Kalk handelt, der Lagenweise mit dem Stampflehm verdichtet wurde (links). Dünnschliff eines Stampflehms aus einem historischen Gebäude aus Deutschland (rechts). Die Pfeile zeigen Kalkklumpen, die im Gefüge des Lehms vereinzelt auftraten.

Zur Herstellung von Stampflehmwänden werden heutzutage häufig durchgehende Formen und mechanische oder hydraulische Kompaktoren verwendet [5.2]. Dadurch beschleunigt sich der Verdichtungsprozess entsprechend und die Verdichtung wird wesentlich homogener. Außerdem lassen sich bei durchgehenden Schalungen einfacher Tür- und Fensteröffnungen realisieren. Eine durchgehende Schalung muss entsprechend mit der Höhe des Gebäudes mitwachsen.

5.2.3 Eigenschaften

Stampflehm ist ein verdichtetes Material. Das bedeutet, dass der ursprüngliche erdfuchte, lockere Lehm in seiner Porosität stark verringert wurde und dadurch wesentlich höhere mechanische Festigkeiten erzeugt. Für eine optimale Verdichtung sind zwei wesentliche Voraussetzungen notwendig:

- › Die Korngrößenabstufung sollte möglichst breit sein, d.h. es sollten möglichst verschieden große Körner in der Mischung vorhanden sein, die dann bei der Verdichtung optimal die Zwischenräume ausfüllen können.
- › Der Wassergehalt im Lehm muss eine gute Verdichtung und gleichzeitig eine gute Verbindung der Tonminerale erlauben. Bei einer erdfuchten Konsistenz des Lehms ist das gegeben.

Aufgrund der Korngrößenverteilung sind nicht alle Lehme zur Verdichtung gleich gut geeignet. Bild 5.8 zeigt die Kornabstufungen von zwei verschiedenen Lehmen. Eine Kornabstufung wie im linken Bild würde eine bessere Verdichtung mit hoher Packungsdichte ermöglichen (98 %), verglichen zu einem Lehm mit der Kornverteilungskurve im rechten Bild (Packungsdichte 90 %). Die Kornkurve im linken Bild hat eine breite Verteilung verschiedenster Größenbereiche, die es ermöglicht,

dass die von größeren Körnern gebildeten Zwickel von den kleineren Partikeln optimal ausgefüllt werden können. Dies wird durch mechanische Verdichtung erleichtert: Bei jedem Stoß des Kompaktors werden die feineren Partikel in die Zwickel der größeren eingerüttelt. Der Wassergehalt der erdfeuchten Mischung wirkt dabei wie ein Schmiermittel, das die Positionierung der Partikel erleichtert. Die Kurve im rechten Bild hat aufgrund der engeren Kornverteilung nicht genug kleinere Partikel zur Verfügung, um die Zwickel zwischen den größeren Körnern auszufüllen. Die Folge ist eine geringere Packungsdichte.

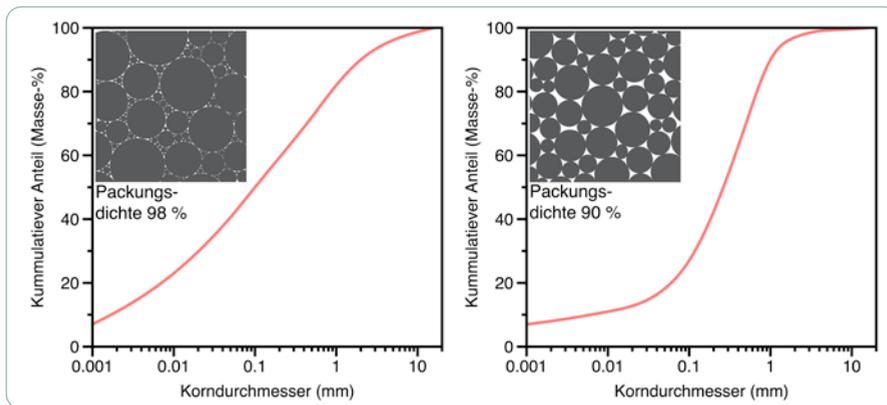


Bild 5.8 Kornverteilungskurven: Die linke Kurve ist für Stampflehm besser geeignet, da die breitere Verteilung eine bessere Verdichtung des Kornhaufwerks ermöglicht. Die rechte Kurve ist für eine optimale Verdichtung weniger geeignet, da durch die engere Kornverteilung viel Porenraum verbleibt.

Wasser hat eine nur sehr geringe Komprimierbarkeit. Bei einem Lehm im plastischen Zustand sind die Lehmteilchen von Wasser umgeben. Beim Aufbringen von Druck wird die plastische Lehm Masse verformt, aber nicht wesentlich verdichtet. Lediglich die wenigen eingeschlossenen Luftporen führen zu einer sehr geringen Verdichtung von 1 bis 2 %, da Luft sehr gut komprimierbar ist. Dagegen ist bei erdfeuchter Konsistenz einer Lehmmischung ein Großteil der Partikel nicht vollständig von Wasser umgeben, sondern bildet lediglich einen Feuchtfilm auf den Partikelflächen. Die Zwickel im Kornhaufwerk des Lehms sind überwiegend luftgefüllt und lassen sich beim mechanischen Kompaktieren des Lehms weitaus besser verdichten. Beim Verdichten werden auch die Kristalle der Tonminerale näher aneinandergerückt. Tonminerale haben blättchenförmige Strukturen mit einer Größe der einzelnen Blättchen von 0,1 bis 1 μm und einer Dicke von 0,01 μm . Wird der Abstand zwischen den Tonblättchen durch Stampfen verringert, erhöht sich die Bindekraft des Tons, was zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit und Festigkeit beiträgt. Nach dem Ausschalen kommt der Stampflehm deshalb seiner Endfestigkeit schon sehr nahe.

Die Verdichtung und die Kornabstufung haben einen direkten Einfluss auf die Dichte und Festigkeit eines Stampflehms. Bezogen auf die beiden Lehme in Bild 5.8 führt die linke Kurve zu höheren Dichten und größeren Festigkeiten als die rechte Korngrößenverteilungskurve. Durch die Verdichtung besitzen Stampflehme typische Stoffrohdichten im Bereich von 1900 bis 2200 kg/m³. Für Stampflehme, die nicht mit Kalk oder Zement gemischt wurden, liegen die Druckfestigkeiten erfahrungsgemäß, je nach Materialdichte, im Bereich 2 bis 5 MPa [5.14]. Stampflehm als konstruktives Material zeigt unter Druckbeanspruchung ein sprödes Versagen (Bild 5.9). Das spröde Verhalten kann etwas durch Beimischen von Fasern abgemindert werden, wobei eine zu große Menge an Fasern die Verdichtung und letztendlich die Druckfestigkeit mindern kann. Bei Schubbeanspruchung zeigt Stampflehm eine gewisse Verformbarkeit (Bild 5.9), die ebenfalls durch Beigabe von Fasern erhöht werden kann. Die Schubfestigkeit ist bei Stampflehm insgesamt höher als bei Lehmsteinmauerwerk und Wellerlehm [5.15] [5.16]. Die Verformbarkeit liegt hingegen zwischen der von Wellerlehm (hoch) und Lehmsteinmauerwerk (gering) [5.16] [5.17]. Stampflehm ist verhältnismäßig verwitterungsbeständig, so lange er nicht in direkten Kontakt mit Wasser kommt.

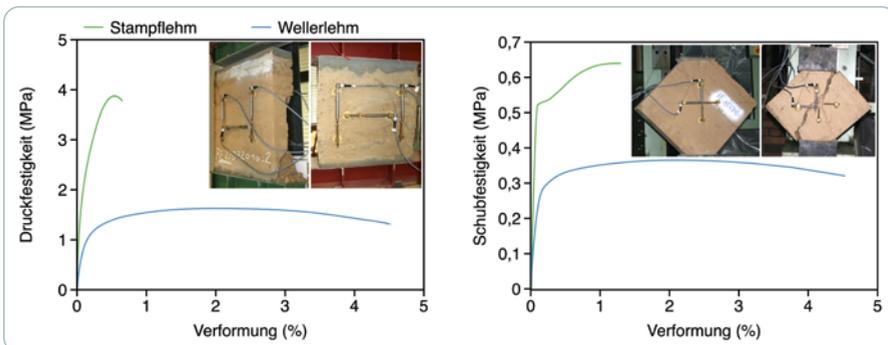


Bild 5.9 Stampf- (grün) und Wellerlehmteile (blau) unter Druck- (links) und Schubbeanspruchung (rechts). Dargestellt sind Spannungs-Dehnungskurven für Wandbauteile der beiden Materialien (nach [5.13] [5.14]).

5.3 Wellerlehm

5.3.1 Anwendung

Wellerlehm wurde und wird für Wohn- und Wirtschaftsgebäude verwendet. Aufgrund der verhältnismäßig einfachen Herstellungsweise und der Robustheit der Fertigung hat sich die Bauweise weltweit verbreitet und findet sich in allen Zeitperioden wieder. In der Literatur wird gelegentlich zwischen »geformtem Lehm« und »gestapeltem Lehm« unterschieden, wobei der Wellerlehm unter die letztere Bezeichnung fällt [5.1]. Doch bei beiden Begriffen, geformt und gestapelt, wird der Lehm in plastischer Form mit mehr oder weniger Faserbewehrung für die Massivbauweise angewendet. Frühe Beispiele für Wellerlehm, der im englischen als »Cob« bezeichnet wird, haben sich in Mittelamerika, z. B. in El Salvador und Nordamerika, z. B. in Arizona, erhalten (Bild 5.10).

In Europa hat Wellerlehm eine lange Anwendungsgeschichte. Besonders in den heutigen Bundesländern Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt gibt es noch tausende Gebäude aus diesem Material [5.2]. Oft handelt es sich hierbei um Wirtschaftsgebäude wie Scheunen (Bild 5.1) oder Nutztierställe. Ihre Blütezeit hatte die Bauweise Anfang des 19. Jahrhunderts. Wellerlehm wurde lokal in verschiedenen Variationen verarbeitet und entsprechend mit eigenen Namen versehen. Bei allen Verwendungsweisen ergeben sich jedoch einige Gemeinsamkeiten [5.2]:

- › Es wird ein sehr feinkörniger Lehm verwendet.
- › Es werden Pflanzenfasern (meist Stroh) dem Lehm untergemischt, um die Schwindneigung und damit verbundene Rissbildung zu vermindern.
- › Der Lehm wird von Hand, mit einem Wellerspaten oder einem anderen Instrument in die endgültige Form gebracht.



Bild 5.10 Links: Ein Schwitzbad in Wellerlehm, gebaut von den Maya ca. 500 n. Chr. (Joya de Cerén, El Salvador). Rechts: Ein ursprünglich vierstöckiges Gebäude in wellerlehmähnlicher Bauweise (Casa Grande), errichtet von den Hohokam in Zentralarizona nahe dem heutigen Phoenix, U. S. A. Die Schutzüberdachung wurde Anfang des 20. Jahrhunderts gebaut und steht heute selbst unter Denkmalschutz.

5.3.2 Herstellung

In Deutschland wurde für Wellerlehm meist ein tonärmerer, feinkörniger Lehm verwendet, der mit Stroh und Wasser zu einer plastischen Mischung verarbeitet wurde [5.2] [5.18]. Typische Strohgehalte lagen hierbei zwischen 20 und 30 kg pro m³ Lehm und die Strohfasern hatten eine Länge zwischen 30 und 60 cm [5.2]. Der Baulehm wurde häufig über den Winter feucht gelagert und dann durch Treten zerkleinert und bei Strohzugabe gleichzeitig durchmischt. Wenn möglich, wurden Huftiere zum Durchmischen der Lehmmasse eingesetzt.

Nach dem Mischen wurde der Lehm vertikal aufgeworfen. Dazu wurde das Material mit einer Mistgabel oder Forke schwungvoll auf ein Fundament oder einen darunterliegenden Wellersatz aufgeschichtet. Der plastische Lehm verteilte sich hierbei, ohne größere Lufttaschen im Wandaufbau einzuschließen. Der Strohgehalt hielt die Masse zusammen und verhinderte ein Auseinanderfließen. Das Aufwerfen des Lehms erfolgte schräg, wobei sich der Ausführende auf der Wand rückwärts weiterarbeitete (Bild 5.11).



Bild 5.11 Vorgehensweise bei der Bauweise mit Wellerlehm (Fotos: © Christof Ziegert, ZRS Architekten Ingenieure, Berlin)

Das Aufwerfen erfolgte in Lagen (Sätzen) mit einer Höhe von 70 bis 80 cm umlaufend über den gesamten Wandgrundriss eines Gebäudes. Nach ein- bis dreiwöchigem Antrocknen des Lehms wurde mit einem Wellerspaten der von der Wandfläche überstehende Lehm abgestochen. Das Blatt des Wellerspatens ist flach, um ein horizontales und vertikales Abstechen zu ermöglichen. Als Orientierung für ein fluchtgerechtes Abstechen des Lehmüberstands diente ein horizontales Holzbrett, dessen eine Kante parallel und eben zur horizontalen Fundamentlinie ausgerichtet war (Bild 5.11). Das Aufschichten und Abstechen des Lehms in Sätzen wurde so lange wiederholt, bis die gewünschte Wandhöhe erreicht war. Öffnun-

gen für Fenster und Türen mussten hierbei durch entsprechende Aussparungen berücksichtigt werden. Durch diese relativ einfache Konstruktionsweise ließen sich schalungslos auch gekrümmte oder gerundete Wandformen sowie auch komplexere Bauteildetails, z. B. Fensteraussparungen, herstellen [5.2].

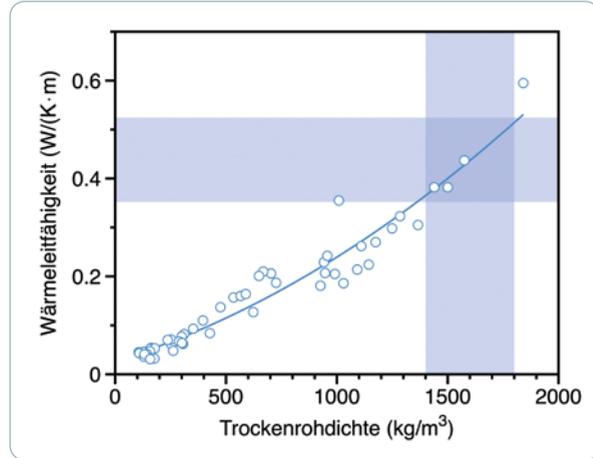
Eine wesentlich einfachere Methode bestand im Aufwerfen von brotlaibgroßen Lehmklumpen von plastischer Konsistenz (geformter Lehm). Nach dem schwungvollen Aufwerfen wurde der Lehm anschließend mit den Händen oder einem Werkzeug vertikal glattgestrichen [5.1]. Diese Methode führte zu wesentlich unregelmäßigeren Wanddicken und war weniger geeignet für dickere Wandquerschnitte. Sie wurde entsprechend für einfachere Wohnstätten oder Wirtschaftsgebäude angewendet und ist auf dem afrikanischen Kontinent (Sahelzone bis Äquatorialafrika) noch weit verbreitet [5.1].

5.3.3 Eigenschaften

Wellerlehm wird im plastischen Zustand gemischt und härtet durch Trocknen aus. Entsprechend ist der Wassergehalt der frischen Lehmmasse größer und die Trockenrohdichte mit Werten zwischen $1\,400$ und $1\,800\text{ kg/m}^3$ geringer als bei Stampflehm. Eine geringere Trockenrohdichte zieht auch geringere Druckfestigkeit nach sich. Typische Werte für Wellerlehm liegen im Bereich von $0,5$ bis 2 MPa [5.18] [5.19]. Aufgrund der Bewehrung in Form von Strohfasern hat der Wellerlehm ein günstigeres Nachbruchverhalten als der Stampflehm. Dies ist besonders bei Schub-, Zug- oder Biegebeanspruchung von Bauteilen wichtig, da der faserbewehrte Lehm nach Erreichen der maximalen Bruchlast noch wesentlich länger Lasten abtragen kann als dies z. B. beim Stampflehm möglich ist [5.19] (Bild 5.9).

Wellerlehm hat aufgrund der geringen Trockenrohdichte niedrigere Wärmeleitfähigkeiten (Lambdawert), was sich günstig auf die Wärmedämmung auswirkt. Bei porösen mineralischen Baustoffen hängt die Wärmeleitfähigkeit neben der Art des Materials und dessen Ausgleichsfeuchtegehalts stark von der Trockenrohdichte ab. Bild 5.12 zeigt die Abhängigkeit des Lambdawerts von der Trockenrohdichte am Beispiel von Schaum- und Porenbeton. Ähnliche Werte sind auch von Weller- und Stampflehm zu erwarten. Das Bild zeigt, dass bei der gegebenen Trockenrohdichte des Wellerlehms Lambdawerte im Bereich zwischen $0,35$ und $0,5\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ zu erwarten sind. Diese Werte entsprechen denen von anderen Leichtbaustoffen.

Bild 5.12 Trockenroh-dichte und Lambda-werte von Schaum- und Porenbetonen (Daten aus [5.20]). Die Bereiche der Trockenroh-dichte und der korrespondierenden Wärmeleitfähigkeiten, welche dem Wellerlehm entsprechen würden, sind blau markiert.



Sowohl für Stampflehm als auch für Wellerlehm gelten die Eigenschaften der Wasserdampfdiffusion und des Wasserdampfspeichervermögens, die in Kapitel 3.5.2 näher beschrieben wurden.

6 ANSTRICH- UND MALFARBEN

Farben im Architekturbereich dienen sowohl der Dekoration also auch dem Schutz der Oberflächen. Auf Wand- und Deckenflächen werden in der Regel zwei Malweisen angewendet (Bild 6.1):

- › al fresco,
- › al secco.

Bei der »al fresco« (Fresko) Technik wird die Malschicht, die aus einer wässrigen Pigmentdispersion oder einer Kalkfarbe bestehen kann, auf einen noch feuchten Kalkputz aufgebracht [6.1]. Durch das Nass-in-Nass-Arbeiten entsteht eine gute Bindung der Malschicht mit dem Kalkputz. Beim Carbonatisieren des Kalkputzes werden die Pigmente dauerhaft im Kalkputz fixiert.



Bild 6.1 Ein Wandfresko von Michelangelo in der Sixtinischen Kapelle (links). Rechts: Ein Graffito mit Sprühfarbe in Secco-Technik, aufgenommen in Neapel (Foto: © Katarina Malaga, Mölndal, Schweden).

Die »al secco« (Secco) Malweise wird auf trockenen Untergründen angewendet. Als Malschicht dient eine Farbe mit organischem oder anorganischem Bindemittel und Pigmenten, die auf eine Wandoberfläche aufgebracht werden.

Obwohl beide Techniken für dekorative Zwecke verfeinert wurden (in Form von Wandmalereien), werden diese auch als letzte Beschichtung auf einem Wand-/Deckenaufbau angewendet. Im Prinzip wird der Auftrag von den meisten Wandfarben heute in Secco-Technik ausgeführt. Die Fresko-Technik wird heute dagegen eher im Denkmalpflegebereich verwendet oder von wenigen Spezialfirmen, die sich auf diese Technik spezialisiert haben.

6.1 Arten

Anstrich- und Malfarben im Architekturbereich lassen sich nach verschiedenen Gesichtspunkten einteilen, zum Beispiel nach der Funktion, der Art des Bindemittels oder der Art des Pigments [6.2] [6.3]. Folgende Einteilungen sind möglich:

- › Funktion:
 - › Dekoration,
 - › Schutz,
 - › Funktionalität (z. B. photokatalytisch, hydrophob).
- › Art:
 - › Bindemittel: Ölfarben, Leimfarben, Temperafarben, Dispersionsfarben, etc.
 - › Pigment: Mineralfarben, Erdfarben, Anilinfarben, etc.
 - › Erscheinungsbild: Lasurfarben, Deckfarben, etc.

Farben bestehen aus Farbmittel und Malmittel [6.4]. Farbmittel geben der Farbe die Färbung, können aber auch Füllstoffe enthalten (Bild 6.2). Farbmittel sind Pigmente und Farbstoffe [6.3]. Farbstoffe sind üblicherweise flüssige organische Stoffe, die entweder künstlich hergestellt oder aus natürlichen Stoffen gewonnen werden (z. B. Extrakte aus Pflanzen) [6.4]. Pigmente sind feste Partikel anorganischer oder organischer Natur, die der Farbe feingemahlen zugegeben werden. Anstrichfarben enthalten in der Regel Pigmente, da diese über längere Zeit lichtbeständig sind und farblich nicht so leicht verwaschen. Füllstoffe sind feste, feine Partikel, die der Farbe zugegeben werden, um den Bindemittelanteil zu optimieren oder den Anteil der teureren Pigmente zu verringern. Der Anteil der Pigmente wirkt sich häufig auf die Deckkraft einer Farbe aus, wobei geringere Mengen an Pigmenten zumeist zu einer geringeren Deckkraft führen. Dies macht sich am meisten bei der Farbe Weiß bemerkbar (z. B. bei Dispersionsfarben). Allerdings kann ein zu hoher Bindemittelanteil zum Reißen der Farbschicht führen. Die Mengenverhältnisse von Bindemittel, Pigmenten, Füllstoffen und ggf. Verdünnern und Lösemitteln müssen deshalb sorgfältig abgestimmt werden [6.2].

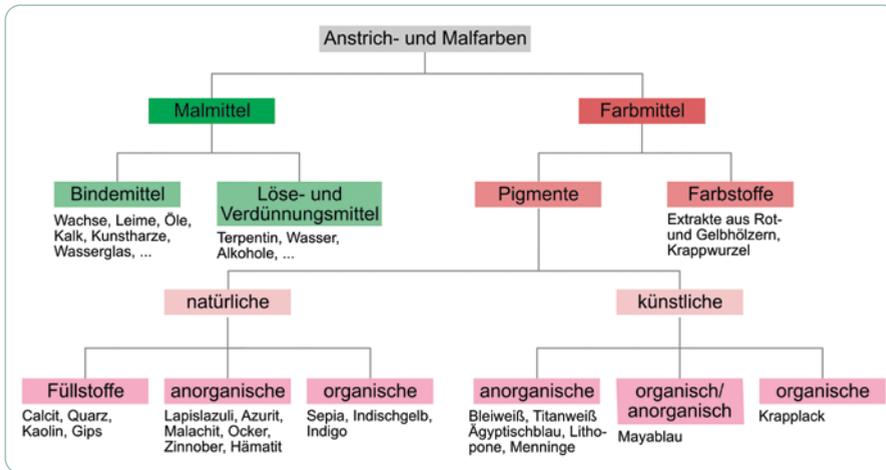


Bild 6.2 Einteilung der Farben in Mal- und Farbmittel.

Farbstoffe werden unter anderem zur Färbung von Textilien, Nahrungsmitteln oder Schreibmitteln verwendet (z.B. Tinte). Farbstoffe sind nicht so lange lichtstabil und bleichen über mehrere Jahre durch den natürlichen UV-Lichtanteil des Sonnenlichts aus [6.4].

Malmittel bilden die Grundlage von Farben. Sie bestehen aus dem Bindemittel und/oder einem Lösungs- und ggf. einem Verdünnungsmittel [6.2]. Bindemittel sind meist organischer Natur mit Ausnahme von Wasserglas und Kalk. Als Lösungsmittel wird heute häufig Wasser verwendet – in der Vergangenheit wurden dagegen oftmals flüchtige organische Stoffe eingesetzt wie Alkohole oder aromatische Verbindungen, letztere in Verbindung mit allen Arten von Kunstharzfarben oder -lacken. Einen Überblick über Mal- und Farbmittel gibt das Bild 6.2. Im Folgenden werden einige gängige Farben besprochen, die als Anstrichstoffe eingesetzt werden. Es wird hierbei die Klassifikation nach Bindemittel verwendet.

6.1.1 Kalkfarben

Kalkfarben bestehen aus Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) und Wasser. Um die Farbe streichfähig zu machen, wird häufig Casein, z. B. in Form von Quark, zugegeben. Zusätzlich können Pigmente beigelegt werden, sollte nicht die weiße Grundfarbe gewünscht werden. Pigmente müssen jedoch alkalibeständig sein, da Kalkfarben einen pH-Wert von 12,5 aufweisen, also extrem alkalisch sind. Außerdem können nicht beliebig viele Pigmentmengen verwendet werden, was kräftige Farbtöne ausschließt. Kalkfarben erhärten durch Carbonatisieren, ähnlich den Kalkmörteln. Da Farben in relativ dünnen Schichten aufgebracht werden, erfolgt die Carbonatisierung in nur wenigen Wochen.

Kalkfarben sind einige der ältesten Anstrichstoffe, die im Architekturbereich angewendet werden. In der ägyptischen, griechischen und römischen Antike wurden Kalkfarben häufig zur Dekoration von Wandoberflächen verwendet (Bild 6.3) [6.5] [6.6]. Die ursprünglichen Rezepturen sind nicht immer bekannt, aber die Verwendung von Eiweißen, um die Farben geschmeidig zu machen, hat eine sehr lange Tradition (Kalk-Kasein-Farben). Kalk lässt sich durch Einsumpfen über Jahre lagern, wobei sich die Qualität nicht verschlechtert. Aus diesem eingesumpften Kalk lässt sich durch Zugabe von Wasser, ggf. Pigmenten und Casein, eine Kalkfarbe herstellen.

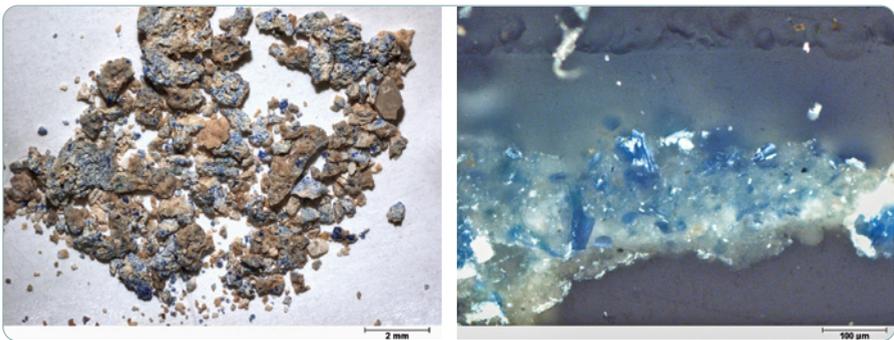


Bild 6.3 Reste einer mit Ägyptisch Blau pigmentierten Kalkfarbe an einem antiken Bauteil (links, aus [6.9]). Cuprorivait Pigmentpartikel im Lichtmikroskop (rechtes Bild; Auflicht, polierter Anschliff).

Farben, die für Fresken verwendet wurden, bestanden meist aus einer wässrigen Suspension von Pigmenten und Wasser, die vor dem Bemalen des noch feuchten Kalkputzes zu einer feinen Paste verrieben wurden. Nach dem Trocknen der Wasserfarbe und des Kalkputzes, carbonatisierte der Putz und band die Pigmente dauerhaft darin ein [6.1].

Kalkfarben können auf alle mineralischen Untergründe und auf Holz sowohl im Innen- als auch im Außenbereich aufgebracht werden. Die Verwitterungsbeständigkeit ist unter trockenen Bedingungen gut, nimmt jedoch bei häufigen Trocknungs-Feuchte-Wechseln stark ab und die Farbe muss dann entsprechend oft neu aufgetragen werden.

Kalkfarben haben ein gutes Dampfdiffusionsvermögen und sind im frischen Zustand aufgrund des hohen pH-Werts antiseptisch. Kalkfarben wurden deshalb in manchen Regionen nach jedem Winter zum Anstreichen von Nutztierställen verwendet. In Regionen mit natürlichen Kalksteinvorkommen (z. B. Schwäbische Alb und Fränkische Alb) haben Bauern als Beschäftigung im Winter deshalb häufig Kalk gebrannt, um diesen zur Herstellung von Kalkfarben für die Desinfektion von Ställen und Kalkmörtel für Bauprojekte zu verwenden.

6.1.2 Zementfarben

Zementfarben bestehen aus einem zementhaltigen Bindemittel und Farbpigmenten [6.7]. Eine weiße Grundfarbe wird durch die Verwendung von Weißzement und ggf. Kalkhydrat erreicht. Farbpigmente, die zusätzlich zur Farbe gegeben werden, müssen wie bei Kalkfarben alkalibeständig sein und können nur zum Abtönen verwendet werden.

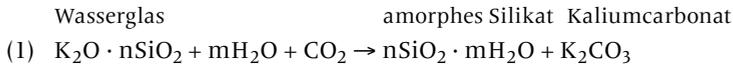
Zementfarbe wird als Trockenpulver angeboten und muss vor der Anwendung mit einer bestimmten Menge Wasser gemischt werden. Da die Farbe durch Wasser erhärtet, ist sie auch für stark durchfeuchtete Bereiche geeignet. Einmal mit Wasser gemischt, lässt sich die Farbe nicht mehr lagern, da durch das Wasser der Hydratationsprozess des Zements einsetzt. Zementfarben sind für den Innen- als auch den Außenbereich geeignet. Sie lassen sich auf allen mineralischen Untergründen, besonders auf zementgebundenen Putzen oder Beton, jedoch nicht auf Holz oder Metall aufbringen. Um die Verarbeitung von Zementfarben und die Witterungsbeständigkeit zu verbessern, sowie die Haftfestigkeit zum mineralischen Substrat zu erhöhen, werden Zusätze auf Polymerbasis eingesetzt. Bei diesen handelt es sich um Acrylate und/oder Polyvinylalkohol sowie hydrophobierende Stoffe auf Silan-/Siloxanbasis.

6.1.3 Silikatfarben

Silikatfarben, häufig auch als Mineralfarben bezeichnet, werden seit der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts als Anstrichfarben verwendet. Sie wurden in dieser Zeit von dem Fabrikanten Adolf Wilhelm Keim weiterentwickelt und werden noch heute als »Keimfarben« vermarktet [6.8]. Silikatfarben bestehen aus Kalium- oder Natriumwasserglas, welches mit Pigmenten und Füllstoffen zu einer Farbe vermischt wird [6.9]. Bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts erfolgte das Mischen von Pigmenten und Bindemittel kurz vor der Anwendung der Silikatfarbe. Dadurch wurde ein Koagulieren des Wasserglases verhindert, was durch Feststoffpartikel ausgelöst werden kann. In diesem Fall spricht man von einer Zweikomponenten-Silikatfarbe [6.8]: der Komponente Bindemittel (Wasserglas) und der Komponente Pigment/Füllstoff. Nach dem Zweiten Weltkrieg wurden Silikatfarben entwickelt, denen ein geringer Polymeranteil (ca. 4–6 %) zugemischt wurde, der das Koagulieren verzögerte. Solche Farben werden als Einkomponenten-Silikatfarben bezeichnet, die Pigmente und Bindemittel ab Werk enthalten, über längere Zeit gelagert und direkt angewendet werden können.

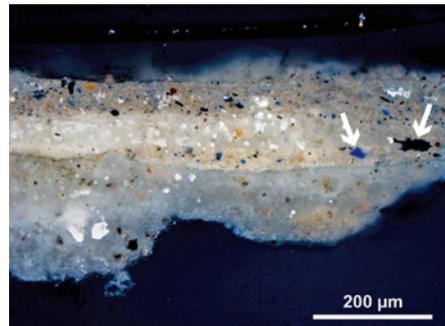
Silikatfarben eignen sich besonders für silikatische Untergründe, z. B. Beton, Zementputze oder Putze mit hydraulischem Kalk. Sie lassen sich auch einfach auf nicht-silikatische Untergründe auftragen (z. B. Gipsputz), ggf. nach einer Grundierung des Substrats. Heutige Silikatfarben haben meist eine Basis von Kalium-

wasserglas. Dieses bindet nach dem Aufstreichen auf den Untergrund nach der folgenden Gleichung ab:



Das gebildete Kaliumcarbonat ist ein leichtlösliches Salz. Da die Malschichten mit Silikatfarben sehr dünn sind (Bild 6.4), ist die Menge an Kaliumcarbonat sehr gering und kann ggf. durch einfaches Abwaschen entfernt werden (z. B. im Innenbereich) oder es wird durch Regen abgewaschen (Außenbereich). Das gebildete amorphe Silikat ist das eigentliche Bindemittel, in das die Pigmente und Füllstoffe der Farbe eingebettet sind. Es verbindet sich chemisch mit silikatischen Untergründen. Silikatfarben sind deshalb sehr wetterbeständig im Außenbereich, obwohl die Malschichten, wie bereits oben erwähnt, sehr dünn ausgeführt werden können. Heute wird dem Wasserglas auch Kieselsol beigemischt, welches die Anwendung noch mehr vereinfacht.

Bild 6.4 Drei Schichten einer Silikatfarbe auf einem mineralischen Untergrund. Die Probe stellt ein mikroskopisches Auflichtbild dar, bei der die Probe senkrecht zu den Farbschichten geschnitten und poliert wurde. Die beiden Pfeile weisen auf Farbpigmente hin, die der Farbe zugemischt wurden: blau = Ultramarin, schwarz = Holzkohle.



Silikatfarben werden aufgrund der Witterungsbeständigkeit im Außenbereich angewendet. So wurden nach der Einführung der Farben im 19. Jahrhundert die Gebäude der Gründerzeitarchitektur, die mit Romanzementmörteln dekoriert waren, häufig mit Silikatfarben versehen, um den Fassaden einen Natursteincharakter zu geben.

Wie bei Kalkfarben müssen die Pigmente alkalibeständig sein. Da das Bindemittel bei Silikatfarben transparent ist, wurde als weiße Grundfarbe im 19. bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts Lithoponweiß (auch Lithopone genannt) verwendet [6.10]. Bei diesem Pigment handelte es sich um eine Mischung von Bariumsulfat (BaSO_4) mit Zinksulfid (ZnS), das geringe Mengen an Zinkoxid (ZnO) enthalten konnte. Lithoponweiß war im Gegensatz zu Bleiweiß ungiftig. Heute wird jedoch überwiegend Titandioxid (Titanweiß, TiO_2) als Weißpigment verwendet, da es in guter Qualität relativ günstig hergestellt werden kann. Titanweiß ist auch das Grundpigment der meisten Dispersionsfarben. Neben einem Weißpigment wer-

den Silikatfarben noch Füllstoffe in Form von Quarz-, Kalk- oder Kaolinmehl beigelegt, um den Bindemittel-/Pigmentgehalt zu optimieren. Wie bei modernen Dispersionsfarben kann die weiße Grundfarbe nach Wunsch mit weiteren farbigen Pigmenten abgetönt werden.

6.1.4 Dispersionsfarben

Als Dispersionsfarben werden Farben bezeichnet, bei denen Farb- und Bindemittel feinverteilt im »Lösemittel« vorliegen [6.11]. Bei Kunstharzdispersionsfarben kommen als Bindemittel Acrylat oder Polyvinylacetat zum Einsatz, die in der flüssigen Farbe als feinstverteilte Tröpfchen vorliegen. Naturharzdispersionsfarben enthalten als Bindemittel pflanzliche Öl-Extrakte (z. B. von Lein- oder Olivenöl). Die im Baumarkt als Dispersionsfarben angebotenen Produkte sind in der Regel kunstharz-basiert.

Das Wasser in Dispersionsfarben stellt eigentlich kein Lösemittel dar, da das Bindemittel und die Pigmente nicht im Wasser gelöst sind, sondern sehr fein verteilt in dispergierter Form vorliegen [6.11]. Wird die Farbe auf ein Substrat aufgebracht, ordnen sich die Bindemitteltröpfchen, Pigment- und Füllstoffpartikel beim Verdunsten des Wassers auf der Oberfläche des Substrats an. Im weiteren Trocknungsverlauf der Farbe diffundieren Polymere von einem Bindemitteltröpfchen ins andere und über einen gewissen Zeitraum ergibt sich dadurch eine durchgängige Farbschicht [6.11].

Wasser ist in der Anwendung einfacher, weniger gesundheitsproblematisch und geruchsneutral. Allerdings werden der Farbe Zusatzmittel beigegeben, um die Dispersion stabil zu halten, d. h. eine Sedimentation der Bindemitteltröpfchen, Pigment- und Füllstoffpartikel zu vermeiden. Weiterhin können sie Konservierungsmittel oder Biozide enthalten, um einen Bakterien- oder Pilzbefall vorzubeugen. Diese Zusatzmittel können bei vorhandener Sensitivität Allergiereaktionen auslösen.

Als häufigstes Weißpigment wird Titandioxid verwendet. Zusätzlich kommen Füllstoffe zum Einsatz. Das Verhältnis von Bindemittel, Pigment und Füllstoff bestimmt den Deckungsgrad der Farbe. Farben mit hohem Deckungsgrad besitzen ein höheres Pigment-/Füllstoff-Verhältnis als Farben, die weniger decken. Zusätzlich können zur Farbabstimmung der weißen Grundfarbe weitere Farbpigmente zugemischt werden.

Dispersionsfarben wurden in den 1930er-Jahren entwickelt und kamen als Produkte in den 1950er-Jahren auf den Markt. Seither werden sie als Anstrichfarbe im Innen- und Außenbereich verwendet.

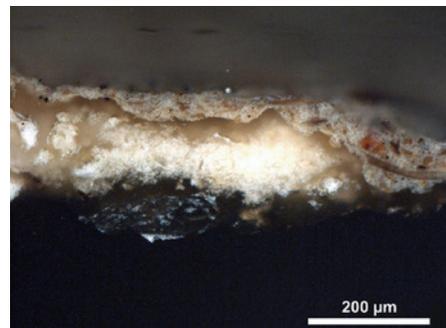
6.1.5 Silikonharzfarben

Silikonharzfarben sind sehr wetterbeständig und werden im Außenbereich eingesetzt. Das Bindemittel besteht aus einem Silikonharz, einer siliziumorganischen Verbindung. Silikone bestehen aus einzelnen Siloxanen, die durch bestimmte Reaktionen, die Hydrolyse und Kondensation genannt werden, in ein amorphes Silikat überführt werden. Das Endprodukt der Reaktion ist nicht unähnlich demjenigen bei Silikatfarben. Im Gegensatz zu diesen sind bei der Kondensation von Silikonharzen Reste von organischen Ketten vorhanden, durch die Silikonharzfarben eine wasserabweisende (hydrophobierende) Eigenschaft haben. Aufgrund der organischen Reste werden Silikonharzfarben auch weniger im Innenbereich eingesetzt.

6.1.6 Ölfarben

Ölfarben werden hauptsächlich auf Holz eingesetzt, z. B. im Fachwerk, auf Fenster- und Türrahmen oder Holzfassaden, seltener auf Naturstein (Bild 6.5) oder anderen mineralischen Untergründen. Bei Ölfarben, die im Baubereich eingesetzt werden, handelt es sich hauptsächlich um Leinölfarben [6.2]. Im Kunsthandwerk und in der Malerei werden auch Walnuss- oder Mohnölfarben verwendet [6.4]. Um Leinöl als Bindemittel in Anstrichstoffen zu verwenden, muss es aufwändig aufbereitet werden, um es von unerwünschten Nebenbestandteilen zu befreien, welche die Verarbeitungseigenschaften und Dauerhaftigkeit der Leinölfarbe beeinträchtigen.

Bild 6.5 Reste einer Farbfassung, bei der es sich um eine Ölfarbe handelt, die auf einem antiken Bauteil aufgebracht wurde. Der polierte Anschliff der Farbfassung zeigt die Art der Pigmente, die auf eine neuzeitliche Fassung hindeuten.



Die Ölfarbe wird mit entsprechenden Pigmenten verrieben und gebrauchsfertig angeboten. Neben Leinöl kann die Farbe aromatische Verbindungen enthalten, wenn ein Lösemittel zugesetzt wurde.

6.1.7 Leimfarben

Leimfarben werden im Innen- und teilweise auch im Außenbereich eingesetzt, da die Farbe wasserlöslich ist. Sie bestehen aus Tier- oder Pflanzenleimen als Bindemittel und sind eine preiswerte, ökologische Alternative zu den gebräuchlichen Dispersionsfarben. Als Füllstoffe dienen Kalksteinmehl bzw. Kreide. Sie können mit den verschiedensten Mineralpigmenten verrieben werden. Leimfarben können für alle mineralischen Untergründe angewendet werden, eignen sich jedoch auch für Tapeten oder Bauplatten.

Eine Farbe, die allen Besuchern Skandinaviens bekannt sein dürfte, ist die rote Anstrichfarbe, die zum Markenzeichen der typisch rot bemalten skandinavischen Häusern gehört (Bild 6.6). Bei dieser handelt es sich um eine Leim-Öl-Farbe auf Basis von Roggenmehlkleister und Anteilen von gekochtem Leinöl [6.12]. Das rote Pigment, das für die Farbe verwendet wurde und noch immer wird, ist ein Abfallprodukt aus dem ehemaligen Kupferbergbau in Falun in der Region Dalarna in Schweden. Die Farbe ist als Falunrot (Falun Rödfärg) bekannt und wird unter dem schwedischen Namen vermarktet. Das Pigment bestand früher aus Eisenoxid (Hämatit, Magnetit), Feldspat mit Anteilen an Kupferoxid und weiteren Schwermetallen. Heute besteht es dagegen ausschließlich aus Eisenoxid und Feldspat. Die Schwermetallanteile liegen unter 0,3 Masse-%. Falunrot wird auf die Holzfassaden der skandinavischen Häuser aufgebracht und eignet sich auch für sägerauhe Holzoberflächen.



Bild 6.6 Haus mit Holzfassade, die mit Falunrot gestrichen wurde.

6.1.8 Weitere Farben

Ölfarben sind nicht mit Alkydharzlacken zu verwechseln, die ebenfalls aus Ölen gewonnen werden, bei denen jedoch eine Veresterung der Öle mit Alkohol durchgeführt wird. Alkydharzlacke werden sowohl auf Holz als auch auf Metall angewendet. Sie werden teilweise noch in der Automobilindustrie eingesetzt, sind aber dort durch Acrylharzlacke weitestgehend ersetzt worden.

Wachsfarben wurden im Architekturbereich hauptsächlich für dekorative Zwecke verwendet. Diese werden seit dem Altertum angewendet und das Hauptbinde-mittel ist Wachs, z. B. Bienen-, Carnauba- und Montanwachs. Das Wachs wird im erwärmten Zustand mit den Pigmenten verrieben und schnell auf die Maloberfläche aufgetragen. Wachsmalfarben wurden in der Ikonenmalerei angewendet und gelegentlich für Architekturfassungen eingesetzt [6.4].

Neben den genannten Farben gibt es eine Vielzahl weiterer Farben- bzw. Lacke, die für Holz oder Metall verwendet werden.

6.2 Eigenschaften und Anwendung

Da es sich bei Farben um Beschichtungsstoffe handelt, die nicht nur einem ästhetischen, sondern auch funktionellen Charakter aufweisen, sind spezifische Eigenschaften maßgebend. Eine dieser Eigenschaften ist das Dampfdiffusionsvermögen einer Farbe. Das Vermögen, Wasserdampf zu transportieren kann über den μ -Wert, der Dampfdiffusionswiderstandszahl, ausgedrückt werden. Hierbei ist die Dampfdiffusion besser, je geringer der μ -Wert ist. Deshalb haben Farben mit geringem μ -Wert ein sehr gutes Diffusionsvermögen für Wasserdampf und Farben mit hohem μ -Wert ein sehr geringes Vermögen.

Die Wasserdampfdiffusion ist wichtig für die Beständigkeit der Farbe auf dem Untergrund und für das Behagen und die Gesundheit im Innenraum. Bezüglich der Beständigkeit kann eine Farbe, die einen sehr hohen μ -Wert besitzt (geringe Wasserdampfdiffusion) und die im Außenbereich auf einen Wandquerschnitt mit geringen μ -Wert aufgebracht wurde, schnell zum Abblättern führen. Der Grund ist das Temperatur- und Feuchtegefälle vom Innenraum nach Außen (am extremsten im Winter), wo es an der Grenzfläche von diffusionsdichter Farbe mit diffusionsoffenem Wandquerschnitt zur Kondensation von Wasser in der Wand kommen kann (bei der Unterschreitung des Taupunkts). Die Folge ist eine Feuchteakkumulation an der Grenzfläche mit entsprechenden Feuchteschäden im Wandquerschnitt (z. B. Fäulnis bei Leichtbauweise mit Holz) und in der Farbschicht (z. B. Blasenbildung, Abblättern). Weiterhin kann eine zu dampfdichte Farbe aufgrund der erhöhten Feuchtebelastung im Wandquerschnitt zu Schimmelbildung im Innenraum führen mit entsprechenden Beeinträchtigungen der Gesundheit und des Wohlbehagens.

In Fällen, wo der Wandquerschnitt ein sehr geringes Wasserdampfdiffusionsvermögen besitzt, z. B. bei Betonwänden, können auch dampfdichtere Anstrichstoffe verwendet werden. Das gilt auch bei Wandquerschnitten, bei denen im Innenbereich eine dampfdichte Membran verwendet wird. Bei beiden Möglichkeiten wird feuchte Innenluft durch ein Ventilations- oder Klimasystem nach draußen transportiert.

Das Bild 6.7 zeigt Bereiche von μ -Werten der gängigen Farbsysteme, die im Baubereich eingesetzt werden [4.9]. Farben mit Kunstharzbindemitteln zeigen ein geringes bis sehr geringes Dampfdiffusionsvermögen, Farben mit natürlich-organischen oder mineralischen Bindemitteln zeigen ein hohes bis mittleres Diffusionsvermögen.

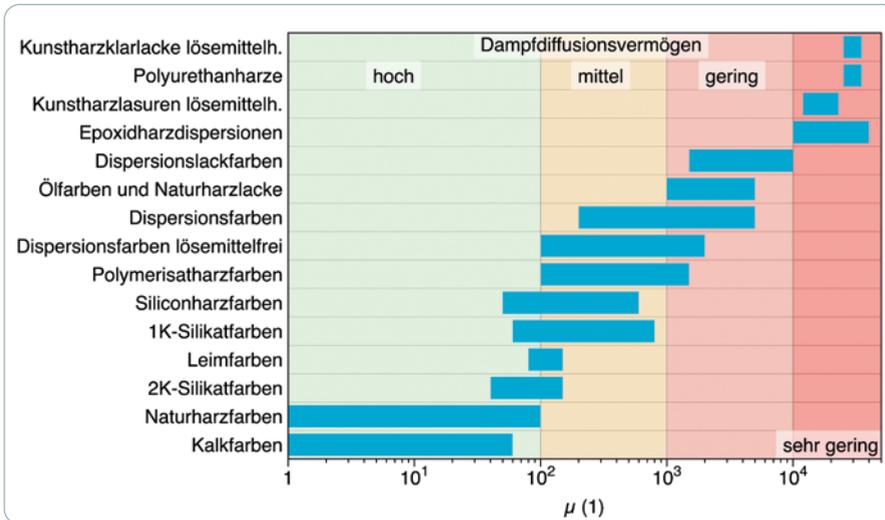


Bild 6.7 Verschiedene Farbsysteme und deren μ -Wertebereiche. Die Daten wurden zusammengestellt von wecobis.de [6.13], einer Datenbank des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) in Kooperation mit der Bayerischen Architektenkammer (ByAK).

Neben der Dampfdiffusion sind weitere Eigenschaften wichtig:

- › Verwitterungsbeständigkeit,
- › Abriebfestigkeit (besonders im Innenbereich mit Besucherverkehr).

Diese sind je nach Art und Verarbeitung der Farbe unterschiedlich. Einen Überblick über weitere Eigenschaften von Anstrichfarben und deren Anwendungsbereiche findet sich unter der in [6.13] angegebenen Internetadresse.

6.3 Arten von Pigmenten

Pigmente sind feingemahlene farbgebende Partikel [6.3]. Anstrichfarben enthalten Pigmente, da diese normalerweise über mehrere Jahre eine gute Farbbeständigkeit und Farbtiefe aufweisen. Neben Pigmenten werden weitere mineralische Füllstoffe zugegeben, die preiswerter als Pigmente sind. Tabelle 6.1 gibt einen Überblick über einige Pigmente, die Heute und in der Vergangenheit verwendet wurden. Die Liste ist jedoch nicht vollständig. Viele der organischen Pigmente, wie sie z. B. in der Druckindustrie eingesetzt werden, sind hier nicht aufgeführt.

Pigment	Chemie	Herkunft	Bemerkung
Weißpigmente			
Zinkweiß	ZnO	künstlich	seit 1834
Lithopone	ZnS + BaSO ₄	künstlich	seit 1853, gute Deckkraft
Permanentweiß, Barytweiß	BaSO ₄	künstlich	seit Altertum, geringere Deckkraft
Titanweiß	TiO ₂	künstlich	seit 1830 – Anatasform seit 1938 – Rutilform, häufigstes Weißpigment für heutige Anwendung
Kreide	CaCO ₃	natürlich	seit Altertum, geringere Deckkraft, auch als Füllstoff
Gips	CaSO ₄ · 2H ₂ O	natürlich	seit Altertum, geringere Deckkraft, auch als Füllstoff
Bleiweiß	2PbCO ₃ · Pb(OH) ₂	künstlich	seit Altertum, gute Deckkraft, toxisch
Gelbpigmente			
Gelber Ocker	Fe ₂ O ₃ · nH ₂ O	natürlich	seit Altertum
Cadmiumgelb	CdS	künstlich	seit 1825, toxisch
Chromgelb	2PbSO ₄ · PbCrO ₄	künstlich	seit 1820, toxisch
Auripigment	As ₂ S ₃	natürlich	Altertum bis 19. Jh., toxisch
Arylidgelb	organisch	künstlich	seit ca. 1900
Gelber Ocker	Fe ₂ O ₃ · nH ₂ O	natürlich	seit Altertum

Pigment	Chemie	Herkunft	Bemerkung
Rotpigmente			
Rote Erdpigmente	Fe_2O_3	natürlich	seit Altertum
Zinnober	HgS	natürlich, künstlich	seit Altertum, toxisch
Mennige	Pb_3O_4	künstlich	seit Altertum, toxisch
Blaupigmente			
Ägyptisch Blau	$\text{CaCuSi}_4\text{O}_{10}$	künstlich	Altertum bis ca. 500 AD; hergestellt durch Aufschmelzen von Quarzsand mit Kupfercarbonat (Azurit, Malachit), Calcit und Flussmittel
Ultramarin	$\text{Na}_8\text{-10Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\text{S}_{2-4}$	natürlich, künstlich	11. bis 19. Jh. seit 1826
Azurit	$2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	natürlich	Altertum bis 19. Jh.
Smalte	Co-Glas	künstlich	15. bis 19. Jh.
Preußischblau	$\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$	künstlich	seit 1704
Grünpigmente			
Grüne Erden	Fe^{2+} -Silikate	natürlich	seit Altertum
Malachit	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	künstlich	seit Altertum
Chromoxidgrün	Cr_2O_3	künstlich	seit 1809
Braunpigmente			
Brauner Ocker	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$	natürlich	seit Altertum
Umbrä	Mn-, Fe- und Al-Oxide	natürlich	seit 16. Jh.
Schwarzpigmente			
Holzkohle	C	künstlich	seit Altertum
Elfenbeinschwarz	$\text{C} + \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	künstlich	seit Altertum
Lampenruß	C	künstlich	seit Altertum
Schieferschwarz	C + Al-Silikat	natürlich, künstlich	seit Altertum

Tabelle 6.1 Pigmente für Anstrich und Malfarben.

Interessant sind künstliche Pigmente, die teilweise schon im Altertum entwickelt wurden. So gibt es für die Farbe »blau« nur wenige infrage kommende natürliche Pigmente. Vorhandene natürliche Pigmente waren entweder sehr teuer, z. B. Lapislazuli, das in Gold aufgewogen wurde oder waren über längere Zeit nicht lichtbeständig, z. B. Azurit oder Indigo. In Ägypten wurde daher schon im Altertum ein Blaupigment, das Ägyptisch Blau, entwickelt, das durch Aufschmelzen von Quarzsand, Kalkstein, Malachit (Kupfercarbonat) oder Cuprit (Kupferoxid) und einem Flussmittel, normalerweise Pottasche (Kaliumcarbonat) oder Soda (Natriumcarbonat), hergestellt wurde [6.9] [6.14]. Die Mischung wurde bei 850° bis 900 °C geschmolzen, wo es bei Einstellung der richtigen Mengenverhältnisse der Mischungskomponenten, zur Bildung eines blauen Calciumkupfersilikats (Cuprorivaït) kam (Bild 6.3). Cuprorivaït ist, da es sich um ein kristallines Silikat handelt, auch bei hohem pH-Wert stabil und extrem lichtbeständig. Es eignete sich deshalb gut als Pigment in Kalkfarben oder für Fresken. Ägyptisch Blau wurde über den gesamten Mittelmeerraum bis weit ins Mittelalter verwendet und stellte praktisch das wichtigste Pigment im Baubereich dar [6.15]. Etliche der erhaltenen Fresken in Pompei und Herculaneum bei Neapel (Italien) wurden mit Ägyptisch Blau gemalt.

Eine weitere interessante Variante eines Blaupigments ist das Maya Blau. Es ist ein Pigment mit türkiser Farbgebung. Es wurde überwiegend in Zentralamerika hergestellt und gehandelt und z. B. für die Fresken der Maya Heiligtümer verwendet. Maya Blau ist ein Kompositpigment, das aus einem anorganischen Träger, dem Tonmineral Paligorskit, und einem organischem Farbmittel, dem Indigo, besteht [6.16]. Die Entwicklung dieses Pigments war wohl dem Umstand geschuldet, dass Indigo mit der Zeit seine Farbtiefe verliert. Die Maya entwickelten deshalb ein komplexes Herstellungsverfahren, um die farbgebenden Molekülkomponenten des eigentlich wasserunlöslichen Indigos in ein Tonmineral, das Paligorskit, einzubauen und es dadurch lichtbeständig zu machen. Tonminerale besitzen die Eigenschaft, organische Moleküle bis zu einer bestimmten Größe in ihre Kristallstruktur zu integrieren. Die eigentliche Herausforderung der Maya bestand darin, das Indigo so zu behandeln, dass es teilweise in die Kristallstruktur des Paligorskits eingebaut wurde. Wie den Maya dies gelungen ist, wurde leider nicht überliefert. Dennoch sind verschiedene Methoden denkbar [6.16], die auch mit denen für diese Zeit vorhandenen Technologien durchführbar waren.

6.4 Farbanalyse

Farben können in verschiedener Weise und mit unterschiedlichen Zielen untersucht werden:

- › Art der Farbe,
- › Eigenschaften,
- › Alter,
- › gesundheitliche Aspekte.

Bei gesundheitlichen Fragestellungen geht es in der Regel um toxische Pigmente (z. B. Schwermetalle) oder Bindemittel mit leichtflüchtigen, organischen Bestandteilen (VOC).

Generell lassen sich Farben auf das Bindemittel und die verwendeten Pigmente und Füllstoffe untersuchen [6.17]. Bindemittel werden mittels analytischer Chemie, durch Methoden wie z. B. Gaschromatographie oder Infrarotspektroskopie, untersucht, wenn es sich um organische Bindemittel handelt. Pigmente und Füllstoffe werden häufig durch eine Kombination von mikroskopischen und mikrochemischen Methoden analysiert. Häufig werden dazu polierte Anschliffproben verwendet. Dies wird insbesondere bei Farbfassungen durchgeführt, die möglichst zerstörungsfrei untersucht werden sollen und wo nur geringe Probenmengen entnommen werden dürfen (z. B. bei wertvollen Fresken).

Für die Analyse werden kleinste Mengen einer Farbprobe (wenige Milligramm genügen) in Epoxid- oder Acrylharz eingebettet. Die eingebettete Probe wird dann senkrecht zu den Farbschichten geschnitten, geschliffen und poliert (Bild 6.8). Die eigentliche Analyse wird unter dem Lichtmikroskop ausgeführt. Mit einem Stereomikroskop kann eine erste Begutachtung erfolgen. Besser ist ein Polarisationsmikroskop mit Auflicht und UV-Lichtquelle, bei dem mit höherer Vergrößerung die Schicht(en) genauer untersucht werden können (Bild 6.9). Die Farbschichtdicke kann mit einem Vergleichsmaßstab oder mittels digitaler Bildanalyse bestimmt werden (Bild 6.9). Durch mikroskopische Untersuchungen kann eine Grobbestimmung der Pigmente vorgenommen werden. Für eine genauere Untersuchung der Pigmente kommen mikrochemische Methoden in Frage. Dazu wird die Anschliffprobe unter einem Rasterelektronenmikroskop (REM) mit energie-dispersiver Röntgenanalyse (EDX) untersucht. Da der Elektronenstrahl auf die einzelnen Partikel gerichtet werden kann, ist eine Bestimmung der chemischen Zusammensetzung von Pigmenten nicht schwierig. Diese reicht fast immer zur Aufklärung der Art der Pigmente zusammen mit den Farbinformationen aus der Lichtmikroskopie aus.

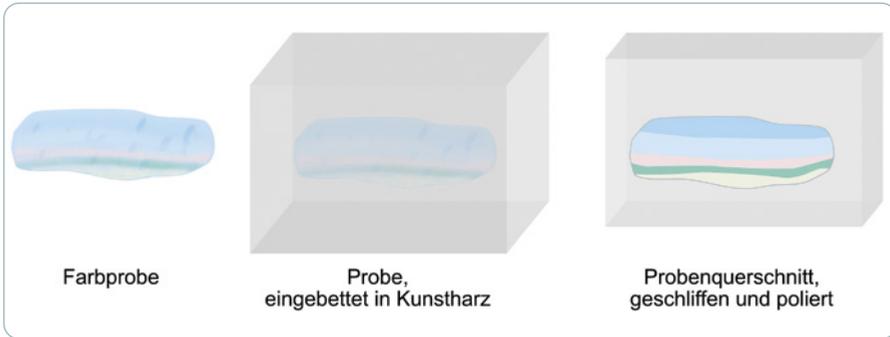


Bild 6.8 Schema der Probenvorbereitung bei Anschliffproben von Farbschichten.

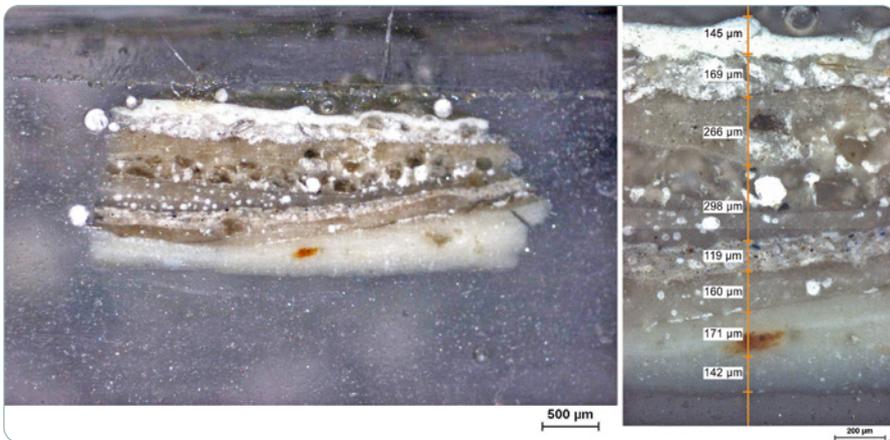


Bild 6.9 Eine Farbprobe, eingebettet in Acrylharz. Gesamtansicht der Probe (links), Detail der unterschiedlichen Farbschichten mit deren Dicken (rechts).

7 ASBEST IN BAUPRODUKTEN

Asbest ist ein Material, das seit ca. 150 Jahren technisch angewendet wird. Obwohl die gesundheitsschädlichen Wirkungen seit mehr als 100 Jahren bekannt sind, ist es immer noch Bestandteil in unterschiedlichen Produkten, zwar nicht in Europa, aber in vielen anderen Ländern. Das vorliegende Kapitel soll über die verschiedenen Arten von Asbest und seine Anwendungen in Deutschland berichten. Es werden außerdem Hinweise gegeben, wie Asbest in Bauprodukten erkannt werden kann.

Wichtig: Das Kapitel behandelt nicht Gesundheitsrisiken, die beim Umgang mit Asbest bestehen! Risiken, die durch Freisetzung von Asbest in die Raumluft erzeugt werden und die Analyse von Asbest aus der Raumluft werden nicht erörtert.

7.1 Historisches

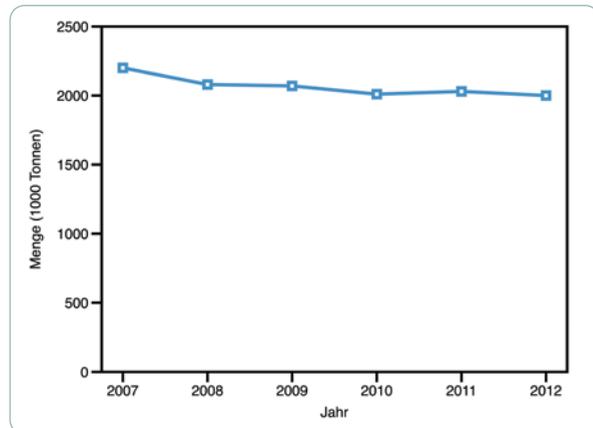
Asbest besteht aus mineralischen Fasern. Eine erste Verwendung erfolgte bereits 1820 für feuerfeste Schutzkleidung und andere feuerfeste Anwendungen, bei denen die Fasern zu Geweben verwoben wurden [7.1]. Neben der Anwendung als feuerfestes Material wurde Asbest maßgeblich für Dichtungszwecke verwendet, beispielsweise, um bei Öfen aller Art ein Entweichen von Hitze zu verhindern.

Am 15. Juli 1900 wurde Eternit von dem Österreicher Ludwig Hatschek (1856–1914) patentiert [7.2]. Hatschek hatte in den 1880er-Jahren Faserzement entwickelt und zur Herstellung von Dacheindeckungsmaterial verwendet. Eternit ist ein Faserzementmaterial, das in Form von dünnen Platten noch heute hergestellt wird. Bis 1990 bestanden die Fasern, die vor allem der Bewehrung dienen und erheblich zur Biegefestigkeit der Faserzementplatten beitragen, aus Asbest. Seit Mitte der 1980er-Jahre wurden zunehmend Polymerfasern verwendet, die heute in Europa ausschließlich angewendet werden.

Seit Anfang des 20. Jahrhunderts wurden mehr und mehr asbesthaltige Produkten erzeugt. Fast gleichzeitig wurde in dieser Zeit Asbestose als Lungenkrankheit erkannt. Dies betraf vor allem Menschen, die im Gewinnungs- und Verarbeitungsprozess arbeiteten. 1943 wurde in Deutschland Lungenkrebs in Folge von Asbestbelastung als Berufskrankheit anerkannt und 1970 erfolgte die offizielle Bewertung von Asbest als karzinogen. In Deutschland wurde 1979 ein erstes Asbestprodukt, Spritzasbest zur Verbesserung der Brandeigenschaften von z. B. Stahlträgern, verboten. Seit 1990 ist in Österreich und der Schweiz die Herstellung und Anwendung von Asbest verboten. Deutschland folgte drei Jahre später mit einem generellen Verbot von Asbestprodukten. Es dauerte allerdings noch weitere elf Jahre, bis im Jahr 2004, basierend auf einer Richtlinie aus dem Jahr 1999, dass in der gesamten EU alle Länder Beschränkungen für die Verwendung und Verarbeitung von Asbest einführen mussten. Bis heute werden noch weltweit jährlich ca. zwei Millionen Tonnen Asbest gewonnen (Bild 7.1), wobei die Hauptproduzenten China, Indien und Russland sind und sich die Hauptanwender in Asien oder Südamerika befinden (Bild 7.2) [7.1].

In Deutschland war der höchste Verbrauch von Asbest in den 1970er-Jahren mit einer jährlichen Menge von ca. 170 000 Tonnen. Davon fielen ca. 100 000 Tonnen auf die Herstellung von Faserzement (z. B. Platten, Spritzzement). Seit den 1980er-Jahren fiel die Herstellung und der Verbrauch von Asbestfaserzementprodukten drastisch ab.

Bild 7.1 Weltweite Asbestproduktion zwischen 2007 und 2012 (nach [7.1]).



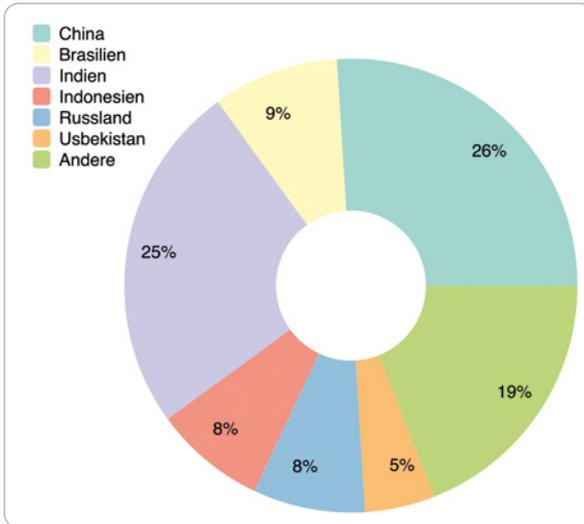


Bild 7.2 Hauptanwender von Asbest in 2012 (nach [7.1]).

7.2 Eigenschaften und Anwendung

Die kennzeichnende Eigenschaft von Asbest ist dessen faserige Morphologie (Bild 7.3). Die Webbarkeit dieser Fasern wurde schon am Anfang der Industrialisierung erkannt und angewendet, um feuerfeste Kleidung herzustellen [7.3]. Asbest ist nicht brennbar und sehr temperaturbeständig. Eine Zersetzung von Asbest findet oberhalb von 800 °C statt. Es ist chemisch beständig, reißfest und besitzt eine hohe Flexibilität (Biegsamkeit).



Bild 7.3 Faserige Morphologie des Minerals Tremolit. Bei Tremolit handelt es sich um einen Amphibolasbest.

Eine Eigenschaft von Asbest ist das Aufspießen der Fasern in immer feinere Fasern, wenn diese mechanisch durch Biegung beansprucht werden (Bild 7.4), wobei die Zugfestigkeit mit sinkendem Durchmesser der Fasern ansteigt [5.4]. Fasern von Asbest wurden deshalb für die Verwendung von Faserzementplatten

verwendet, da deren Biegezugfestigkeit durch den Einsatz der Fasern erhöht wird. Dies ermöglichte die Herstellung von dünnen Platten bestehend aus Faserzement, die für die Fassadenverkleidung, häufig von Holzständerbauten z. B. bei Fertighäusern, verwendet wurden. Später kamen Anwendungen in Form von vorgefertigten Bauplatten für den Innenausbau hinzu. Das Aufspießen von Asbestfasern in immer feinere Faserfragmente und deren potentielle Freisetzung in die Umgebungsluft, z. B. bei Rückbau asbesthaltiger Bauteile oder Bauwerke, verursacht allerdings auch das Gesundheitsrisiko, das mit Asbest assoziiert wird. Die feinsten Fasern können in der Lunge, wenn eingeatmet, respirative Lungenerkrankungen bis hin zum Lungenkrebs auslösen.



Bild 7.4 Chrysotilasbest, der an den Faserenden in weitere feinere Fasern aufspießt (links, blauer Pfeil; Mikroskopbild, Durchlicht). Das rechte Bild zeigt schematisch, dass eine Asbestfaser aus unzähligen dünneren Fasern zusammengesetzt ist.

Es wird geschätzt, dass ca. 3 000 bis 4 000 Produkte existierten, in denen Asbest als Bestandteil verarbeitet wurde. Die Produktpalette reichte hierbei von der Automobilbranche (z. B. Bremsbeläge), dem Schiffsbau (z. B. für Dichtungen), der Flugzeugbranche, der Feuerfestindustrie bis zum Baugewerbe. Asbest wurde sogar als Filterstoff für Bier, Wein und bei der Arzneimittelproduktion angewendet.

Im Baubereich wurde Asbest nicht weniger vielfältig eingesetzt. Die Fasern sollten gezielt als Bewehrung (Faserbewehrung) die mechanischen Eigenschaften der Produkte verbessern. Neben den mechanischen Eigenschaften standen vornehmlich Brandschutzaspekte im Vordergrund. Asbestfasern wurden deshalb häufig bei Brandschutzklappen auf Calciumsilikatbasis oder Lüftungskanälen aus Faserzement angewendet, welche im Falle eines Brandes dessen Ausbreitung über das Lüftungssystem verhindern sollten. Die folgende Auflistung zeigt einige Beispiele für die Anwendung von Asbestfasern als Bestandteil von Produkten aus dem Baubereich [7.3]:

- › Asbestzement – Faserzement (Bewehrung),
 - › Wellplatten (Eternit),
 - › Ebene Platten (Eternit, Fulgurit, Baufanit, Asbestschiefer),
 - › Dachschindeln (Asbestschiefer),
 - › Dachziegel (Formteile),
 - › Druck- und Abwasserrohre,
 - › Lüftungskanäle,
- › Fliesenkleber (teilweise bituminös),
- › Bodenbeläge: Vinyl-Asbest-Platten (Flor-Flex, Flex-Platten),
- › Leichtbauplatten (Neptunit, Baufatherm, Sokalit),
- › Spritzasbest, z. B. bei Stahlkonstruktionen oder im Schiffsbau zur Erhöhung des Brandwiderstands von Stahl,
- › Brandschutzklappen auf Basis von Calciumsilikat,
- › Dichtungsmaterialien und Abdichtmassen aller Art,
- › Wärmedämmstoffe,
- › Bewehrung in Putzen und Estrich.

Bei Asbestzementprodukten handelt es sich um Zement gemischt mit Asbestfasern und Wasser. Der Asbestanteil lag bei 5 bis 10 Masse-%. Heutige Platten, die etwa denen von früheren Asbestzementprodukten entsprechen, werden z. B. als Faserzementplatten angeboten, die anstatt von Asbestfasern Polymerfasern enthalten und gesundheitlich unbedenklich sind.

Asbestzementplatten, einschließlich Wellplatten, wurden kontinuierlich hergestellt und in der Regel im Wasserbad abgebunden oder dampfgehärtet. Asbestzement wurde häufig auch für Druckleitungen im Trinkwasserbereich eingesetzt oder für Abwasserrohre [7.4]. Noch heute finden sich zahlreiche Rohre aus Asbestzement in kommunalen Trinkwasserversorgungsnetzen. Anders als bei der Aufnahme von Fasern über die Atemwege, wird eine orale Einnahme von Asbestfasern über den Magen-Darmtrakt als nicht kritisch angesehen. Nach Angaben der Weltgesundheitsorganisation (WHO) und des Bundesgesundheitsamtes ist ein gesundheitliches Risiko aus dem Betrieb von Asbestzementrohren in der öffentlichen Wasserversorgung nicht erkennbar [7.5]. Die Reparatur oder der Austausch (nur mit nichtasbesthaltigen Materialien) müssen jedoch mit den örtlichen Sicherheitsvorschriften im Einklang stehen.

Wichtig für das Gefahrenpotential ist, wie die Asbestfasern in die Materialmatrix eines Produkts eingebunden sind. Ist es, wie im Fall von Asbestzementprodukten in eine dichte mineralische Matrix eingebunden, dann ist das Freisetzungspotential von Fasern wesentlich geringer als z. B. bei Leichtbauplatten oder Fliesenklebern. Dies ist im Wesentlichen bei der Sanierung von asbesthaltigen oder -verdächtigen Bauprodukten zu beachten.

7.3 Asbestarten

Bei Asbest handelt es sich um verschiedene Minerale [7.6]. Der häufigste Asbest ist der Chrysotilasbest, der in den meisten der asbesthaltigen Produkte enthalten ist. Er findet sich in Faserzementprodukten, in Leichtbauplatten und in Klebern bzw. Dichtstoffen wieder. Braun- und Blauasbeste wurden wie Chrysotilasbest verwendet aber seltener eingesetzt. Tabelle 7.1 gibt einen Überblick über die verschiedenen Minerale, die als Asbest zur Anwendung kommen. Asbeste aus der Amphibolgruppe besitzen dickere Fasern mit weniger Aufspaltung als beim Chrysotilasbest (Bild 7.5).

Gruppe	Bezeichnung	Mineralnamen	Formel	Bemerkung
Serpentin- gruppe	Weißasbest, Serpentin- asbest	Clinochry- sotil	$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$	der am häufigsten verwendete Asbest
Amphibol- gruppe	Braunasbest	Grunerit, Anthophyllit, Mysorit, Amosit	$Fe_7Si_8O_{22}(OH)_2$	häufigste Asbeste aus der Amphibol- gruppe (z. B. in Rohren, Dämm- stoffen, Faser- zementplatten)
	Blauasbest	Riebeckit, Krokydolith, Magnesiorie- beckit	$Na_2Fe_5Si_8O_{22}(OH)_2$	
	Amphibol- asbest	Tremolit	$Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2$	wurden weniger häufig verwendet (z. B. Dämmstoffe, Brandschutz- klappen)
	Aktinolith	$Ca_2(Mg,Fe)_5Si_8O_{22}(OH)_2$		
		Anthophyllit	$(Mg,Fe)_7Si_8O_{22}(OH)_2$	

Tabelle 7.1 Asbestarten

Serpentin ist eine Mineralgruppe, deren prominenteste Vertreter Chrysotil und Antigorit sind. Beide Minerale besitzen die gleiche chemische Formel $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ aber eine unterschiedliche Kristallstruktur und Morphologie. Chrysotil ist faserförmig und wurde als eine der häufigsten Asbestarten bekannt (Chrysotilasbest, Weißasbest). Antigorit tritt dagegen in kompakten Massen oder in blättrigen Aggregaten auf und ist gesundheitlich unbedenklich. Antigorit ist der Hauptbestandteil von Serpentin, einem sehr beliebten Naturstein von dunkelgrüner Farbe. Allerdings kann der Serpentin auch Anteile von Chrysotil enthalten. Dies ist zwar unbedenklich bei der Anwendung des Serpentinits, da das Mineral fest in die Gesteinsmatrix eingebunden ist. Es kann jedoch bei der Ver-

arbeitung des Materials im Steinbruch und bei der natürlichen Verwitterung von Serpentin Chrysotilasbest freigesetzt werden, was ein entsprechendes gesundheitliches Risiko darstellt [7.7].

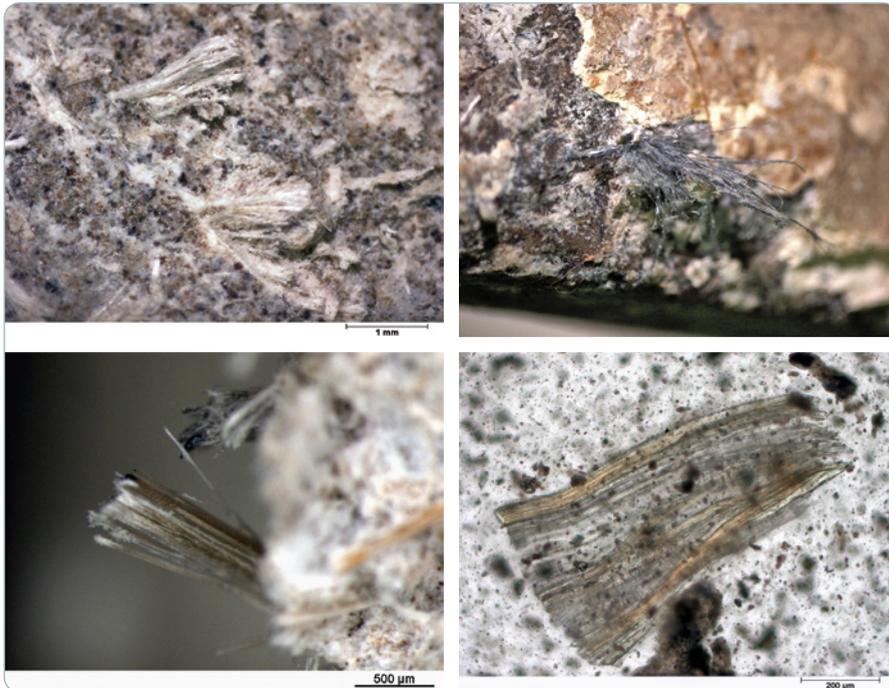


Bild 7.5 Verschiedene Asbestarten. Chrysotilasbest (oben links), Blauasbest (oben rechts), Braunasbest (unten links; Aufnahmen hergestellt mit dem Stereomikroskop). Chrysotilasbest unter einem Durchlichtmikroskop bei linear polarisiertem Licht (unten rechts).

7.4 Identifizierung von Asbest

Die qualitative Identifizierung von Asbest in Baustoffen erfolgt mit einer Kombination optischer und phasenanalytischer Methoden. Mit einer Lupe (x10) können manchmal schon Fasern mit einer typischen Aufspaltung erkannt werden. Sicherer sind licht- oder elektronenmikroskopische Untersuchungen, z. B. mit dem Stereomikroskop oder einem Durchlichtmikroskop (mit Phasenkontrast und/oder polarisiertem Licht). Mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) können zusätzlich zu Bildinformationen mikrochemische Analysen zur Art der Fasern durchgeführt werden.

Die Art von Asbestfasern kann auch sicher durch eine Röntgenpulveranalyse (XRD) ermittelt werden. Diese Methode erlaubt eine sichere Zuordnung von Asbestfasern zu einem bestimmten Mineral.

Asbest lässt sich von anderen Fasern (z. B. Polymer, Glas oder Textil) durch seine Morphologie unterscheiden. Bei Asbestfasern ist das charakteristische Merkmal das Aufspleißen der Faserenden. Polymer- oder Glasfasern sind meist gleichmäßiger in ihrer Form mit einer festgelegten Faserdicke. Polymerfasern sind in aller Regel zwischen 10 und 20 μm dick, Glasfasern etwas dicker. Sowohl Glas- als auch Polymerfasern zeigen keine Aufspleißung der Faserenden. Bild 7.6 zeigt eine Asbestfaser im Vergleich mit Glas- und Polymerfasern.

Zu beachten ist, dass in manchen Fällen verschiedene Fasern gemischt wurden. So kann Mineralwolle, die Anfang und Mitte des 20. Jahrhunderts eingesetzt wurde, gelegentlich Asbestfasern enthalten. Mitte der 1980er-Jahre wurden bei Faserzementplatten gelegentlich Polymerfasern zusammen mit Asbestfasern eingesetzt.

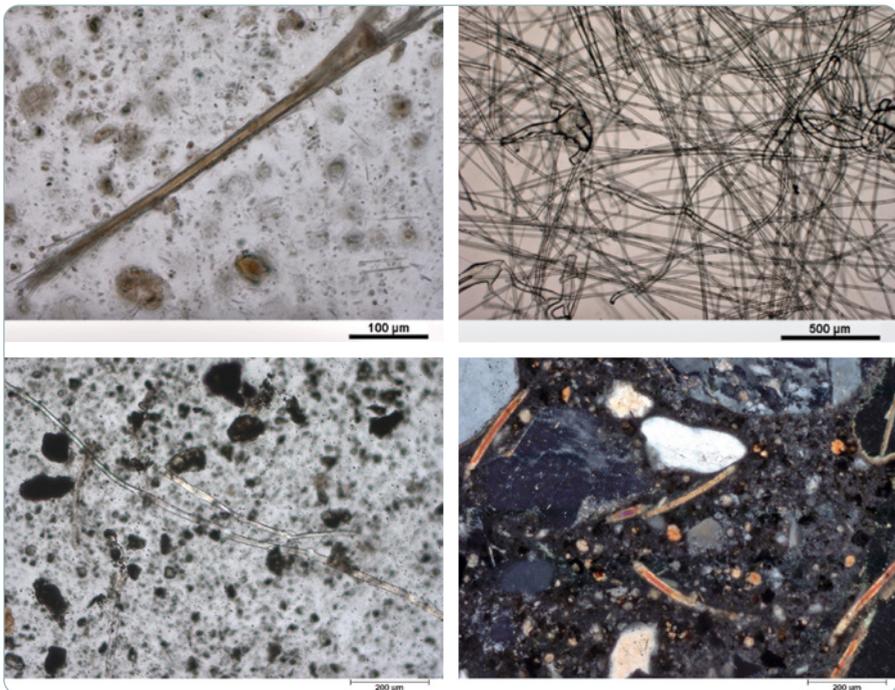


Bild 7.6 Verschiedene Fasern unter einem Durchlichtmikroskop. Braunasbest mit typischer Aufspleißung an den Faserenden (links oben). Glasfasern in einem Wärmedämmstoff (rechts oben). Zwei Polymerfasern im Durchlicht (links unten). Mehrere Polymerfasern, eingebettet in einer Zementsteinmatrix (rechts unten; unter gekreuzten Polarisatoren).

8 ANALYSEMETHODEN

8.1 Begriffe

In diesem Kapitel werden Methoden zur Bestimmung der stofflichen Eigenschaften von mineralischen Baustoffen beschrieben. Häufig werden diese Methoden zur Schadensanalyse eingesetzt und in einigen Fällen zur Güteüberwachung. In den wenigsten Fällen sind sie genormt. Für die Bestimmung von genormten Eigenschaften wird auf die jeweiligen Prüfnormen für die entsprechenden Baustoffe verwiesen. Das Ziel dieses Kapitels ist es, einen Überblick über die häufigsten Untersuchungsverfahren zu geben und aufzuzeigen, welche Geräteausstattung dafür notwendig ist, welche Materialproben benötigt werden und welche Informationen damit jeweils gewonnen werden können. Jede der Methoden erfordert ein Spezialwissen bezüglich der Probenpräparation, Anwendung der Geräte sowie der Interpretation der Ergebnisse.

Die Untersuchungsziele lassen sich in drei Aufgabengebiete unterteilen: die Charakterisierung des Materialgefüges, die Phasenanalyse und die chemische Analyse. Gefügeanalysen werden häufig mittels optischer und mikroskopischer Methoden durchgeführt. Die Phasenanalyse erfolgt mittels spezieller Geräte, die im Folgenden vorgestellt werden. Die chemische Analyse ermittelt die chemische Zusammensetzung der Phasen. Es muss jedoch betont werden, dass keine der beschriebenen Methoden eine »Black-Box«-Methode darstellt, die nach dem Schema Eingang: Probe/Fragestellung – Ausgang: Ergebnis/Aussage funktioniert. Vielmehr erfordert jede der Methoden einen fundierten Sachverstand bei der Probenpräparation, Probenuntersuchung und der Auswertung sowie der Interpretation der Ergebnisse. Die folgenden Beschreibungen sollen deshalb einen Einblick in die wichtigsten Methoden geben. Sie haben nicht den Anspruch, alle Verfahren vollständig aufzulisten, noch wird der Leser sie nach der Lektüre eigenständig beherrschen. Vielmehr sollen die Untersuchungsmethoden soweit vertraut sein, dass im Gespräch mit einer sachkundigen Person entschieden werden kann, welche davon zur Klärung bestimmter Fragestellungen geeignet sind.

Oftmals werden die Begriffe Phase und chemische Zusammensetzung verwechselt. Der Begriff der Phase definiert den Aggregatzustand eines Materials und zeigt an, ob es gasförmig, flüssig oder fest ist. Feste Stoffe können kristallin sein, d.h. ihre Atome sind dreidimensional wiederholbar angeordnet, oder sie können amorph sein, d.h. die Atome sind nicht wiederholbar geordnet. Ein Beispiel ist die chemische Verbindung H_2O , welches in den unterschiedlichen Aggregatzuständen unter verschiedenen Namen bekannt ist: Im festem Zustand wird von Eis, im flüssigen Zustand von Wasser gesprochen und gasförmig wird es Dampf genannt. Eis ist kristallin, besitzt aber nicht nur eine Kristallstruktur, sondern mehrere, abhängig von der Temperatur und dem Druck [8.1]. Kristalline Stoffe können unterschiedliche Kristallstrukturen bei gleicher chemischer Zusammensetzung aufweisen (Polymorphie, Bild 8.1) [8.2]. Das Element Kohlenstoff ist ein Beispiel für unterschiedliche Festphasen, da es unter anderem in Form von Diamant oder Graphit vorkommen kann. Beide sind zwar kristallin, besitzen aber unterschiedliche Kristallstrukturen sowie stark unterschiedliche Eigenschaften bei gleicher chemischer Zusammensetzung. Ein letztes Beispiel ist die chemische Verbindung Calciumcarbonat CaCO_3 , das als Calcit, Aragonit und Vaterit auftritt [8.3]. Alle drei Phasen besitzen die exakt gleiche chemische Zusammensetzung aber unterscheiden sich in deren Kristallstrukturen, was ihnen auch unterschiedliche Eigenschaften verleiht. Calcit und Vaterit können zusammen im carbonatisierten Beton auftreten [8.4].



Bild 8.1 Ein Beispiel für polymorphe Phasen (gleiche chemische Zusammensetzung bei unterschiedlicher Kristallstruktur): Eisensulfid (FeS_2) in der Form von Pyrit (links) und Markasit (rechts).

Die chemische Zusammensetzung eines Stoffes gibt dagegen an, aus welchen Atomen ein Material aufgebaut ist. Calcit, Aragonit und Vaterit bestehen aus 40 Masse-% Calcium, 12 Masse-% Kohlenstoff und 48 Masse-% Sauerstoff. Chemische Zusammensetzungen werden jedoch meist in der Oxidform angegeben, d.h. die drei Phasen besteht aus 56 Masse-% CaO und 44 Masse-% CO_2 . Die chemische

Zusammensetzung sagt jedoch noch nichts über den Aggregatzustand aus. Wird nur die chemische Zusammensetzung angegeben, z. B. Calciumcarbonat, ist noch nicht bekannt, ob es sich um Calcit, Aragonit oder Vaterit handelt. Dies wird erst durch eine Phasenanalyse bestimmt.

8.2 Gefügeanalyse von Baustoffen

Ein Materialgefüge beschreibt dessen Gefügebestandteile, insbesondere deren Art, Größe, Form, Orientierung und Verteilung [8.5]. Gefügebestandteile können Mineralphasen, organische Komponenten (z. B. Polymerfasern), Metalle (z. B. Bewehrung im Beton), Poren (z. B. Luft- und Kapillarporen in Mörteln) aber auch Materialkomponenten sein (z. B. verschiedene Lagen eines Putzes, Bild 8.2). Ein Materialgefüge lässt sich daher noch weiter unterteilen in [8.5]:

- › Phasenbestandteile – die stofflichen Komponenten eines Materials,
- › Textur – die räumliche Orientierung von Gefügemerkmalen,
- › Struktur – Form, Größe und Verteilung von Phasen, Poren und anderen Gefügebestandteilen.

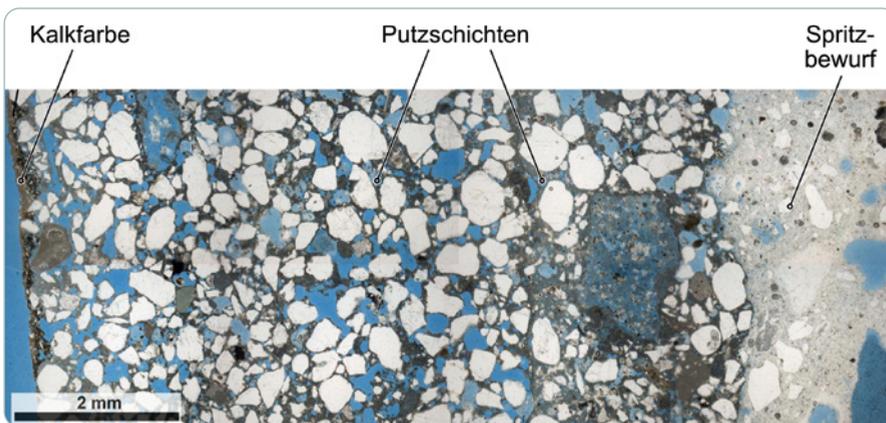


Bild 8.2 Bild eines Querschnitts (Dünnschliffbild; Putzprobe aus Petra, Jordanien). Deutlich sind die verschiedenen Komponenten des Putzes zu erkennen: Farbe, Putzschichten aus Kalkmörteln und Spritzbewurf aus Gipsmörtel.

Mit diesen Unterteilungen lassen sich Baustoffe entsprechend ihres Gefüges charakterisieren. Dies ist zum Beispiel nützlich bei der Qualitätskontrolle oder zur Beschreibung von Gefügeänderungen infolge der Schädigung eines Materials.

Die Gefügeanalyse wird von Experten vorgenommen, die mit einem Baustoff bzw. einer Baustoffgruppe vertraut sind. Die Beschreibung eines Baustoffgefüges erfolgt meist mit meso- und mikroskopischen Methoden, kann jedoch schon im makro-

skopischen Maßstab beginnen. Besonders bei Gefügeänderungen eines Baustoffs aufgrund von Schäden, sollte eine Betrachtung des Zustands eines Gebäudes oder Gebäudeteils unbedingt am Anfang einer Schadensanalyse stehen [8.5]. Makroskopische Bestandsaufnahmen auf Gebäudeniveau werden meist von Ingenieuren oder Architekten durchgeführt und materialkundliche Untersuchungen auf der Meso- und Mikroebene meist von Material- oder Werkstoffkundlern (Bild 8.3). Hier ergibt sich das Risiko, dass die unterschiedlichen Berufsgruppen unterschiedliche Ergebnisse von Gefügeanalysen erwarten und es deshalb zu Missverständnissen zwischen Ingenieuren, Architekten und Materialkundlern kommt. Es ist daher wichtig, in einem offenen und deutlichen Dialog zwischen allen Beteiligten zu klären, was von Gefügeanalysen erwartet werden kann und was diese tatsächlich zur Schadensaufklärung beitragen können.

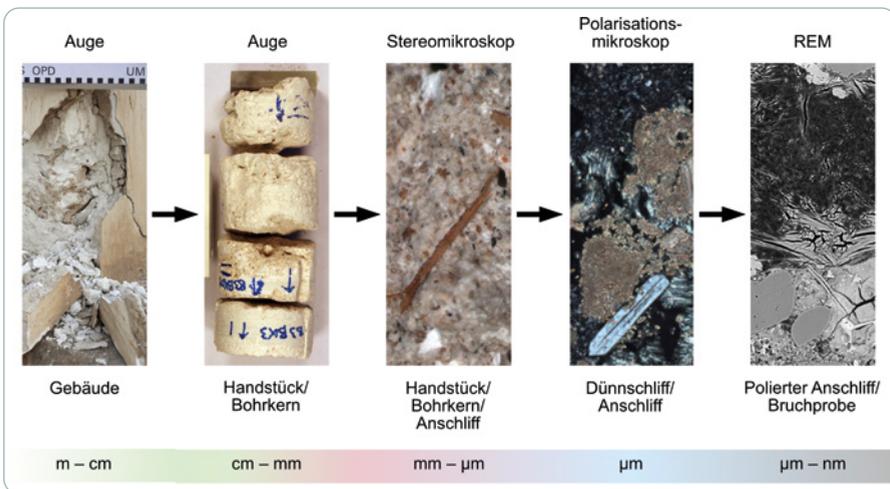


Bild 8.3 Unterschiedliche Größenbereiche, die bei der Gefügeanalyse berücksichtigt werden sollten. Die Ergebnisse der Untersuchungen jeder Stufe ergeben zusammen ein Gesamtbild bezüglich der Charakterisierung von Baustoffen oder bei der Schadensanalyse.

Zur Gefügeanalyse werden verschiedene Instrumente und Probenarten verwendet (Bild 8.3). Bereits an einem Bohrkern oder Handstück eines Baumaterials lassen sich Gefügemerkmale mit dem Auge bestimmen: Handelt es sich um ein Gestein, einen Putz oder einen Beton? Wenn es ein Gestein ist, gibt es dann Texturmerkmale, die auf ein Sediment oder metamorphes Gestein hindeuten? Wenn es sich um einen Putz handelt, welche maximale Korngröße weist der Sand auf? Sind die Sandpartikel gerundet oder kantig? Wie sieht das Bindemittel aus? Sind Luftporen vorhanden? Diese Beobachtungen können mit einem geübten Auge relativ schnell gemacht werden. Für eine detailliertere Untersuchung werden mikroskopische Methoden eingesetzt. In den meisten Fällen reichen hierzu

lichtmikroskopische Untersuchungen aus. In einigen Fällen ist allerdings ein Rasterelektronenmikroskop (REM), das mit einer Analyseneinheit zur mikrochemischen Charakterisierung (EDX) versehen ist, notwendig. Letztendlich tragen die Ergebnisse zur Klärung bestimmter Fragestellungen bei, wobei noch Ergebnisse von anderen Prüfungen berücksichtigt werden sollten, z. B. mechanische Eigenschaften oder Wassertransportkennwerte.

Bei den lichtmikroskopischen Untersuchungen werden hauptsächlich Stereomikroskope und Polarisationsmikroskope verwendet. Beide Methoden sind verhältnismäßig schnell, erfordern jedoch ausgebildetes Personal. Die Bedienung eines Polarisationsmikroskops ist zwar relativ einfach, die eigentliche Gefügeanalyse erfordert jedoch eine lange Schulung und wird meist von Personen durchgeführt, die in den Geowissenschaften in der Wechselwirkung von polarisiertem Licht und kristallinen Phasen sowie in der Gefügekunde ausgebildet wurden. Bild 8.4 zeigt einen typischen Arbeitsplatz mit Stereo- und Polarisationsmikroskop. Beim Rasterelektronenmikroskop erfordert die Bedienung des Geräts eine gute Ausbildung, die Interpretation von Bilddaten und chemischen Analysen ist etwas einfacher als bei der Polarisationsmikroskopie.



Bild 8.4 Typischer Mikroskopiarbeitsplatz. Rechts neben dem Polarisationsmikroskop befindet sich eine Probenhalterung für die Punktzählung zur quantitativen Bestimmung von Mineralbestandteilen.

Bei der Stereomikroskopie können Handstücke oder Bohrkerne verwendet werden. Besser ist jedoch eine plangeschliffene Probe, welche die meisten der Textur- und Struktureigenschaften des Baustoffgefüges zeigt. Für die Untersuchung mit dem Polarisationsmikroskop werden Dünnschliffe verwendet, spezielle Probenpräparate, welche die meisten Baustoffkomponenten durchscheinend erscheinen lassen und nicht nur eine Textur- und Strukturanalyse erlauben, sondern auch eine Bestimmung von Mineralphasen zulässt. Für die Rasterelektronenmikroskopie können zwei Probentypen verwendet werden: Probenbruchstücke, die meist in ihrer Größe begrenzt sind oder polierte Anschliffe. Bruchstücke erzeugen teilweise zwar schöne und manchmal sogar spektakuläre Bilder von Phasen oder Komponenten im Baustoff, besitzen jedoch aufgrund der Art und Weise, wie Bruchstücke untersucht werden, eine nur begrenzte statistische und räumliche Aussagekraft. Besser sind polierte Anschliffe, die vom Standpunkt der Gefügeuntersuchung eine wesentlich genauere Aussage bezüglich der Gefüge-

komponenten, deren Lage und Größenverhältnisse zulassen. Mikrochemische Analysen an polierten Anschliffen führen zu wesentlich genaueren Ergebnissen als bei Bruchproben.

Die für Transportvorgänge wichtige Porenstruktur eines Baustoffs kann mittels Mikroskopie und digitaler Bildanalyse untersucht, abgeschätzt und quantifiziert werden. Zur Porenstrukturanalyse wird jedoch häufig eine andere Methode eingesetzt, die besonders bei sehr feinporigen Materialien, wie Beton und zementgebundenen Baustoffen, relativ schnell quantitative Ergebnisse liefert, die Quecksilberdruckporosimetrie (Kapitel 8.2.4).

8.2.1 Stereomikroskopie

Das Stereomikroskop (Bild 8.5) erlaubt eine räumliche Betrachtung von Proben mit einer optischen Auflösung von einigen zehn Mikrometern [8.6]. Der räumliche Eindruck wird im Mikroskop durch zwei getrennte Strahlengänge erzeugt (Bild 8.5). Moderne Stereomikroskope besitzen üblicherweise eine Zoomoptik, die das Einstellen von stufenlosen Vergrößerungen erlaubt. Bei der Gesamtvergrößerung ist zu beachten, dass diese sich aus den Vergrößerungen des Objektivs und des Okulars zusammensetzt (letztere befindet sich am Okular):

› Gesamtvergrößerung = Objektivvergrößerung × Okularvergrößerung

Besitzt das Objektiv eine 3-fache und das Okular eine 10-fache Vergrößerung ist die Gesamtvergrößerung 30-fach. Typische Gesamtvergrößerungen bei Stereomikroskopen liegen im 5- bis 100-fachen Bereich. Mit Vorsatzlinsen lassen sich auch höhere Vergrößerungen erreichen. Bei diesen hohen Vergrößerungen kann allerdings die Bildqualität nachlassen.

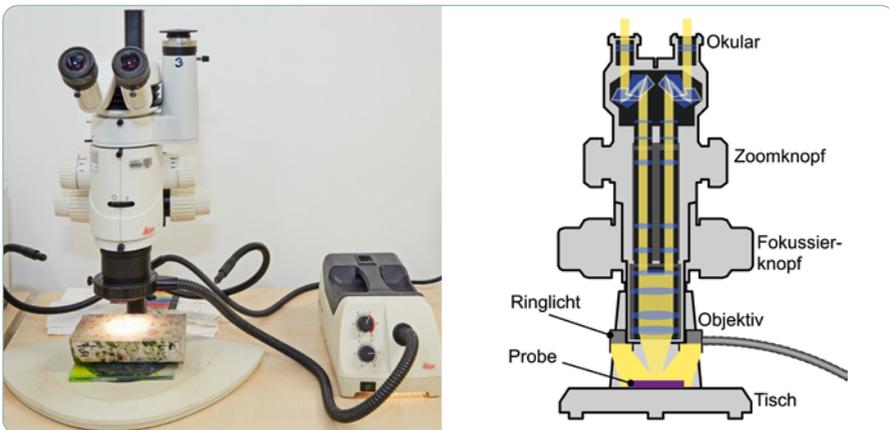


Bild 8.5 Typisches Stereomikroskop mit Zoomobjektiv und eine Halogenleuchte mit Lichtleitern (links). Strahlengang in einem Stereomikroskop (rechts).

Gearbeitet wird in den meisten Fällen im Auflicht, das heißt, das Licht kommt von seitlich oben. Zur besseren Ausleuchtung ist die Lichtquelle teilweise beweglich. Diese besteht oft aus einem oder mehreren Lichtleitern, die an einem Lampengehäuse angeschlossen sind, in dem sich eine Halogen- oder heute häufig eine LED-Lampe befindet. Viele Geräte sind mit einem Lichtleiter- oder LED-Ringlicht ausgestattet, das um das Objektiv des Stereomikroskops angebracht wird. Durch das Schräglicht können Farben und Strukturen sehr gut auf den Proben erkannt werden. Die Stereooptik erlaubt besonders bei der Betrachtung von rauen Bruchflächen eine gute räumliche Zuordnung der einzelnen Gefügemerkmale. Zur Dokumentation besitzen heutige Stereomikroskope meist eine spezielle Digitalkamera, die an die Optik des Mikroskops und an ein digitales Bildanalyse- und Bearbeitungsprogramm angepasst ist. Die Auflösung der Bilder der Kamera liegen zwischen zwei und acht Megapixel. Da diese Kameras relativ teuer sind, gibt es auch Lösungen mit entsprechenden Adaptern, die die Verwendung von herkömmlichen Digitalkameras erlauben.

Verwendet werden können alle Proben, die unter die Optik des Stereomikroskops passen. Gearbeitet wird meist mit Arbeitsabständen im cm-Bereich, was die Gefahr, dass unebene Probenflächen das Objektiv beschädigen, verringert. Für besonders große Proben werden Stativhalterungen mit schwenkbaren Armen angeboten, welche eine Untersuchung von Gegenständen in beliebigen Positionen erlauben. Bei Baustoffen sind typische Proben Handstücke oder Bohrkern. Zur genaueren Gefügeuntersuchung können Proben in Epoxidharz eingebettet, gesägt und angeschliffen werden. Dies erlaubt eine gute räumliche Zuordnung von Gefügemerkmalen und deren Größenverhältnisse (Bild 8.6). Außerdem lassen sich Schadensmerkmale, die in der Auflösung des Stereomikroskops liegen, gut erkennen (Bild 8.6). Einige der Stereomikroskope können mit UV-Licht ausgestattet werden. Wenn das Epoxidharz zur Probeneinbettung einen fluoreszierenden Farbstoff enthält, können dadurch Gefügeveränderungen (z. B. Rissbildungen) mit dem Stereomikroskop sichtbar gemacht werden (Bild 8.7).

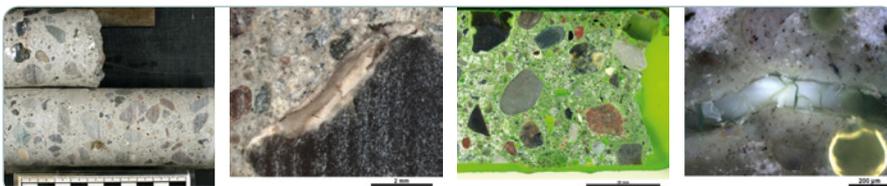


Bild 8.6 Beispiele für die Untersuchung eines durch AKR geschädigten Betons mittels Stereomikroskopie. Von links nach rechts: Bohrkern; reaktives Flintkorn auf der Mantelfläche des Kerns; geschnittenes, in Epoxidharz eingebettetes und geschliffenes Bohrkernsegment (zusammengesetzt aus mehreren Aufnahmen); AKR-Gelbildung in einem Riss im Beton.

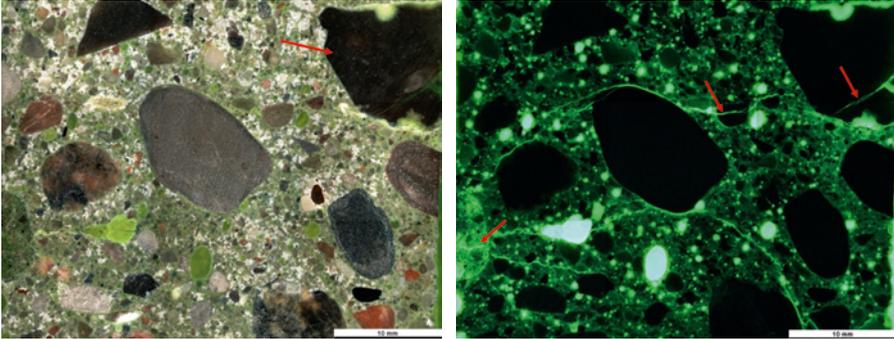


Bild 8.7 Auflichtbild eines durch Rissbildung geschädigten Betons (links) und derselbe Ausschnitt unter UV-Licht (rechts). Deutlich sind die Risse im Gefüge und deren Verlauf erkennbar (Stereomikroskopaufnahmen).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Stereomikroskopie eine nützliche Methode ist, um relativ schnell und mit begrenztem Aufwand zu Aussagen bezüglich eines Materialgefüges zu kommen. Wenn nur Bruchflächen untersucht werden sollen oder Mantelflächen von Bohrkernen, ist die Probenvorbereitung minimal. Von gesägten, mit Epoxidharz imprägnierten und geschliffenen Proben (Anschnitte) lassen sich jedoch bessere Aussagen erarbeiten und unter Umständen eine erste Identifizierung von Gefügekomponenten durchführen. Anschnitte sind jedoch aufwändiger herzustellen und erfordern in deren Präparation auch mehr Erfahrung. Die Stereomikroskope sind in einfacher Ausstattung weniger teuer als Polarisationsmikroskope. Für zusätzliche Optionen, wie eine Digitalkamera, ein Bildanalyse- und Bearbeitungssystem sowie eine UV-Leuchteinheit müssen jedoch entsprechend mehr finanzielle Mittel aufgebracht werden.

8.2.2 Polarisationsmikroskopie

Wie weiter oben erwähnt, erfordert die Untersuchung von Gefügemerkmalen mit dem Polarisationsmikroskop eine tiefgreifende Ausbildung, wie sie z. B. in den Geowissenschaften angeboten wird. Für die richtige Ansprache von Baustoffen ist zusätzlich ein fundiertes Wissen in der Baustoffkunde notwendig, da bestimmte Materialien, z. B. Beton, Mörtel oder andere industrielle Baustoffe, spezifische produktionsbedingte Merkmale aufweisen, die in Natursteinen nicht vorkommen. Zur Durchführung von Gefügeanalysen mittels Polarisationsmikroskopie sind spezielle Präparate, sogenannte Dünnschliffe erforderlich. Dünnschliffe besitzen eine Fläche von ca. 50 mm × 30 mm bis 100 mm × 50 mm je nachdem, mit welchen Maschinen sie präpariert werden, da Schleifmaschinen unterschiedlicher Hersteller verschiedene Maße für die Probenaufnahme besitzen. Vor der Herstellung von Dünnschliffen sollte genau beurteilt werden, von wo Teilproben für

die Anfertigung von Dünnschliffen genommen werden sollen. Im Folgenden sind einige Aspekte der Entnahme von Teilproben für verschiedene Materialien und Ausgangssituationen geschildert (Bild 8.8):

- › **Natursteine, Mauersteine** – Die Dünnschliffebene wird in den meisten Fällen senkrecht zu Schichtungs- oder Schieferungsrichtungen eingestellt (in den meisten Fällen ist dies parallel zur vertikalen Steinachse), um möglichst viele Gefügemerkmale zu erhalten. Sollen Profiluntersuchungen (von der Oberfläche zum Steininnern) vorgenommen werden, wird die Dünnschliffebene senkrecht zur Steinoberfläche und Schichtung/Schieferung orientiert. Unter Umständen sind zwei oder mehr Dünnschliffe erforderlich (z. B. verwitterte Oberfläche, gesunder Kern). Werden Bohrkern von einem Mauerwerk entnommen, ist unbedingt darauf zu achten, dass die Baustoffoberfläche erhalten bleibt. Wird diese bei der Bohrkernentnahme abgescheert, z. B. weil sie verwittert ist, sollten die Einzelteile beispielsweise mit Klebeband auf den Bohrkern an der entsprechenden Stelle fixiert werden.
- › **Putzmörtel** – Die Dünnschliffebene liegt senkrecht zur Putzoberfläche und den Putzschichten.
- › **Mauermörtel** – Die Dünnschliffebene sollte parallel der größten Probenausdehnung liegen, um möglichst viel des Mörtels auf einen Dünnschliff zu bringen.
- › **Betonbohrkern** – Zur Untersuchung von Beton sind aufgrund der Korngröße meist zwei oder mehr Dünnschliffproben erforderlich. Alle Dünnschliffe sollten senkrecht zur Bohrrichtung liegen, die in der Regel ebenfalls senkrecht oder schräg zur Bauteiloberfläche orientiert ist. Mindestens ein Dünnschliff sollte die Oberfläche des Betonbauteils repräsentieren. Ein oder mehrere Dünnschliffe können von tieferen Abschnitten des Bohrkerns stammen. Wichtig bei der Untersuchung der Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) im Beton: Durch die Auslaugung von Alkalien im Oberflächenbereich des Betons sind AKR-bedingte Schäden in Tiefen >50 mm meist ausgeprägter.

Bei der Entnahme von Bohrkernen ist die vertikale Gebäudeachse auf der Stirnfläche des Bohrkerns mit einem Doppelpfeil zu markieren. Dies ist besonders bei Mauerwerksproben wichtig, um die Einbaulage des Steins im Mauerwerk bei Gefügeuntersuchungen zu berücksichtigen. Zerfällt ein Bohrkern bei der Entnahme in mehrere Teilstücke, was sehr häufig bei längeren Kernen der Fall ist, ist jedes Teilstück einzeln zu nummerieren (z. B. XY2.1, XY2.2, XY2.3, etc.) und mit einem Pfeil zu versehen, der die Bohrrichtung wiedergibt. Auch bei Handstückproben sollte die Baustoffoberfläche markiert werden. Dies ist besonders wichtig, wenn die Probenpräparation und die Untersuchungen in getrennten Laboren erfolgt. Durch explizite Kommunikation mit allen Beteiligten muss sichergestellt werden, dass bei der Probenpräparation, vor allem beim Trimmen der Proben, nicht wichtige Teile abgeschnitten und verworfen werden.

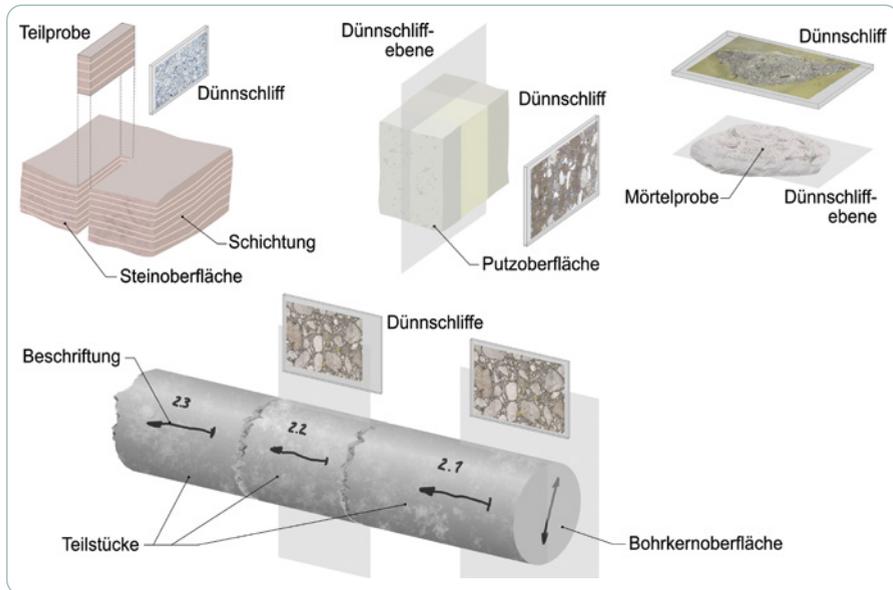


Bild 8.8 Verschiedene Bauwerksproben und Beispiele, wie Dünnschliffe von diesen entnommen werden können: Stein aus einem Mauerwerk (links oben), Putzprobe (Mitte oben), Mörtelprobe (rechts oben) und Bohrkern, der in drei Teile zerfallen ist (unten).

Die Herstellung von Dünnschliffen erfolgt in speziellen Laboren. Oftmals sind sie in Universitäten mit geowissenschaftlichen Studienrichtungen zu finden. Daneben gibt es noch wenige kommerzielle Labore, die Dünnschliffe herstellen. Die Bearbeitung läuft in mehreren Stufen ab:

- › Nach dem Probeneingang wird die Probe bei Bedarf getrimmt, damit sie auf einen Probenträger passt.
- › Anschließend werden die Proben in gefärbtes oder fluoreszierendes Epoxidharz eingebettet. Dies soll die Probe vor Beschädigung bei der Präparation schützen (z. B. bei geringsten Mörteln oder verwitterten Proben). Da die meisten mineralischen Baustoffe porös sind, zeigt die Farbe bzw. die Fluoreszenz (bei Verwendung von UV-Licht) den Porenraum oder eventuell vorhandene Risse an. Die Einbettung sollte im Vakuum erfolgen, um so viel wie möglich der kleinsten Poren zu füllen.
- › Danach folgt das Planschleifen einer Fläche der Probe mithilfe spezieller Schleifmaschinen. Es sollte möglichst auf Diamantschleifscheiben geschliffen werden. Je nach Typ der verwendeten Maschinen sind eventuell noch Zwischenschritte erforderlich. Die plangeschleifte Fläche repräsentiert später die Dünnschliff-ebene.
- › Dann folgt das Aufkleben der geschliffenen Probenfläche auf einen Glaträger. Als Kleber wird meist mit einem UV-härtendem Acrylatkleber gearbeitet, da

dieser innerhalb weniger Minuten aushärtet. Alternativ kann auch Epoxidharz verwendet werden. Wichtig beim Kleben ist, dass keine Luftblasen eingeschlossen werden.

- › Die auf dem Glasträger aufgeklebte Probe wird nun mit einer speziellen Dünnschlicfsäge planparallel zum Glas auf eine Dicke von 0,5 bis 1 mm gesägt.
- › Dieser »Dickschliff« wird anschließend auf einer Schleifmaschine für Dünnschliffe auf eine Dicke zwischen 25 bis 30 μm geschliffen. Hier ist ebenfalls eine Schleifscheibe oder ein Schleifkopf mit Diamanten als Schleifmittel vorzuziehen.
- › Soll der Dünnschliff nur lichtmikroskopisch untersucht werden, wird nun ein spezielles Deckglas auf die Probe aufgeklebt. Auch hier ist zu beachten, keine Luftblasen einzuschließen.
- › Optional können Dünnschliffe poliert werden. Dies hat den Vorteil, dass diese unter dem Rasterelektronenmikroskop untersucht werden können. In diesen Fällen werden meist mikrochemische Untersuchungen durchgeführt. Auch für das Polieren sollten ausschließlich Diamantschleifmittel verwendet werden. Bei der Verwendung anderer Schleifmittel, z. B. Aluminiumoxid oder Siliziumcarbid, besteht die Gefahr, dass dieses teilweise im Einbettungsmittel stecken bleibt und bei der mikrochemischen Analyse zu falschen Analysenergebnissen beiträgt.

Die Untersuchung von Dünnschliffen erfolgt mit dem Polarisationsmikroskop (Bild 8.9). Ein Polarisationsmikroskop unterscheidet sich von herkömmlichen Forschungsmikroskopen in drei wesentlichen Dingen [8.7]:

- › Es wird mit Durchlicht und planpolarisiertem Licht gearbeitet.
- › Es besitzt einen drehbaren Mikroskoptisch, der es ermöglicht, die Probe um die optische Achse zu drehen.
- › Im Strahlengang befinden sich zwei Polarisationsfilter, der Polarisator und der Analysator.

Der Polarisator erzeugt planpolarisiertes Licht, das im Dünnschliff mit einigen der kristallinen Phasen wechselwirkt [8.7]. Wird der Analysator eingeschoben, der senkrecht zum Polarisator orientiert ist (gekreuzte Polarisatoren), werden einige der Wellenlängen, die in den Kristallen wechselwirken, ausgelöscht und es entstehen Interferenzfarben (Bild 8.10). Weiterhin ergeben sich andere Phänomene zwischen den mineralischen Komponenten der Baustoffe und dem polarisierten Licht, was zur Identifizierung der unterschiedlichen mineralischen Bestandteile herangezogen werden kann [8.7] [8.8]. Im Gegensatz zur Stereomikroskopie besitzt das Polarisationsmikroskop nur einen Strahlengang, d. h. das in den Augen erzeugte Bild ist nicht räumlich. Dies spielt bei der Untersuchung von Dünnschliffen auch keine Rolle. Allerdings besitzen die meisten Mikroskope Binokulare, die jedoch kein räumliches Bild erzeugen, sondern bei denen der eine Strahlengang mit einem Prisma in zwei aufgespalten wird, um ein weniger anstrengendes Mikroskopieren zu ermöglichen.

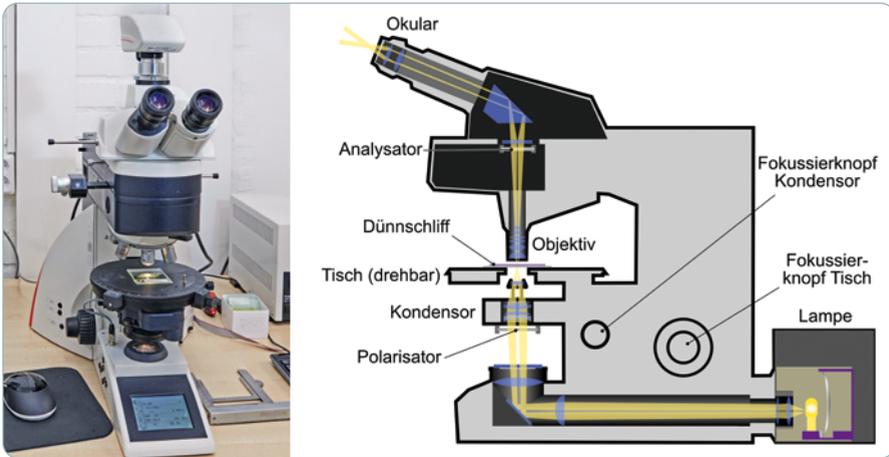


Bild 8.9 Ein modernes Polarisationsmikroskop mit rundem Drehtisch sowie Polarisator und Analysator (links). Der Strahlengang und die Komponenten eines Polarisationsmikroskops (rechts).

Der Vorteil der Polarisationsmikroskopie ist der Umstand, dass gleichzeitig mit der Analyse der Struktur und der Textur eines Baustoffs eine Phasenanalyse und somit eine räumliche Zuordnung der identifizierten Phasen im Baustoff erfolgt. Es können damit relativ schnell relevante Informationen bezüglich der Charakterisierung und/oder der Schadensanalyse erhalten werden. Die Polarisationsmikroskopie eignet sich für eine Reihe von Fragestellungen. Im Folgenden sollen einige näher besprochen werden.

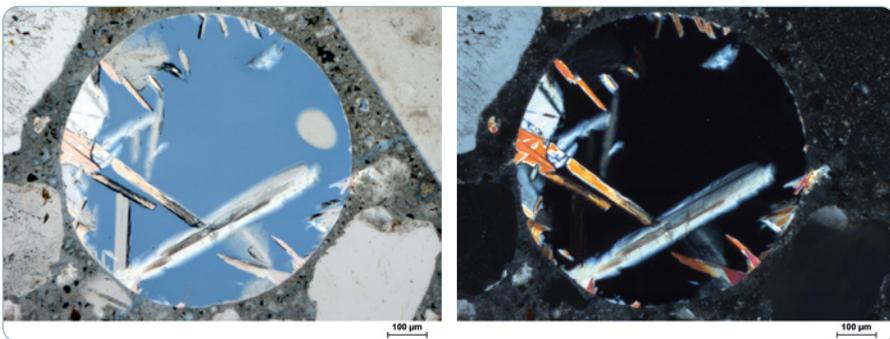


Bild 8.10 Eine mikroskopische Aufnahme von Kristallen in einer Luftpore eines Zementmörtels (links). Bei gekreuzten Polarisatoren (rechts) erscheinen Interferenzfarben, die unter anderem zur Bestimmung der Kristalle herangezogen werden können. In diesem Fall handelt es sich um Portlandit (Dünnschliff mit blau eingefärbten Einbettungsharz).

Materialcharakterisierung

Mittels Dünnschliffuntersuchung lässt sich qualitativ relativ schnell ermitteln, um welchen Baustoff es sich handelt. Bei Mörtel kann das Bindemittel und die Art der Gesteinskörnung, sowie deren Struktur (z. B. Kornform und Größenverteilung) bestimmt werden. Mörtel mit Kalkbindemittel können qualitativ in hydraulische und reine Kalkmörtel unterschieden (Bild 8.11) [8.9] sowie Gipsbaustoffe sicher identifiziert werden. Um bei Mörtel Aussagen bezüglich des Verhältnisses von Bindemittel zur Gesteinskörnung zu treffen, bedarf es einer quantitativen Auswertung der Anteile von Bindemittel, Zuschlag (Gesteinskörnung) und Luftporen im Mörtel. Dies kann chemisch erfolgen oder alternativ mit einer mikroskopischen Punktauswertung im Dünnschliff. Die eigentliche Berechnung der ursprünglichen Bindemittelanteile erfordert jedoch einige Annahmen, z. B. das ursprüngliche Wasser-Bindemittel-Verhältnis, das sehr schwierig abzuschätzen und entsprechend fehleranfällig ist [8.10] [8.11]. Quantitative Ergebnisse, die mit mikroskopischen Methoden ermittelt wurden, sind deshalb mit Sachverstand zu interpretieren. Historische Mörtel sind meist sehr inhomogen und quantitative Auswertungen können mehr als einen Dünnschliff erfordern, wenn die Proben beispielsweise Zuschläge mit großen Korndurchmessern enthalten [8.11]. Im Gegensatz zu chemischen Methoden kann das Bindemittel-Zuschlag-Verhältnis mittel mikroskopischer Auswertemethoden auch bei Mörteln abgeschätzt werden, die carbonatische Zuschläge enthalten.

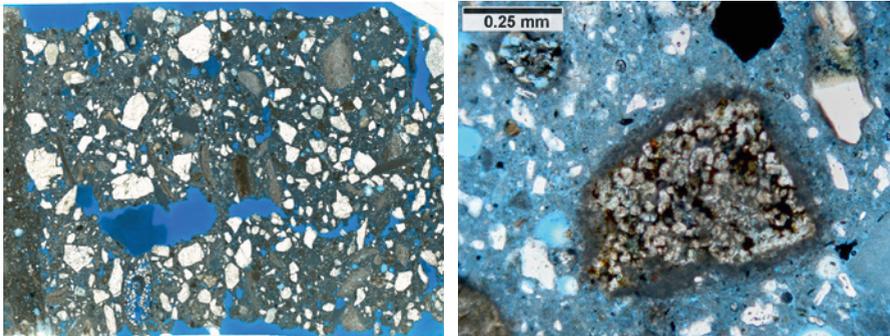
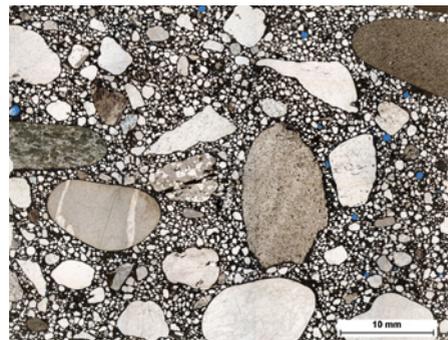
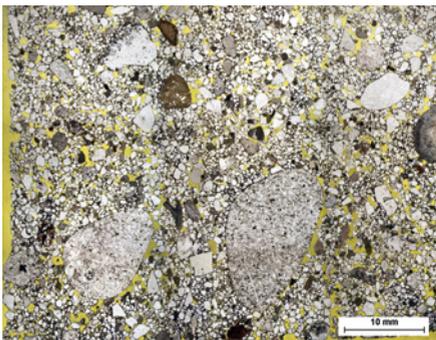
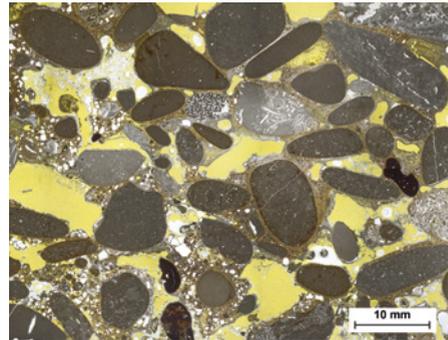


Bild 8.11 Dünnschliffbilder von Putzproben mit blau eingefärbtem Harz. Deutlich ist ein Feinputz an der linken Bildkante und der darunterliegende Putzmörtel zu erkennen. Beide Putzschichten bestehen aus einem Kalkbindemittel, dem als hydraulische Komponente Portlandzement zugemischt wurde (links). Ein Portlandzementklinkerkorn (rechts). Der Putz stammt von einem historischen Gebäude, das Ende des 19. Jahrhunderts errichtet wurde.

Mit Dünnschliffuntersuchungen lassen sich Betone bezüglich ihres Gefüges und ihrer Zusammensetzung gut charakterisieren (Bild 8.12). Besonders die Art der Gesteinskörnungen können sicher identifiziert und durch Punktauszählung auch quantifiziert werden. Zusatzstoffe bzw. Zumahlstoffe im Bindemittel lassen sich nur bedingt bestimmen. Hüttensand, Flugasche und natürliche Puzzolane (z. B. Trass) können relativ einfach bestimmt werden. Bei Kalkstein oder anderen Gesteismehlen ist die Identifizierung schwieriger, da unterschieden werden muss, ob es sich um Zusatzstoffe handelt oder lediglich um den Feinkornanteil der Gesteinskörnung, was nicht immer zweifelsfrei geklärt werden kann. Mikrosilika, ein Zusatzstoff, der gelegentlich eingesetzt wird, kann mikroskopisch in den meisten Fällen nicht identifiziert werden, da dessen Partikelgröße unterhalb oder an der Grenze der optischen Auflösung der Mikroskope liegt. Weiterhin lässt sich bei Betonen der W/B- bzw. W/Z-Wert bestimmen [8.12]. Die Methode ist vergleichend und benötigt Dünnschliffe mit derselben Betonzusammensetzung und demselben Bindemittel. Das Prinzip ist die Untersuchung der Fluoreszenz des Bindemittels der Probe im Verhältnis zu den Vergleichspräparaten mit unterschiedlichen W/B-Werten.

Bild 8.12 Drei Beispiele für das mikroskopische Gefüge von Beton: Ein zementarmer Beton aus Anfang der 1920er-Jahre (oben), ein Beton aus dem Ende der 1930er-Jahre (unten links, beide Proben eingebettet in gelb gefärbtes Epoxidharz).

Ein moderner Beton (unten rechts, in blau gefärbtes Epoxidharz eingebettet).



Natursteine, Ziegel und andere Steine für Mauerwerk lassen sich qualitativ und quantitativ (Punktauszählung) untersuchen und entsprechend charakterisie-

ren. Auch hier ist die gemeinsame Analyse der Struktur, Textur und der Phasenzusammensetzung eines Baustoffs vorteilhaft bei der Charakterisierung. Bei allen Baustoffen lässt die Mikroskopie an Dünnschliffen eine qualitative Abschätzung der Porenstruktur zu. Dies gilt allerdings nur für die Poren, deren Größen oberhalb der optischen Auflösung der Mikroskope liegen, z. B. Luftporen in Mörtel und Beton oder größere Kapillarporen.

Schadensanalyse

Die Polarisationsmikroskopie erlaubt eine relativ schnelle Analyse von Schädigungsmechanismen, die chemische Reaktionsprodukte hinterlassen oder starke Gefügeänderungen hervorrufen. Zwar müssen zur Verifizierung unter Umständen noch andere Methoden hinzugezogen werden (z. B. Rasterelektronenmikroskopie), mitunter lässt die Mikroskopie am Dünnschliff jedoch bereits eine Aussage bezüglich möglicher Schädigungen zu. Die häufigsten Formen von Schädigungen, die mittels Polarisationsmikroskopie identifiziert werden können sind:

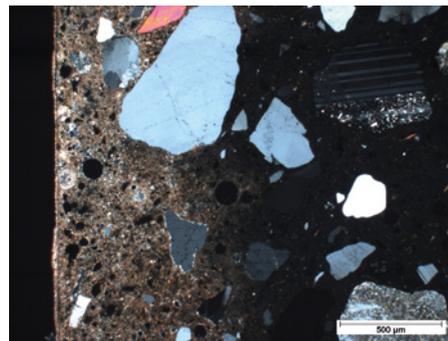
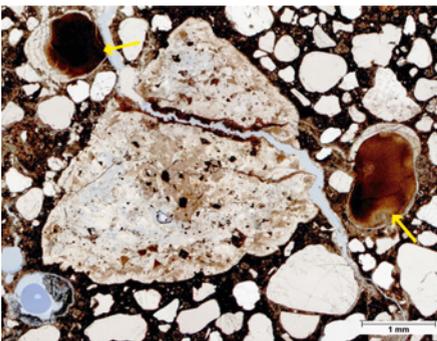
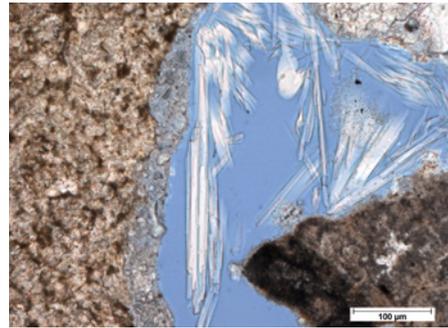
- › Schäden infolge von Salzkristallisationen, z. B. bei Natursteinen, Ziegeln oder Putzmörteln (Bild 8.13). Diese Schäden können mikroskopisch auch dann nachgewiesen werden, wenn auf der Baustoffoberfläche keine Salzausblühungen vorhanden sind. Dünnschliffe von Baustoffproben, die wasserlöslichen Salze enthalten, sind ohne Wasser zu präparieren, da sonst eine Auflösung der Salze erfolgt. Neben gefällten Salzen, können Rissbildungen und Schädigungsprofile untersucht werden. Dazu muss der Dünnschliff (oder ggf. mehrere) das Baustoffprofil (Oberfläche zum Innern des Materials) widerspiegeln (Bild 8.8).
- › Gefügeänderungen von Mauersteinen, die nicht durch Salzkristallisation erzeugt wurden, z. B. durch Frost- oder Säureangriff. In diesen Fällen ist eine Gefügeauflockerung, z. B. eine erhöhte Porosität und/oder Rissbildung im Oberflächenbereich des Baustoffs zu beobachten.



Bild 8.13 Gipsausfällungen in einem Biotitkorn eines Sandsteins (gelbe Pfeile, links). Salzkristallisationen in einer Luftpore eines hydraulischen Kalks (rechts).

- › Sulfatangriff in Beton und Zementmörtel (Bild 8.14). Die Reaktionsprodukte sekundärer Ettringit und Thaumazit können mikroskopisch nachgewiesen werden, insbesondere in Verbindung mit einer deutlichen Rissbildung. Letztere ist notwendig, da Ettringit in geringeren Mengen fast immer auch im ungeschädigten Beton und in Zementmörtel vorhanden ist [8.5].
- › Die Alkali-Silikat-Reaktion (AKR) in Beton lässt sich deutlich nachweisen, wenn ein entsprechendes Rissgefüge und die typischen AKR-Reaktionsprodukte auftreten (Bild 8.14). Typischerweise gehen Risse durch Gesteinskörnungen, wobei Reaktionsprodukte häufig im Inneren der Risse in den Gesteinskörnungen oder an deren Enden auftreten [8.5] [8.15].
- › Frostschäden an Beton können ebenfalls bedingt mittels Mikroskopie beurteilt werden. Frostgeschädigte Betone weisen oftmals ein Rissprofil auf, welches zahlreiche Risse parallel zur Oberfläche und eine geringere Rissanzahl mit zunehmender Tiefe aufweist. Anders als bei der AKR gehen Risse in den meisten Fällen nicht durch Gesteinskörnungen, sondern umrunden diese [8.5].
- › Weiterhin lassen sich z. B. Carbonatisierung in Zementmörtel und Beton nachweisen (Bild 8.14), Rissbildungen aufgrund von plastischem Schwinden bei Beton, Ursachen von materialbedingten Verfärbungen von Naturstein und Beton sowie Treiberscheinungen in Beton und Ziegel charakterisieren.

Bild 8.14 Ettringitbildung in einem Zementmörtel (rechts). AKR in einem Beton. Reaktionsprodukte der AKR sind in Luftporen gewandert (unten links; Pfeile). Carbonatisierung in einem Beton (bei gekreuzten Polarisatoren). Die carbonatisierten Bereiche sind unter gekreuzten Polarisierungen an der bräunlichen Interferenzfarbe erkennbar (unten rechts).



Digitale Bildanalyse

Die digitale Dokumentation mikroskopischer Gefüge, d. h. die Anwendung von Digitalkameras zur Aufnahme von Bildern, gehört inzwischen zum Standard in der Mikroskopie. Die meisten Polarisationsmikroskope können mit Digitalkameras ausgerüstet werden und die Hersteller bieten meist eigene digitale Bildanalyseprogramme an, welche die digitale Kamera am Mikroskop direkt ansteuern und Bilder in die Programme einlesen können. Solche Programme können jedoch auch bei Drittanbietern gekauft werden oder einige Entwickler bieten diese sogar kostenfrei zur Verfügung. Digitale Bildanalysenprogramme sind nicht mit digitalen Bildbearbeitungsprogrammen zu verwechseln. Letztere dienen lediglich zur Bearbeitung von Bildern und besitzen keine Funktionen für eine quantitative Auswertung.

Sollen Gefügemerkmale mittels automatischer digitaler Bildanalyse ausgewertet werden, müssen die Merkmale zuvor entsprechend von den übrigen Merkmalen getrennt werden [8.16]. Es wird hier von Segmentieren gesprochen, d. h. Merkmalen werden Schwellwerte für bestimmte Eigenschaften des Bildes zugeordnet, z. B. ein Graustufenbereich oder ein bestimmter Farbbereich [8.17]. Dies ist notwendig, damit das Programm die gewünschten Gefügemerkmale identifizieren und im gewählten Algorithmus auswerten kann. Neben automatischen Auswertelgorithmen können mit allen Bildanalysenprogrammen manuelle Messungen vorgenommen werden. Dies ist manchmal schneller, wenn nicht allzu viele Merkmale bestimmt werden müssen oder wenn die Segmentierung von Gefügemerkmalen schwierig ist, da Schwellwerte die zu messenden Merkmale nicht sauber trennen können.

Mit digitaler Bildanalyse lassen sich z. B. Rissbreiten in geschädigten Materialproben bestimmen und deren Orientierung erfassen. Weiterhin können Porositäten bestimmt werden, z. B. der Luftporengehalt in Beton oder Mörtel [8.18] [8.19]. Oder es kann der Anteil von Bindemittel zu Gesteinskörnung und zu Luftporen in Mörteln abgeschätzt werden. Um die beim Mischen der Mörtel ursprünglichen Verhältnisse zu ermitteln, müssen jedoch einige Annahmen bezüglich des W/B-Werts und bei Zementmörtel zusätzlich des Hydratationsgrads getroffen werden [8.10].

Werden prozentuale Anteile eines Merkmals im Gesamtgefüge bestimmt, gilt, dass die mittels Bildanalyse bestimmten Flächenanteile den Volumenanteilen des Materials entsprechen [8.16]. Sollen Größenverteilungen von Gefügemerkmalen gemessen werden, die ein Vielfaches über der Dicke eines Dünnschliffs liegen, muss das »Tomatensalatproblem« beachtet werden. Dieses besagt, dass ein beliebiger Querschnitt durch ein Material nur in wenigen Fällen die maximalen Größen eines Partikels wiedergibt. Oder bildlich ausgedrückt: wird durch eine Kiste voller Tomaten, die alle einen Durchmesser von exakt 70 mm haben, eine virtuelle

Schnittebene gelegt, werden in nur wenigen Fällen die maximalen Durchmesser der Tomaten angeschnitten, die meisten Schnittflächen haben einen Durchmesser unter 70 mm. Befinden sich in der Kiste Tomaten mit einem Durchmesser zwischen 50 und 100 mm, können sich bei einem virtuellen Schnitt in der Schnittebene trotz unterschiedlicher Durchmesser unter Umständen dieselben Durchmesser ergeben, wie bei den Tomaten einheitlicher Größe. Größenverteilungen, die in der Fläche (zweidimensional) bestimmt wurden, lassen sich also nicht unmittelbar in räumliche (dreidimensionale) Größenverteilungen übernehmen. Es ist deshalb nicht möglich beispielsweise die Sieblinie einer Gesteinskörnung direkt an einem Schnitt zu messen. Allerdings lassen sich 2-D-Größenverteilungen mathematisch mit Hilfe einer statistischen Berechnung in 3-D-Werte umwandeln, wenn genügend Messergebnisse vorhanden sind [8.16]. Zur Umrechnung von 2-D-Werten in 3-D-Größenverteilungen gibt es spezielle Programme bzw. Programmodule, die teilweise in Bildanalysenprogrammen integriert sind.

Einschränkend muss erwähnt werden, dass die digitale Bildanalyse bei sehr heterogenen Baustoffen, wie historischem Mörtel, in vielen Fällen nur zur Abschätzung und nicht zur präzisen Quantifizierung von Gefügemerkmalen verwendet werden kann. Das liegt zum Teil daran, dass manche Baustoffe unter Umständen sehr inhomogen sind und sehr viele Dünnschliffe ausgewertet werden müssten, um ein statistisch tragbares Resultat zu gewinnen. In den meisten Fällen genügt es jedoch, Gefügemerkmale abzuschätzen, da diese Auswertungen im Zusammenhang mit anderen Daten (Festigkeit, kapillare Wasseraufnahme, etc.) eingestuft werden und mit diesen zusammen in die Zustandsbewertung oder die Planung des weiteren Vorgehens bei einer Reparatur oder Restaurierung einfließen.

Auflichtmikroskopie

Im Gegensatz zur herkömmlichen Polarisationsmikroskopie kommt bei einem Auflichtmikroskop das Licht zur Untersuchung der Probe von oben (Bild 8.15). Das hat den Vorteil, dass bei opaken (undurchsichtigen) Komponenten, die im normalen Durchlicht schwarz erscheinen unter Auflicht das Licht reflektieren. Beruhend auf der Mineralphase wird mehr oder weniger Licht reflektiert, was zur Bestimmung der Phase herangezogen werden kann. Auflichtmikroskope zur Materialuntersuchung besitzen ebenfalls Polarisationsfilter. Wird der Analysator eingeschoben, erscheinen die opaken Phasen in ihren Eigenfarben, was ebenfalls zu deren Bestimmung beitragen kann. Bei der Untersuchung von Farbschichten wird häufig unter reflektiertem polarisiertem Licht bei gekreuzten Polarisatoren gearbeitet, da dann die Eigenfarbe der Farbschicht auftritt und sich die Art der Pigmente einschränken lassen sowie die Anzahl von Farbschichten und deren Schichtdicken bestimmt werden können (Bild 8.15).

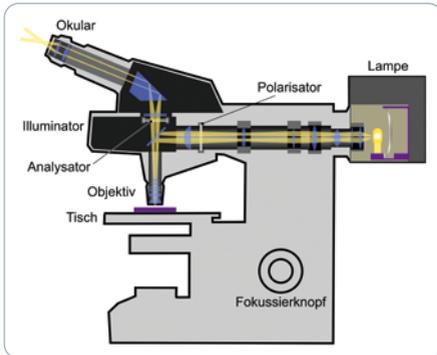
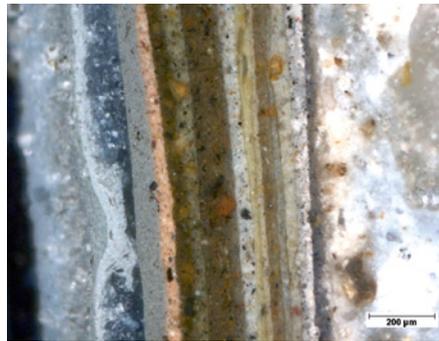
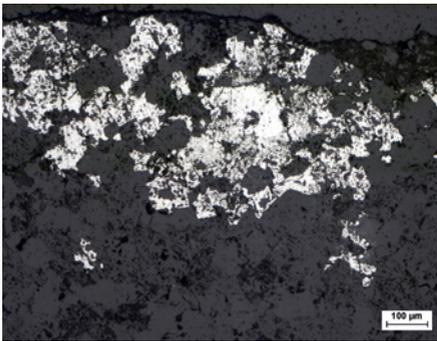


Bild 8.15 Prinzip und Strahlengang im Auflichtmikroskop (oben links). Eine opake Phase in einem Naturstein im reflektierten Licht. Bei der Phase handelt es sich um Pyrit (unten links). Farbprobe mit unterschiedlichen Farbschichten. Die Probe wurde bei gekreuzten Polarisatoren untersucht, wodurch die Eigenfarbe der Farbschichten erscheint (rechts unten). Beide Proben wurden angeschliffen und poliert.



Die Hersteller von Polarisationsmikroskopen bieten meist Optionen an, welche es erlauben, sowohl im Durchlicht als auch im Auflicht zu arbeiten. Um vom Durchlicht zum Auflicht zu wechseln, ist dann meist nur ein Umschalten der Lichtquelle erforderlich. Wichtig ist, dass bei Auflichtarbeiten die Proben am besten poliert sein sollten. Herkömmliche Dünnschliffe mit einem Deckglas sind für Auflichtmikroskopie nicht geeignet.

8.2.3 Rasterelektronenmikroskopie

Mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) lassen sich weit höhere räumliche Auflösungen erzielen als mit dem Polarisationsmikroskop. Das Prinzip des REM beruht auf der Anwendung von Elektronen als bildgebendes Medium. Elektronen werden hierbei an einer Kathode erzeugt, die durch eine Anode mit Hochspannung beschleunigt werden und einen Elektronenstrahl erzeugen. Der Elektronenstrahl läuft durch mehrere Kondensoren-linsen, wobei es sich hierbei um Elektromagnete handelt, die den Elektronenstrahl zu wenigen Nanometern im Durchmesser fokussieren. Nach den Kondensoren-linsen läuft der Elektronenstrahl an einer Rasterspule vorbei, welche diesen gleichmäßig in x-y-Richtung über die Probe rastern lässt (Bild 8.16) [8.20].

Wenn der Elektronenstrahl über die Probe gerastert wird, wechselwirkt die Probenoberfläche mit den Elektronen. Unter anderen werden erzeugt [8.20]:

- › sekundäre Elektronen, die durch den Elektronenstrahl aus der Probe geschossen werden,
- › reflektierte Elektronen, die auch Rückstreuelektronen genannt werden,
- › charakteristische Röntgenstrahlen, die aus der Wechselwirkung der Atome in den Proben mit dem Elektronenstrahl erzeugt werden,
- › sichtbares Licht in Form von Kathodolumineszenz,
- › Rückstreuelektronen, die gebeugt werden.

Jede dieser Wechselwirkungen erzeugt somit weitere Elektronen oder elektromagnetische Strahlungen, die jeweils zur Analyse des Probenmaterials angewendet werden können. Allerdings wird für jede dieser »Wechselwirkungsprodukte« ein eigener Detektor benötigt (Bild 8.16).

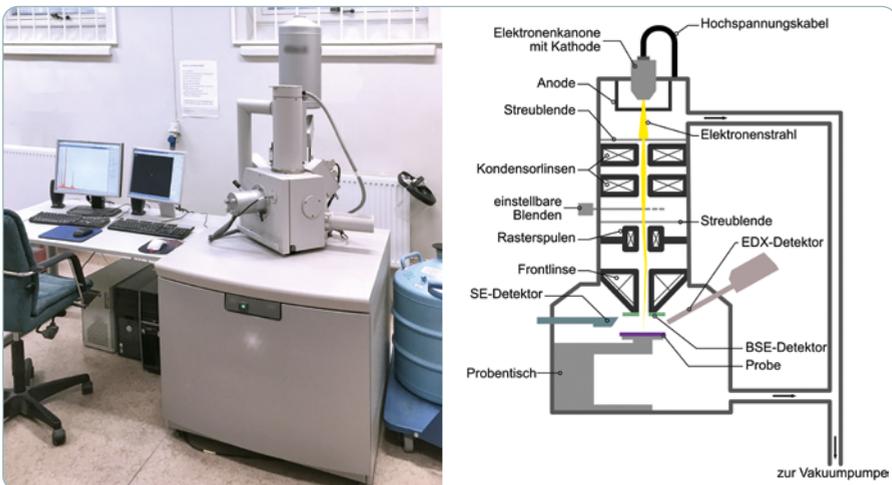


Bild 8.16 Modernes Rasterelektronenmikroskop (Foto: © Mariusz Kalinowski, Stockholm, Schweden). Rechts: Eine Prinzip-Skizze eines REM mit Sekundärelektronen- (SE), Rückstreuelektronen- (BSE) und Röntgenfluoreszenzdetektor (EDX).

Standardaufgaben zur Untersuchung von Baustoffen mittels REM werden in den meisten Fällen mit drei Detektoren erledigt:

- › Sekundärelektronen- (SE),
- › Rückstreuelektronen- (BSE),
- › Röntgenfluoreszenzdetektor (EDX).

Die SE- und BSE-Detektoren werden zur Bildgebung, EDX zur mikrochemischen Analyse verwendet. Der Sekundärelektronendetektor liefert Bilder, die eine gute räumliche Auflösung besitzen und gut für Bruchflächen geeignet sind (Bild 8.17).

In der Populärwissenschaft sind REM-Bilder bekannt für Mikroaufnahmen von Kristallen oder Insekten, die in einschlägigen Zeitschriften und Büchern veröffentlicht werden. Weniger bekannt dürften Bilder vom Rückstreuelektronendetektor sein. Dieser wird meist bei ebenen, polierten Anschliffproben eingesetzt und hat den Vorteil, dass unterschiedliche Dichten der Materialkomponenten verschiedene Grautöne im Bild ergeben [8.21]. Je dichter eine Komponente ist, desto höher ist der Grauwert, d. h. desto heller erscheint die Komponente (Bild 8.17), da in diesem Fall mehr rückgestreute Elektronen den Detektor erreichen [8.22]. Dies hat den Vorteil, dass in einem Baustoff unterschiedliche Phasen mit unterschiedlichen Dichten sehr gut unterschieden werden können. Der Röntgenfluoreszenzdetektor erfasst die charakteristische Röntgenstrahlung die entsteht, wenn der primäre Elektronenstrahl Elektronen aus den inneren Schalen der Atome der Probe herausschießt und Elektronen aus den äußeren Schalen derselben Atome an deren Stelle springen. Der Energiegewinn des Schalensprungs eines einzelnen Elektrons wird in Form von charakteristischer Röntgenstrahlung abgegeben. Alle Atome besitzen für jede Schale charakteristische Energiebeträge, die, wenn freigesetzt, vom Detektor gemessen werden und zur Bestimmung der Art der Atome verwendet werden können (Bild 8.18) [8.20]. Zu beachten ist, dass REM-Untersuchungen meist im Hochvakuum durchgeführt werden.

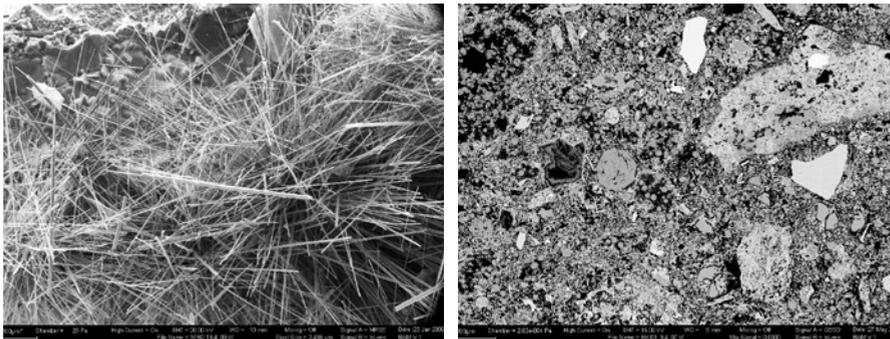


Bild 8.17 Unterschiede bei der Bildgebung am REM. Ettringitkristalle in einem Beton, aufgenommen mit einem Sekundärelektronendetektor SE (links; Bruchprobe). Ein vulkanischer Tuff mit seinen Mineralkomponenten, aufgenommen mit einem Rückstreuelektronendetektor BSE (rechts; polierter Dünnschliff). Im BSE-Bild sind dichtere Minerale durch hellere Grautöne erkennbar.

Als Probenmaterial eignen sich Bruchflächen und polierte Anschliffe. Größere Proben müssen häufig zerkleinert werden, da die Probenkammer in ihren Dimensionen begrenzt ist. Außerdem dürfen bei Bruchproben die Unebenheiten auf der Probe nicht zu groß sein, da normalerweise mit einem Arbeitsabstand von der Frontlinse zur Probe von 10 mm oder weniger gearbeitet wird. Bei polierten Planschliffen sind die Untersuchungen einfacher. Die Proben müssen vor REM-

Untersuchungen elektrisch leitend gemacht werden, um eine Anreicherung an Elektronen auf der Probenoberfläche zu verhindern (statische Aufladung). Dazu werden die Proben mit Kohlenstoff, Gold oder Platin bedampft. Inzwischen gibt es auch REM, die in einer Niederdruck-Stickstoff- bzw. Wasserdampf-Atmosphäre arbeiten, welche Aufladungseffekte auf den Probenoberflächen minimieren und kein Bedampfen der Proben erfordern [8.20]. Bilder und mikrochemische Analysen mit sehr hoher Auflösung werden jedoch nach wie vor am besten im Hochvakuum erreicht [8.21].

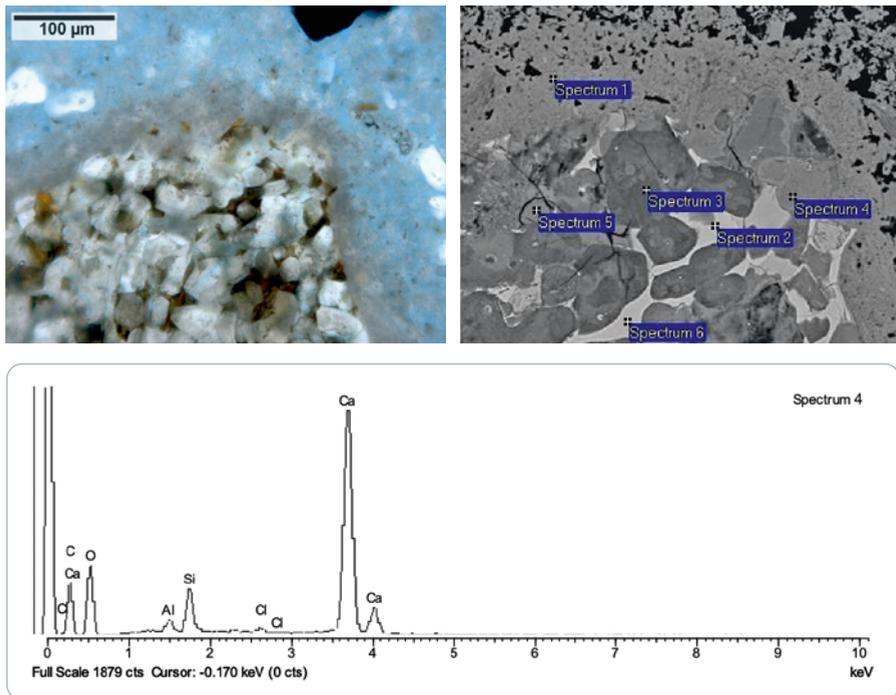


Bild 8.18 Gezeigt ist der Teil des Klinkerkorns im Dünnschliff (links oben; aus Bild 8.11). Das Klinkerkorn unter dem REM in einem BSE-Bild (rechts oben) und mit einer Elementanalyse (unten). Dies ist möglich, da ein polierter Dünnschliff verwendet wurde.

Mittels REM lassen sich morphologische Untersuchungen an unbekanntem Phasen durchführen. Die eigentliche Stärke eines REM liegt jedoch in der mikrochemischen Analyse eines Materials mit dem EDX-Detektor [8.22]. Hierbei wird keine Gesamtanalyse vorgenommen, sondern jede Materialkomponente kann einzeln auf ihre chemische Zusammensetzung hin untersucht werden. Je nach Elektronenstromdichte und Beschleunigungsspannung liegt die Auflösung eines Analysenpunktes bei 1 bis 5 µm. Der Elektronenstrahl ist zwar wesentlich feiner, aber die Umgebung in und unterhalb der Probenoberfläche, die er zur Röntgen-

fluoreszenz anregt, liegt im μm -Bereich. Mikrochemische Untersuchungen helfen bei einer ganzen Reihe von Komponentencharakterisierung und Schadensanalysen [8.20].

Vor jeder REM-Analyse sollten lichtmikroskopische Untersuchungen mittels Stereo- oder Polarisationsmikroskopie vorausgehen, um vorab Bereiche auffindig zu machen, die sich für eine REM-Untersuchung lohnen. Dafür eignen sich besonders polierte Dünnschliffe, da diese im Polarisationsmikroskop untersucht und in Frage kommende Komponenten direkt im REM einer mikrochemischen Analyse unterzogen werden können (Bild 8.18). Da die Bildausschnitte im REM nur im mm-Bereich oder meist sogar darunterliegen, ist es sehr schwierig, sich auf einer Probe zu orientieren. Es hilft deshalb vor der REM-Untersuchung ein Bild der Probe mit einer Digitalkamera, bzw. mit dem Mobiltelefon aufzunehmen, um das Navigieren auf der Probenoberfläche zu erleichtern.

Ergebnisse von REM-Untersuchungen liefern Aussagen zu Baustoffkomponenten und Schadensursachen mit hoher Auflösung und können ergänzend zu lichtmikroskopischen Analysen zur Klärung baustoffspezifischer Fragestellungen herangezogen werden. Die Methode ist ideal, um z. B. ein Bindemittel in einem Mörtel oder Beton zu charakterisieren [8.22] oder Reaktionsprodukte zu bestimmen, die zu einer Gefügeschädigung beitragen [8.15]. Allerdings sind diese Untersuchungen zeitaufwendig und sie können nur von speziell geschulten Geräteanwendern vorgenommen werden. Ein weiterer Nachteil sind die hohen Anschaffungskosten für ein Rasterelektronenmikroskop. Meist werden diese Geräte von Forschungseinrichtungen (z. B. Universitäten) beschafft. Die Untersuchung mineralischer Baustoffe erfordern eine andere Geräteeinstellung als z. B. Metalle oder biologische Präparate. Der Geräteanwender sollte deshalb möglichst über Erfahrung in der Untersuchung von Baustoffen verfügen.

8.2.4 Quecksilberdruckporosimetrie

Die Quecksilberdruckporosimetrie, oder auch Hg-Porosimetrie genannt, dient der Charakterisierung der Porenstruktur eines Materials. Was gemessen wird, ist das Porenvolumen abhängig vom Porenradius bzw. -durchmesser. Das Prinzip der Methode beruht auf dem erzwungenen Einpressen von Quecksilber in eine poröse Probe (Bild 8.19). Dabei wird das Volumen an Quecksilber bestimmt, das in die Probe bei jeder Druckstufe eingepresst wird [8.23]. Es wird deshalb Quecksilber verwendet, da dieses für die meisten mineralischen Baustoffe materialabweisend ist, d. h. Quecksilber bildet mit den meisten nichtmetallischen mineralischen Materialien Kontaktwinkel $>90^\circ$ aus. Mithilfe der Washburn-Gleichung lässt sich der Porenradius aus dem Druck bestimmen:

$$p = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos \Theta}{r}$$

Dabei ist:

r der Porenradius,

γ die Oberflächenspannung des Quecksilbers,

Θ der Benetzungswinkel Mineraloberfläche – Quecksilber und

p der Druck mit dem das Quecksilber in die Poren gepresst wird.

Nach dieser Gleichung ist der Porenradius umgekehrt proportional zum Druck des eingepressten Quecksilbers. Die Washburn-Gleichung enthält jedoch eine Vereinfachung. Sie geht bei der Porengeometrie von zylinderförmigen Poren aus.

Die Quecksilberdruckporosimetrie ist eine vergleichende Methode. Die meisten Instrumente haben einen messbaren Porenradienbereich zwischen 2 nm und 100 μm . Kleinere oder größere Poren, die außerhalb dieses Bereichs liegen, werden nicht erfasst [8.24]. Bei der Bestimmung der Porosität ist deshalb weniger die Gesamtporosität von Interesse, sondern die Verteilung der Porenradien bzw. -durchmesser. Diese lassen sich in Form von Summenkurven oder Verteilungshistogrammen darstellen (Bild 8.19). Summenkurven, die analog zu Sieblinien zu lesen sind (nur ist deren Verlauf umgekehrt) eignen sich besser zum Vergleich von Kurven verschiedener Proben im selben Diagramm (Bild 8.19). Histogramme sind dagegen als Einzelergebnis einfacher zu lesen, aber zwei oder mehr Proben, die überlagernd im selben Diagramm dargestellt werden, erschweren sehr stark das Lesen der Ergebnisse.

Interessant ist die Hg-Porosimetrie bei natürlichen Gesteinen, Ziegeln und Bindemitteln [8.23]. Letztere können kalk-, zement- oder gipsbasierend sein. Soll die Porengrößenverteilung des Bindemittels von Mörtel oder Beton untersucht werden, ist zu beachten, dass je nach Porosität der Gesteinskörnung dieses einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis haben kann. Bei kristallinen Hartgesteinen (Magmatite, Metamorphite) und dichten Silikaten (Quarz, Feldspat) ist der Einfluss vernachlässigbar gering, bei klastischen Gesteinen wie Sandstein oder Grauwacken sowie poröseren Kalksteinen kann der Einfluss auf die Porengrößenverteilung des Bindemittels erheblich sein [8.24]. Dasselbe trifft auf Ziegelsplitt zu, der häufig bei römischen Mörteln als Gesteinskörnung eingesetzt wurde. Bei Beton und Mörtel kann die Gesteinskörnung manuell vom Bindemittel abgetrennt werden, um die Porenradien des Bindemittels separat zu messen. Der Aufwand dafür ist nicht allzu hoch, da die Proben bei der Hg-Porosimetrie als Granulat vorliegen müssen und nur wenige Gramm benötigt werden.

Proben, die mittels Hg-Porosimetrie untersucht werden sollen, müssen getrocknet werden. Zu beachten ist hierbei, dass Baustoffe dazu niemals bei der Standardtemperatur von 105 °C getrocknet werden dürfen, da bei dieser hohen Temperatur unter Umständen Hydratphasen und wasserhaltige Phasen wie Gips Schaden nehmen und sich dies gravierend auf die Porenstruktur der Probe auswirken

kann. Bei Natursteinen, Ziegeln und Kalksandsteinen ist deshalb eine Trocknungstemperatur von nicht über 60 °C zu wählen [8.23]. Beton- und Mörtelproben sollten entweder durch Alkoholaustausch getrocknet werden [8.24] [8.25] oder im Vakuumofen bei nicht mehr als 40 °C [8.23].

Vorteile der Methode sind eine gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und eine gute Vergleichbarkeit, z. B. von Proben, die mit einem Steinfestiger behandelt wurden. Der Nachteil ist, dass Aufgrund der Giftigkeit von Quecksilber beim Betreiben von Geräten aufwändige Sicherheitsvorkehrungen zu treffen sind und deshalb nur wenige Labore über ein Hg-Porosimeter verfügen. Weiterhin werden nicht alle Poren erfasst. Beispielsweise können Luftporen in Mörtel oder Beton, die größer 100 µm sind, mittels Hg-Porosimetrie nicht erfasst werden.

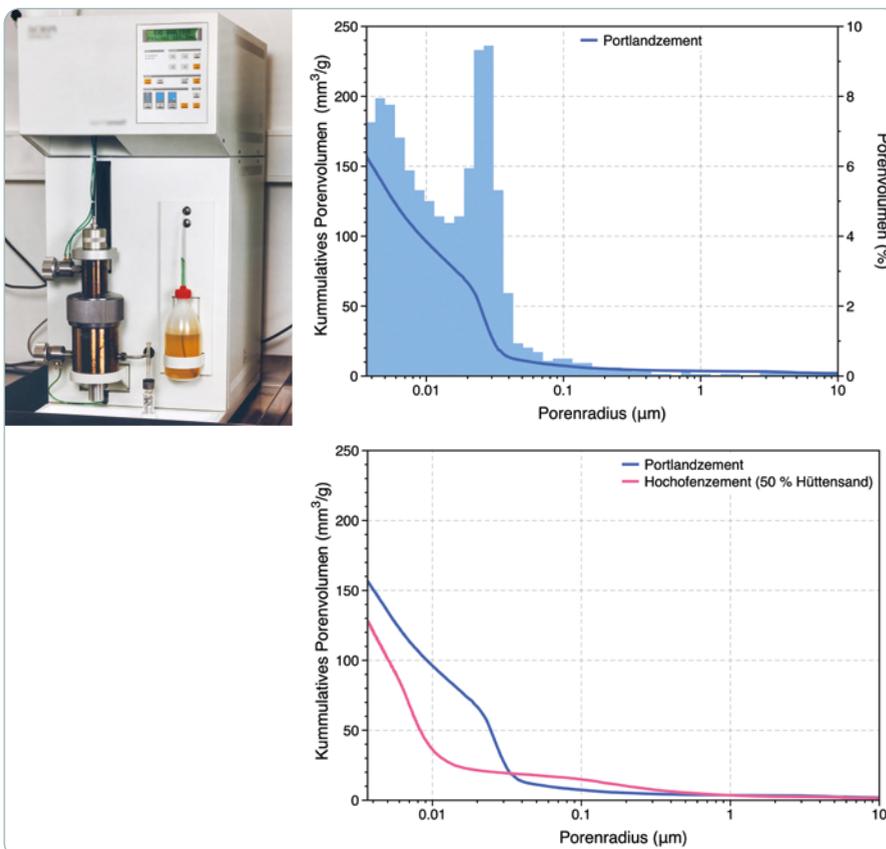


Bild 8.19 Der Hochdruckteil eines Hg-Porosimeters (oben links). Die Porenradialverteilung eines Zementsteins in Form eines Verteilungshistogramms und deren Summenkurve (oben rechts). Vergleich der Porenradialverteilung von zwei Zementsteinen (28 Tage alt) anhand der Summenkurve – mit und ohne Hüttensand (unten).

8.3 Phasenanalyse

Die reine Phasenanalyse wird angewendet, wenn das Gefüge der zu untersuchenden Substanz keine Rolle spielt. Sie eignet sich zur Untersuchung von Salzproben, die von der Oberfläche eines Mauerwerks abgeschabt wurden oder für Mörtelausgangsstoffe, die in Pulverform vorliegen, wie Zement, Kalk oder natürliche Puzzolane. Weiterhin kann eine Phasenanalyse, die nicht auf mikroskopischen Methoden beruht, zu einer Gefügeanalyse beitragen, beispielsweise wenn die zu untersuchenden Phasen nicht mittels Mikroskopie aufgelöst werden können. Phasenanalysen können mit unterschiedlichen Methoden durchgeführt werden. In diesem Abschnitt wird auf folgende Methoden eingegangen:

- › Röntgenpulverdiffraktometrie (XRD),
- › Thermoanalyse (DTA/TG),
- › Infrarot- und Ramanspektroskopie.

Jede der Methoden erfordert spezielle Instrumente und deren Bedienung und Anwendung setzt ein spezielles Fachwissen voraus, um die Ergebnisse entsprechend auswerten zu können. Aus diesem Grund sind solche Geräte üblicherweise in Universitäten oder anderen Forschungseinrichtungen zu finden.

8.3.1 Röntgenpulverdiffraktometrie (XRD)

Die Röntgenpulverdiffraktometrie oder Röntgendiffraktometrie (im englischen X-ray diffraction, XRD) beruht auf der Wechselwirkung von kristallinem Material mit Röntgenstrahlen. Dabei wird ausgenutzt, dass Kristalle eine regelmäßige periodische Anordnung ihrer Atome besitzen. Die Abstände zwischen den Atomen liegen bei den meisten kristallinen Stoffen im Wellenlängenbereich der Röntgenstrahlung, sodass es beim Beschuss der Kristalle mit Röntgenstrahlen zu Beugungserscheinungen mit den Atomen kommt [8.26]. Das Röntgenlicht wird hierbei am Atomgitter gestreut und unter unterschiedlichen Winkeln verstärkt oder komplett ausgelöscht. Die Verstärkungen oder Auslöschungen des primären Röntgenstrahls am Atomgitter der Kristalle hängt vom Einfallswinkel des Primärstrahls, dessen Wellenlänge und dem Abstand der Atome im Kristall (d -Werte) ab (Bild 8.20). Die Bragg-Gleichung beschreibt die Beugungsbedingungen abhängig von diesen Parametern [8.27].

Die Anordnung der Atome in den Kristallen kann in Form von Netzebenen beschrieben werden. Je nach Einfallswinkel des Primärstrahls und der Orientierung des Kristalls können mehrere Netzebenen zur Verstärkung und Auslöschung beitragen. In einem einzelnen Kristall erzeugen Verstärkung und Auslöschung des Primärstrahls ein typisches Beugungsmuster auf einer zweidimensionalen Projektionsebene, z. B. einer fotografischen Filmebene (Bild 8.20). Die schwarzen

Punkte in der Abbildung stellen hierbei die Verstärkung des Primärstrahls an verschiedenen Netzebenen dar. Wird nun der einzelne Kristall in mehrere Kristalle aufgespalten, von denen ein Beugungsbild aufgenommen wird, tragen mehr Netzebenen zur Beugung des Primärstrahls bei. Werden die wenigen Kristalle zu einem Pulver aufgemahlen, liegen die Verstärkungspunkte des Primärstrahls der einzelnen Pulverpartikel in der Projektionsebene auf ringförmigen Mustern (Bild 8.20), wobei die Abstände der Ringe vom Primärstrahlursprung die Abstands-(d-)werte der Netzebenen repräsentieren. Werden die Beugungslinien von Pulverproben auf einem fotografischen Film aufgenommen, können mittels der geometrischen Gegebenheiten (Abstand der Probe zur Filmebene, sowie Abstand der Ringe auf dem Film zum Primärstrahl) und der Bragg-Gleichung die d-Werte der Netzebenen eines kristallinen Materials berechnet werden [8.26]. Da die d-Werte einer kristallinen Phase einzigartig sind, lässt sich mittels des Beugungsmusters von Pulverproben die Art der Phase bestimmen. Hierzu notwendig ist eine Datenbank, welche die Beugungsmuster aller kristallinen Phasen enthält.

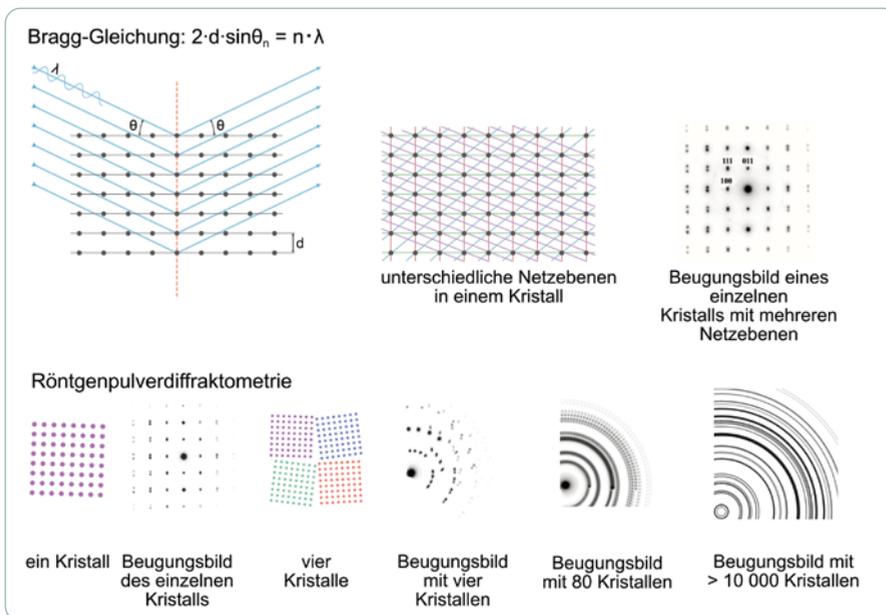


Bild 8.20 Grundlagen der Beugung von Röntgenstrahlen an Kristallgittern und Prinzip der Beugung an Pulverproben.



Bild 8.21 Ein modernes Röntgendiffraktometer (links). Die drei Grundeinheiten Röntgenröhre, Probe und Detektor (rechts). Die Probe und der Detektor sind in einem Goniometer eingebaut, welches beide in einem definierten Bereich von Beugungswinkeln bewegt.

Moderne Röntgendiffraktometer arbeiten heute jedoch nicht mehr mit fotografischen Filmen, sondern mit Detektoren, die einen vorgegebenen Winkelbereich abfahren und einen Teil des Beugungsmusters detektieren [8.26]. Bild 8.21 zeigt ein modernes Röntgendiffraktometer, das zur Phasenanalyse pulverförmiger Proben verwendet wird. Das Diffraktometer besteht aus drei Grundkomponenten: Einer Röntgenröhre, welche einen primären Röntgenstrahl liefert, einer pulverförmigen Probe mit glatter Oberfläche (im Bild ist ein Probenwechsler gezeigt) und einem Detektor, der das Beugungsmuster registriert. Die Daten des Detektors, in Form von Intensitätswerten in Abhängigkeit vom Beugungswinkel, werden von einem Computer gespeichert. Der Computer verfügt meist über Auswertungsprogramme, welche das gemessene Beugungsmuster, das Röntgendiffraktogramm, mit den Beugungsmustern einer Datenbank vergleichen und entsprechend eine Phasenerkennung durchführen können. In Bild 8.22 ist als Beispiel das gemessene Diffraktogramm eines historischen Gipsmörtels gezeigt sowie die Vergleichsmuster aus der Datenbank. Das Diffraktogramm in Bild 8.22 unterscheidet sich vom ringförmigen Beugungsmuster aus Bild 8.20. Das liegt daran, dass ringförmige Beugungsmuster auf zweidimensionalen Projektionsebenen auftreten, wohingegen das gezeigte Diffraktogramm des Gipsmörtels in Abhängigkeit vom Beugungswinkel 2θ bestimmt wurde und hierbei die Intensität des Beugungsmusters in nur einer Dimension gemessen wurde.

Für die eigentliche Phasenanalyse wird eine Probe schonend getrocknet und anschließend zu einem Pulver zermahlen. Zur Analyse werden, abhängig von der Geometrie des Probenträgers, 0,5 bis 1,0 g des Probenmaterial benötigt. Spezielle Probenträger erlauben auch die Messung von geringeren Probenmengen, z. B. bei Salzproben oder Farbpigmenten.

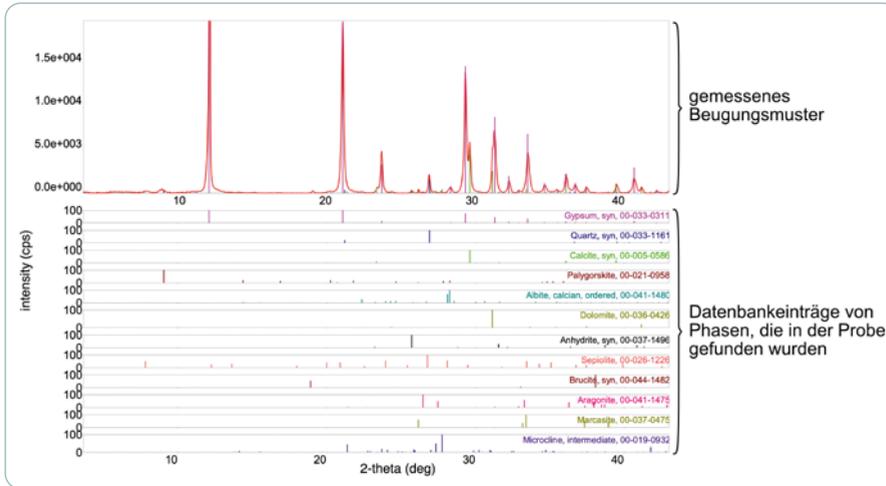


Bild 8.22 Beispiel eines Diffraktogramms eines Gipsmörtels und die von einem Phasensuchprogramm vorgeschlagenen und vom XRD-Anwender bestätigten Phasen.

Der Beginn der Messung erfolgt bei kleineren Winkelbereichen, z. B. 5° , und wird bei einer Übersichtsmessung bis 75° fortgesetzt. Das Ergebnis der gemessenen Beugungsintensitäten wird dann im Winkelbereich 2θ zwischen z. B. 5 bis 75° registriert.

Die Dauer der Messung beruht auf dem Typ des Detektors. Bei einem herkömmlichen Szintillationsdetektor kann von einer Messzeit von 60 bis 120 Minuten pro Probe ausgegangen werden. Moderne Halbleiterdetektoren verkürzen die Messdauer auf 10 bis 30 Minuten pro Probe. Die Zeit, die für die Bestimmung der Phasen mittels Datenbanksuche aufgewendet werden muss, beruht auf der Anzahl der zu bestimmenden Phasen in der Probe und der Nachweisgrenze der einzelnen Phasen. Proben, die aus nur einer, zwei oder drei Phasen bestehen, können relativ einfach und schnell mittels einer automatischen Datenbanksuche abgeglichen werden. Sind jedoch mehr als drei Phasen in einer Probe vorhanden, schlagen die automatischen Suchprogramme häufig zu viele Phasen vor, was eine manuelle Filterung der Suchergebnisse erforderlich macht. Beruhend darauf, welche Nachweisgrenze einer Phase berücksichtigt werden soll, kann eine manuelle Filterung und Auswertung 15 bis 60 Minuten erfordern. Besonders bei Spuren, die an oder lediglich knapp über der Nachweisgrenze der Methode liegen, lässt sich oftmals keine sichere Zuordnung zu einer Mineralphase durchführen, da sich Beugungsreflexe mit geringer Intensität von Spurenmineralen teilweise mit denjenigen der Hauptphasen überlagern. Bei der Auswertung von Phasengemischen mit vielen Phasen ist auf alle Fälle Sachverstand bezüglich des Probenmaterials erforderlich, um bei manueller Filterung zu entscheiden, welche Phasen in einer Probe Sinn

machen und welche von vorneherein ausgeschlossen werden können, obwohl sie vom automatischem Suchprogramm vorgeschlagen werden.

Eine Phasenanalyse von Natursteinen, Ziegelmaterial, Gipsbaustoffen oder Kalksandstein ist meist einfach durchzuführen und auszuwerten. Schwieriger wird es bei Mörteln und Beton, die auf Kalk und Zement basieren sowie bei Lehmbaustoffen. Bei diesen Materialien ist die Bindemittelzusammensetzung häufig von besonderem Interesse. Allerdings ist das Bindemittel im Verhältnis zur Gesteinskörnung oftmals nur ein Bestandteil in geringerer Menge (Ausnahme sind Gipsmörtel, die meist einen hohen Bindemittelgehalt aufweisen). Wird davon eine Pulveranalyse durchgeführt, erscheinen als Hauptbestandteile die Phasen, die sich in der Gesteinskörnung befinden (z. B. Quarz und Feldspat) und die wesentlichen Reflexe der Phasen des Bindemittels sind möglicherweise gerade noch zu erkennen oder verschwinden im Untergrund des Beugungsdiagramms. In diesen Fällen lohnt es sich, das Bindemittel manuell anzureichern. Dazu wird eine Mörtelprobe grob zerkleinert und Probenanteile mit weniger Gesteinskörnungen herausgepickt und zu einem Pulver zermahlen. Die Anreicherung des Bindemittels erlaubt eine sicherere und bessere Auswertung der Bindemittelphasen.

Amorphe, d. h. glas- oder gelartige Phasen können mittels XRD nicht näher bestimmt werden, da deren Glasstruktur nicht zu diskreten Beugungsmustern führen. Sind größere Mengen von Bestandteilen mit einer Glasstruktur in einer Probe, macht sich dies im Beugungsdiagramm in der Regel durch eine Erhöhung des Untergrunds im Bereich zwischen 15° bis $35^\circ 2\theta$ bemerkbar.

Bild 8.23 zeigt zwei Beispiele von Diffraktogrammen verschiedener Proben. Das obere stammt von einem Portlandzement mit verschiedenen kristallinen Klinkerphasen. Die Beugungsreflexe (Peaks) der einzelnen Phasen sind deutlich und scharf ausgebildet. Darunter ist das Beugungsmuster eines Hüttensands zu sehen, eines technischen Glases, das als Schlacke beim Hochofenprozess bei der Verhüttung von Eisenerz erzeugt wird. Auffallend ist ein breiter Beugungsreflex im Bereich 15 bis $40^\circ 2\theta$, welches durch das amorphe Glas erzeugt wird. Die kleineren diskreten Peaks, die auf dem breiten Reflex aufsitzen, stammen von geringen Anteilen einer kristallinen Phase (Spinel), die beim Abkühlen des Glases entstanden ist.

Theoretisch kann die XRD auch für eine quantitative Phasenanalyse benutzt werden. In der Zementindustrie werden z. B. routinemäßig die einzelnen Bestandteile von Zementklinkern mittels XRD quantitativ erfasst und ausgewertet [8.28]. Die Quantifizierungsmethode, die in diesen Fällen angewendet wird, beruht auf der Rietveld-Methode. Diese erfordert, dass die Phasen in einer Probe bereits alle bekannt sind und einem entsprechenden Kristallgitter aus einer Datenbank zugeordnet werden können. Die eigentliche Auswertung wird von einem Programm ausgeführt, welches die Beugungsdiagramme der Probenbestandteile aus den Kristalldaten berechnet. In einem Algorithmus werden die berechneten

Beugungsdiagramme mit dem Beugungsdiagramm der Probe verglichen und die Mengen der bekannten Probenbestandteile so lange im Algorithmus variiert, bis die Differenz aller berechneten Beugungsdiagramme der einzelnen Bestandteile mit dem der Probe minimal ist [8.28]. Die Methode eignet sich gut für bekannte Materialien, die sich nur innerhalb gewisser Grenzen in ihrer Zusammensetzung ändern. Für komplexere Zusammensetzungen ergibt die Quantifizierung mit dieser Methode einen größeren Fehlerbereich. Faktoren wie Mahlfineinheit, Kompaktierung der Pulverprobe, Alter der Röntgenröhre oder die Orientierung von Probenbestandteilen im Probenträger haben einen sehr starken Einfluss auf das Ergebnis. Die Quantifizierung mittels der Rietveld-Methode erfordert eine gute instrumentelle Erfahrung als auch ein gutes Wissen bezüglich des Materials, das quantifiziert werden soll [8.28].

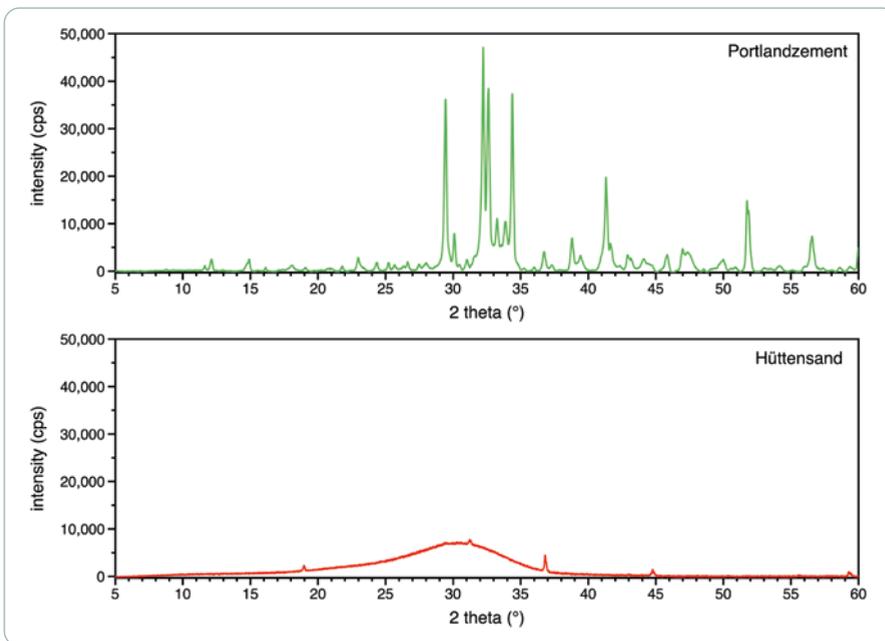


Bild 8.23 Diffraktogramme eines Portlandzements mit kristallinen Klinkerphasen (oben) und eines amorphen Hüttensands (unten)

Die Röntgenpulverdiffraktometrie ist eine gute und verhältnismäßig schnelle Methode, um eine Phasenanalyse an einer Probe durchzuführen. Die Kenntnis der Art und der möglichen Zusammensetzung einer Probe helfen der Person, die ein Beugungsdiagramm auswerten soll, erheblich mit der Eingrenzung von möglichen Phasen. Dadurch kann sich die notwendige Zeit für die Auswertung deutlich verkürzen.

8.3.2 Differentialthermoanalyse und Thermogravimetrie (DTA/TG)

Die Differentialthermoanalyse und Thermogravimetrie (DTA/TG) ist eine Methode, die seit Jahrzehnten in der Mineralogie, aber auch in der technischen Materialentwicklung und Produktion (z. B. in der Keramik-, Ziegel- und Glasindustrie) verwendet wird [8.29]. Sie kann als Phasenanalysenmethode angewendet werden und besonders mittels TG bei bestimmten Fragestellungen zu quantitativen Ergebnissen führen (z. B. Portlanditgehalt in Zementmörteln/Beton). Weiterhin kann die Methode Antworten auf spezielle Fragen geben. Bei Luftkalkmörteln können damit beispielsweise die quantitativen Anteile von Calciumhydroxid zu Calciumcarbonat bestimmt werden. Oder es kann die Menge organischer Bestandteile in einem Steinersatzmörtel nachgewiesen werden.

Bei der Untersuchung wird eine Probe in einem Ofen erhitzt. Physikalisch gesprochen wird ihr dabei Energie in Form von Wärme zugeführt. Bei Wärmezufuhr sind chemische Reaktionen oder Phasenumwandlungen in der Probe möglich. Bei diesen Prozessen wird die Probe entweder Wärme aufnehmen (endothermer Prozess) oder Wärme freisetzen (exothermer Prozess). Dies macht sich in kleinen Temperaturunterschieden zwischen der Probe und der Umgebungstemperatur innerhalb des Ofens bemerkbar [8.29]. Praktisch wird jedoch nicht die Differenztemperatur zwischen Probe und Umgebung bestimmt, was messtechnisch schwierig ist, sondern der Unterschied zwischen der Temperatur der Probe und einer inerten Referenzprobe, von der bekannt ist, dass sie im untersuchten Temperaturbereich keinerlei chemische Reaktionen oder Phasenumwandlungen unterliegt [8.29].

Bild 8.24 zeigt schematisch den Aufbau eines DTA/TG-Geräts und eine Variante eines solchen Geräts, ein sogenanntes DSC/TG (Differential-Scanning-Calorimeter, Dynamische Differenzkalorimetrie). Die Probe und die Referenzprobe befinden sich in inerten Tiegeln, die mit Thermoelementen zur exakten Temperaturmessung der Probe und der Referenz verbunden sind. Weitere Thermoelemente befinden sich im Ofen zur Steuerung der Ofentemperatur. Nach dem Einsetzen der Probe und der Referenz wird der Ofen über die beiden Tiegel geschoben und ein Temperaturprogramm gestartet. Welcher Temperaturbereich gewählt wird, hängt von der Art der Probe und der Fragestellung ab, der Standardtemperaturbereich liegt jedoch zwischen der Labortemperatur und 1 000 °C. Die Temperatur wird hierbei in diesem Bereich mit einer konstanten Heizrate, z. B. 5 °C/min, erhöht, welche die Probe und die Referenz unter exakt den gleichen Bedingungen erhitzt. Tritt in der Probe unter der Erhitzung eine chemische Reaktion oder Phasenumwandlung auf, ergibt sich zur Referenz eine Temperaturdifferenz, die auch in einen Wärmeflusswert umgerechnet werden kann. Ist die Temperaturdifferenz zur Referenz positiv, ist die Reaktion in der Probe exotherm, ist sie negativ, ist die Reaktion endotherm [8.29].

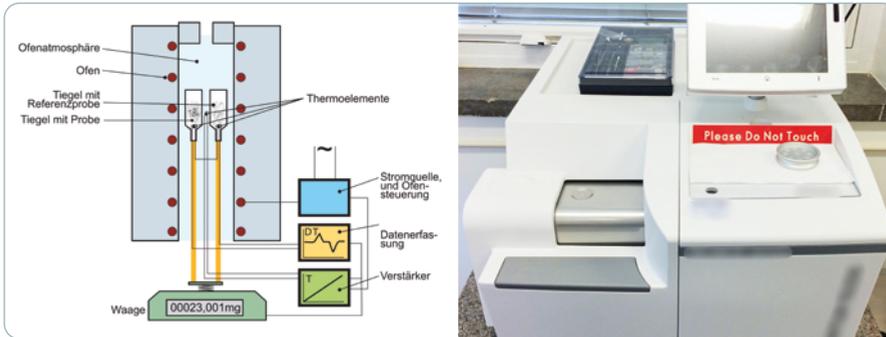


Bild 8.24 Prinzip der DTA/TG (links). Ein DSC/TG-Gerät, eine Variante eines DTA-Instruments (rechts).

Bild 8.25 zeigt die DSC-Kurven von Zementsteinen im Alter von 28 Tagen. Bei dem einen Zement handelte es sich um einen Portlandzement (CEM I) und dem anderen um einen Hochofenzement (CEM III/A). In dem Diagramm sind die Differenztemperatur bzw. der Wärmefluss zwischen Probe und Referenz über die Temperatur aufgetragen. Das Diagramm zeigt in bestimmten Temperaturbereichen, 50° bis 400°, 400° bis 600° und 700° bis 800 °C Peaks, welche auf endotherme Reaktionen hindeuten. Diese sind: Dehydratation von C-S-H-Phasen (100–400 °C), Dehydroxilierung von Portlandit (400–600 °C) und Decarbonatisierung von Carbonat (in Form von Kalksteinmehl, 700–800 °C) [8.30]. Die DSC-Kurve des Hochofenzements deutet an, dass der Gehalt an Portlandit und Carbonat wesentlich geringer ist als im Portlandzement.

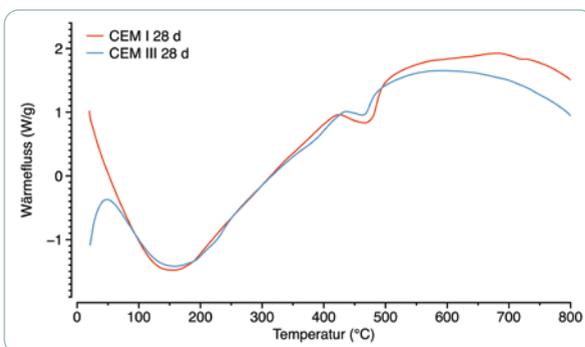


Bild 8.25 DSC-Aufnahme eines Portlandzements (CEM I) und eines Hochofenzements (CEM III).

Reaktionen, bei denen Masseverluste auftreten, z. B. alle Dehydratations-, Dehydroxilierungs-, Dekarbonatisierungs-, Verbrennungsreaktionen oder Reaktionen bei denen SO_2 freigesetzt werden, lassen sich mittels Thermogravimetrie (TG) bestimmen [8.30]. DTA- und TG-Analysen lassen sich oftmals am selben Gerät

durchführen, da viele DTA-Geräte über eine Waage verfügen, mit der sich Masseverluste während des Aufheizens der Probe registrieren lassen.

Werden in der Baustoffkunde thermische Analysenmethoden verwendet, wird überwiegend die Thermogravimetrie eingesetzt, da diese besonders bei carbonatischen und hydraulischen Bindemitteln zur Charakterisierung ausreicht. Bild 8.26 zeigt eine Thermowaage und ein entsprechendes Thermogravimetriediagramm des Portlandzementsteins aus Bild 8.25. Ebenfalls gezeigt ist die erste Ableitung der Massenverlustkurve (dm/dT), welche eine ähnliche Form wie eine DTA-Kurve aufweist, da die endothermen Reaktionen im Zementstein auch mit einem Masseverlust verbunden sind. Im Bereich 100° bis 250°C werden C-S-H-Phasen, Ettringit und AFm-Phasen entwässert. Im Temperaturbereich zwischen 400° und 550°C wird Portlandit dehydroxiliert, d. h. es verliert Wasser und wird zu Calciumoxid umgewandelt. Im Bereich zwischen 550° und 750°C wird Carbonat, das in Form von Kalksteinmehl im Zement, vorliegt, decarbonatisiert [8.30]. Für die Thermogravimetrie wird keine Referenzprobe benötigt, weshalb Thermowaagen nur einen Probenhalter aufweisen.

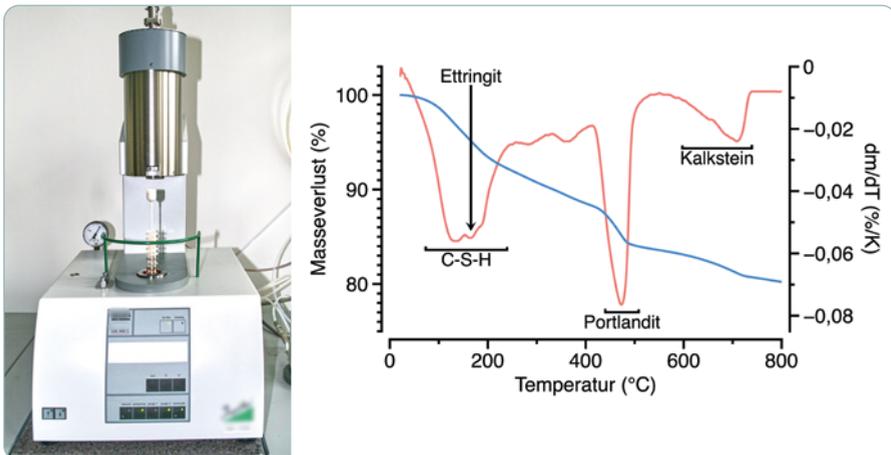


Bild 8.26 Thermowaage mit Probenposition und steuerbarem Ofen (links). Eine TG-Aufnahme (blaue Kurve) und deren erste Ableitung (rote Kurve) des CEM I aus Bild 8.25. Letztere zeigt deutliche Peaks, die Masseverluste entsprechender Phasen zugeordnet werden können (rechts).

Neben mineralischen Stoffen können mittels DTA/TG auch organische Stoffe, z. B. Polymere, nachgewiesen werden, wenn diese in ausreichender Menge in einer Probe vorliegen ($>1-2$ Masse-%). Bei Temperaturerhöhung verbrennen manche der Polymere (z. B. Duroplaste), was sich durch einen exothermen Peak in der DTA-Kurve und einem Masseverlust in der TG-Kurve bemerkbar macht. Die Verbrennungsreaktion erfolgt häufig im Temperaturbereich von 250° bis 450°C mit

einem Peak um 350° bis 400 °C. Der Masseverlust hängt vom Polymergehalt ab. Bild 8.27 zeigt das TG-Diagramm eines Kunststeins, der mit einem Reaktionsharz (Polyester) als Bindemittel hergestellt wurde. Der Masseverlust von ca. 5 % im Bereich von 200° bis 450 °C zeigt an, dass ein Polymer verwendet wurde. Bei dem Kunststein handelte es sich um ein Material, das Marmormehl als Füllstoff sowie Serpentin als gröbere Gesteinskörnung enthielt. Entsprechend ergeben sich weitere Massenverluste durch die Decarbonatisierung von Marmor und die Dehydroxylierung des Minerals Serpentin.

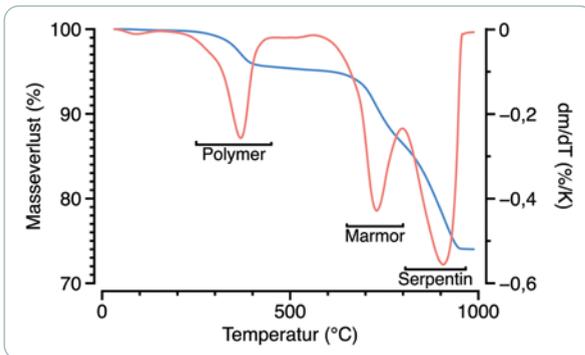


Bild 8.27 Eine TG- und dm/dT-Kurve eines Kunststeins, der ein polymerisches Bindemittel besaß. Deutlich ist ein Peak zwischen 250 und 450 °C zu erkennen, welcher durch die Verbrennung des Polymers erzeugt wurde.

Einige organische Stoffe sind jedoch weniger gut für eine DTA/TG-Analyse geeignet. Bei diesen handelt es sich um siliziumorganische Verbindungen, die häufig in der Denkmalpflege verwendet werden, z. B. Kieselsäureester oder Silane/Siloxane. Bei diesen ist entweder das Reaktionsprodukt anorganischer Natur, wie im Fall von Kieselsäureester (KSE) oder die Konzentration des organischen Anteils ist so gering, dass es mittels DTA/TG nur schwierig nachzuweisen ist, z. B. im Fall von Silanen oder Siloxanen.

Die Vorteile der DTA/TG-Methode sind die Eignung von Fingerprintanalysen von polymermodifizierten Baustoffen, die teilweise auch in der Denkmalpflege eingesetzt werden, z. B. Steinersatzstoffe oder polymerbasierende Steinfestiger (nicht dazu gehören allerdings KSE). Weiterhin lassen sich quantitative bis semi-quantitative Analysen mittels TG-Analyse von bekannten Reaktionen erstellen, die einen Masseverlust nach sich ziehen [8.30]. Ein weiterer Vorteil ist die Verwendung geringer Probenmengen im Bereich von 20 bis 50 mg (bei TG-Geräten auch mehr), wodurch diese Methode z. B. für Farbproben oder Salzausblühungen besonders geeignet ist.

Die Nachteile der Methode sind gegebenenfalls lange Ofenabkühlzeiten von mehreren Stunden, das zur Folge hat, dass pro Arbeitstag nur wenige Messungen durchgeführt werden können. Modernere Instrumente besitzen jedoch Kühloptionen, mit denen der Ofen schneller abgekühlt werden kann und automatische

Probenwechsler, die ein manuelles Wechseln der Probe obsolet machen und einen Dauerbetrieb des Instruments ermöglichen. Zur Interpretation von DTA/TG Ergebnissen bedarf es einer guten Kenntnis von thermischen Reaktionen von Mineralphasen und Polymeren. Zwar sind die Geräte relativ einfach zu bedienen, die Auswertung der Ergebnisse erfordert jedoch besondere Fachkenntnisse der Materialkunde. Zudem bedarf es gut ausgebauter Datenbanken zur Phasenidentifizierung. Leider enthalten von den Herstellern oder Forschungseinrichtungen angebotenen Datenbanken meist nur eine begrenzte Anzahl von Einträgen.

8.3.3 Infrarotspektroskopie (IR) und Ramanspektroskopie

Die Infrarotspektroskopie (IR) ist eine Methode, die häufig zur Identifizierung von organischen Molekülen herangezogen wird. Allerdings lassen sich auch anorganische Stoffe mittels IR-Spektroskopie analysieren. Bei der IR-Spektroskopie wird eine Probe mit Infrarotlicht, z. B. der Wellenlänge von 1 000 bis 30 000 nm (zum Vergleich: sichtbares Licht liegt im Bereich 400 bis 700 nm) bestrahlt. Bei älteren Geräten wurde nicht »weißes« Infrarotlicht, d. h. alle Wellenlängen gleichzeitig zur Bestrahlung verwendet, sondern die Wellenlänge wurde sukzessive erhöht. Moleküle in einer Probe, die auf bestimmte Wellenlängen ansprechen, beginnen zu schwingen, d. h. ein bestimmter Anteil dieser Wellenlängen wird von der Probe absorbiert. Wird die Absorption abhängig von der Wellenlänge des IR-Lichts mittels eines Detektors bestimmt, ergibt sich ein Transmissions- bzw. Absorptionsspektrum (Bild 8.28), welches Rückschlüsse auf die Molekülzusammensetzung zulässt [8.31].

Moderne IR-Geräte verwenden ein multichromatisches Licht, das in einem Interferometer bestehend aus einem Strahlenteiler, einem festen und einem beweglichen Spiegel in den bestimmten Wellenlängen ausgelöscht bzw. verstärkt wird (Bild 8.29). Aus den Kombinationen der verbleibenden Wellenlängen absorbiert die Probe bestimmte Wellenlängen. Die Bewegung des Spiegels erfolgt sehr schnell und erzeugt Interferogramme. Aus diesen wird dann mittels einer Fourier-Transformation berechnet, welche konkreten Wellenlängen von der Probe absorbiert wurden. Die Berechnungen der Absorption von diskreten Wellenlängen werden mit einem Computer durchgeführt. Diese Geräte werden Fourier-Transform-Infrarotspektrometer (FT-IR) genannt [8.32].

Bei der IR-Spektroskopie von Feststoffen werden meist Probenpulver verwendet, die in ein Salz (oftmals Kaliumbromid) in Form eines Presslings eingebettet werden, das im untersuchten Bereich IR-transparent ist. Für diese Art der Analysen reichen wenige Milligramm an Probenmaterial aus, um ein IR-Spektrum zu erzeugen. Das IR-Licht wird dann durch die Probe geleitet, wo es mit dieser wechselwirkt (d. h. einige Wellenlängen des IR-Lichts absorbiert, Bild 8.29).

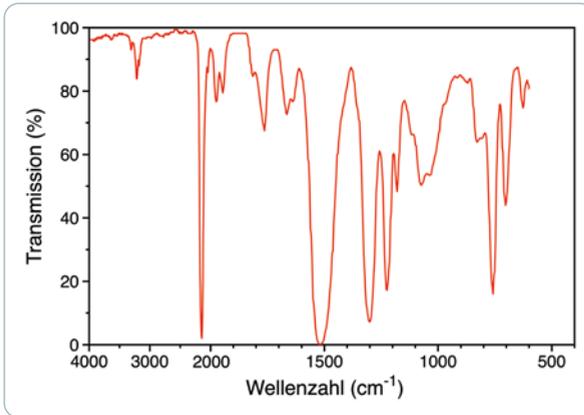


Bild 8.28 Infrarot-spektrum eines Polymers. Aufgetragen ist die Transmission mit den absorbierten Banden über die Wellenzahl. Die Skalierungen vor und nach 2000 cm^{-1} sind verschieden.

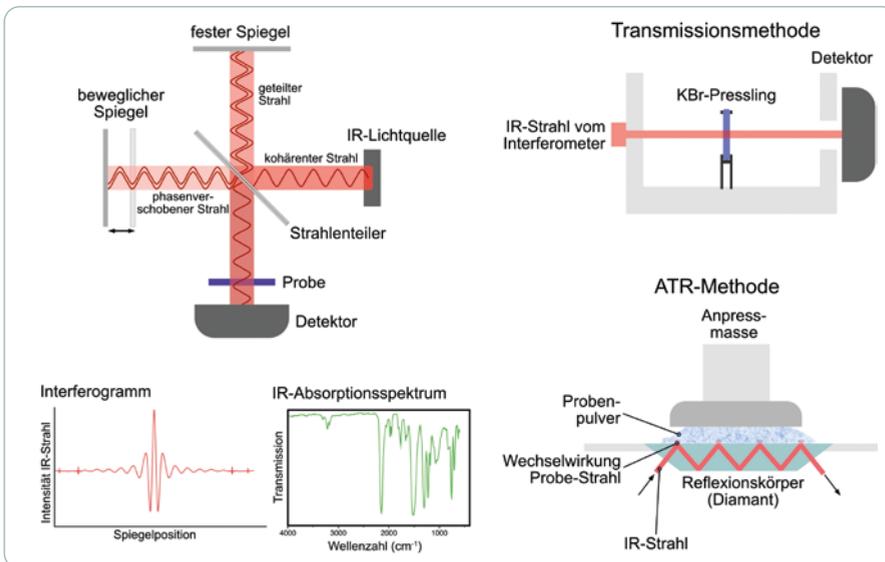


Bild 8.29 Prinzip eines FT-IR-Spektrometers (links), der Proben in Form von KBr-Presslingen (rechts oben) und der ATR-Technik (rechts unten).

Eine weitere Methode ist die ATR-Technik (aus dem Englischen Attenuated Total Reflection). Bei der ATR-Technik können sowohl Pulver als auch gröbere Partikel, die eine glatte Fläche aufweisen oder Filme (z. B. Polymerfilme) verwendet werden. Die Herstellung eines KBr-Presslings entfällt hierbei. Anstatt das Infrarotlicht durch den durchscheinenden KBr-Pressling zu leiten, wird die Probe auf einen geschliffenen Körper gelegt. Das IR-Licht wird dann an der Schleiffläche des Körpers, worauf die Probe liegt, totalreflektiert. Hierbei wechselwirkt der totalreflektierte IR-Strahl mit der Probe und wird dann mittels der Optik zum Detektor geführt, wo die Daten gesammelt und anschließend im Computer ausgewertet

werden (Bild 8.29) [8.33]. Für den Reflexionskörper wird Diamant aber auch Zinkselenid, Silizium, Germanium und weitere eingesetzt. In vielen Fällen wird aufgrund der hohen Härte und des Verschleißwiderstands Diamant bevorzugt.

Die Ergebnisse, das IR-Absorptionsspektrum, wird in einem Diagramm über die reziproke Wellenlänge, die Wellenzahl, in ℓ/cm bzw. cm^{-1} aufgetragen. Die Umrechnung der Wellenlänge in die Wellenzahl ermöglicht eine einfachere Darstellung des Ergebnisses, da der für die meisten Materialien relevante IR-Wellenlängenbereich zwischen 400 und 4000 cm^{-1} angegeben werden kann (um es als Wellenlänge auszudrücken, müsste 25000 nm bis 2500 nm angegeben werden). Der Wellenzahlbereich zwischen 4000 bis 2000 cm^{-1} wird oftmals mit einer geringeren Auflösung angegeben als der Bereich zwischen 2000 und 400 cm^{-1} . Das liegt daran, dass viele Moleküle in diesem Bereich zur Schwingung angeregt werden und eine entsprechend höhere Auflösung die visuelle Auswertung erleichtert. Als Y-Achse wird entweder die Intensität des IR-Strahls in Transmission (wieviel IR-Licht am Detektor ankommt) oder in Absorption (Menge an von der Probe absorbierten IR-Licht) verwendet. Daraus ergibt sich ein Unterschied im Erscheinungsbild der Spektren: Bei Darstellung der Transmissionsintensitäten zeigen die Absorptionspeaks des Materials im Diagramm nach unten, bei der Darstellung der Absorptionsintensitäten nach oben (Bild 8.30).

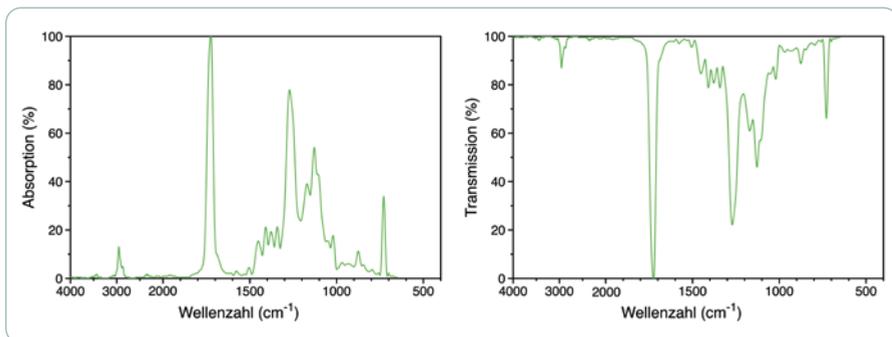


Bild 8.30 Ein Absorptionsspektrum (links) und ein Transmissionsspektrum (rechts) eines Polymers.

Die IR-Spektroskopie wird häufig zur Identifizierung von Polymeren herangezogen, da die Schwingungsenergien ihrer Moleküle im Bereich der Wellenlänge des IR-Lichts liegen (Bild 8.28, Bild 8.30). Anorganische Stoffe lassen sich mittels IR-Spektroskopie ebenfalls analysieren, wobei die meisten Absorptionsbanden im Bereich zwischen 600 und 1200 cm^{-1} auftreten. Mittels dieser Analysenmethode lassen sich geringste Probenmengen untersuchen. Daher wird diese häufig für Farbanalysen eingesetzt, z. B. um ein Bindemittel zu bestimmen oder deren Pigmente zu erfassen (Bild 8.31) [8.34]. Die eigentliche Auswertung eines

IR-Spektrums erfolgt in den meisten Fällen durch ein Vergleichsspektrum aus einer Datenbank. Für verschiedene Materialien existieren jedoch unterschiedliche Datenbanken, die zum Teil aus zehntausenden von Einträgen bestehen. Automatische Suchroutinen liefern meist eine Vielzahl von Vorschlägen, die mit viel Sachverstand auf die am meisten wahrscheinliche Substanz(en) reduziert werden muss. Das IR-Spektrum selbst gibt Hinweise auf die Art der Bindung und die Form der Molekülschwingung. Dazu sind jedoch Vorkenntnisse bezüglich der Art des Polymers notwendig (z. B. welche Polymergruppe vorliegt). Da viele der Absorptionsbanden, die zur Identifizierung herangezogen werden, im Wellenzahlbereich zwischen 400 bis 2000 cm^{-1} liegen, ist die Auswertung von Materialproben mit mehr als drei Phasen ohne Vorkenntnisse oftmals sehr schwierig. Insbesondere Polymere zeigen teilweise sehr ähnliche Spektren und eine exakte Auswertung kann unter Umständen zeitaufwändig sein.

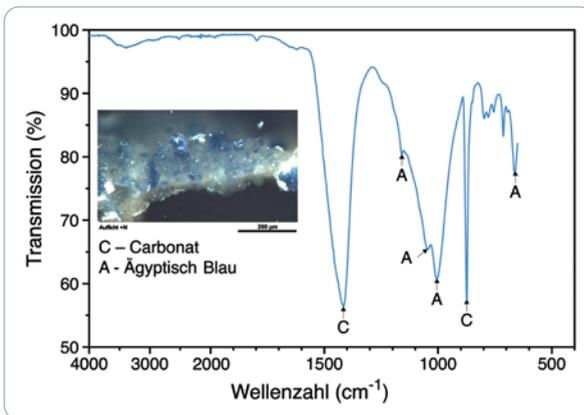


Bild 8.31 IR-Spektrum einer Kalkfarbe mit Ägyptisch Blau als Pigment.

Der Vorteil der IR-Spektroskopie ist deren Schnelligkeit. Für die Erstellung eines Spektrums wird eine Messung von wenigen Sekunden benötigt. Wird ein ATR-Zusatz verwendet und ist die Probe pulverförmig, ist eine Messung, auch mit geringen Probenmengen, schnell zu realisieren. So können polymerbasierende Farbbindemittel oder Beschichtungsstoffe, die von Objekten stammen, relativ schnell untersucht werden. Ein Nachteil ist, dass bei Anwesenheit von anderen festen Phasen die Nachweisgrenzen bei geringen Mengen einer Phase nicht hoch ist. Sollen Polymere, z. B. Reaktionsharze, die zur Festigung von Naturstein eingesetzt wurden und nur in geringen Mengen vorhanden sind, untersucht werden, können diese mittels eines organischen Lösungsmittels extrahiert werden. Es ist dann allerdings zu beachten, dass die gelösten Anteile unter Umständen nicht die gesamte Molekülgruppe des Harzes repräsentieren.

Zum Schluss soll eine der IR-Spektroskopie ähnliche Methode, die Raman-Spektroskopie, vorgestellt werden. Bei der Raman-Spektroskopie wird die inelastische Streuung von Licht an Molekülen oder Festkörpern untersucht. Als Lichtquelle wird ein Laser mit monochromatischem Licht verwendet (sichtbar). Trifft dieses auf eine Probe, wird es mit dessen Frequenz gestreut (Rayleigh-Streuung). Neben der ursprünglichen Frequenz treten bei der Streuung aber noch weitere Frequenzen auf, deren Differenz zur ursprünglichen Frequenz den Schwingungsenergien des Materials entsprechen. Beim Raman-Effekt wird Energie vom Licht auf die Materie übertragen (in Form von Photonen) und aus der Materie werden Photonen (Energien) freigesetzt. Allerdings besitzen die freigesetzten Photonen andere Energien als die eingestrahnten, was sich in einer Wellenlängenverschiebung (Raman-Verschiebung) zwischen eingestrahlttem Licht und freigesetztem Streulicht bemerkbar macht. Diese Energiedifferenzen können in Form eines Raman-Spektrums ausgewertet werden, da die Wellenlängenverschiebungen stoffabhängig sind [8.35]. Raman-Spektren besitzen ähnliche Wellenzahlbereiche wie IR-Spektren.

Die Raman-Methode wird häufig zur Pigmentbestimmung bei Farben verwendet, da, wie bei der IR-Methode, nur geringe Probenmengen notwendig sind [8.36]. Beide Methoden, IR- und Raman-Spektroskopie haben den Vorteil, dass optische Mikroskope mit den Spektrometern ausgerüstet werden können (IR- bzw. Raman-Mikroskope). Dadurch lassen sich auch kleinste Partikel einer Analyse unterziehen und bei polierten Anschliffen kann die Analyse in Verbindung mit dem Materialgefüge vorgenommen werden.

8.4 Chemische Analyse

Die chemische Analyse ermittelt die stoffliche Zusammensetzung eines Materials. Als Resultat werden meist Elemente in Oxidform angegeben, z. B. SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO . Die Elemente sind die chemischen Bausteine der Stoffe und bestimmen maßgeblich deren Eigenschaften. Die chemische Gesamtzusammensetzung eines Materials kann mit verschiedenen Methoden ermittelt werden. Frühe Methoden besaßen eine ganze Reihe von Einzelschritten, welche ein Material durch Aufschließen mit Säuren in eine gelöste Form überführten und dann die einzelnen chemischen Komponenten mittels gravimetrischen, titrimetrischen, spektroskopischen, chromatografischen oder anderen Methoden quantifizierten. Diese Verfahrensweise ist heute noch für spezifische Elemente gängig. Für anorganische Feststoffe wird heute meist eine schnellere Methode zur Bestimmung und Quantifizierung verwendet, die Röntgenfluoreszenzanalyse, die im folgenden Abschnitt näher beschrieben wird.

Bezüglich der Baustoffe ist jedoch nicht immer eine gesamtchemische Analyse notwendig, um bestimmte Fragestellungen zu klären. Für Schadensanalysen ist es

in vielen Fällen ausreichend, orts aufgelöste chemische Informationen zu erhalten, die mittels REM-EDX-Analysen oder mittels der Mikro-Röntgenfluoreszenzanalyse festgestellt werden können. Bei Mörtel ist häufig das Verhältnis von Bindemittel und Gesteinskörnung, die Menge an hydraulischen Anteilen oder das Verhältnis von Gips und Kalk bei Gips-Kalk-Mörtel von Interesse, welche mit chemischen Methoden ermittelt werden können. Auch der bei der Schadensanalyse von Mauerwerk oder Putzen relevante Gehalt von Salzen und Feuchtigkeit kann mit chemischen Methoden bestimmt werden.

8.4.1 Röntgenfluoreszenzanalyse

Die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA, im englischen XRF) ist die heutige gängige Methode zur Bestimmung des Gesamtchemismus von anorganischen Feststoffen. Quantitative RFA-Analysen können in speziellen Labors preisgünstig relativ schnell durchgeführt werden. Es wird zur chemischen Charakterisierung von Zement, Betonzusatzstoffen, Kalk und Gips sowie für deren Rohmaterialien z. B. in der Güteüberwachung eingesetzt. Weiterhin können alle Typen von Steinen (Natursteine, Ziegel, Kalksandsteine, etc.) chemisch mit dieser Methode charakterisiert werden.

Die Methode beruht auf der Wechselwirkung von Röntgenlicht mit Materie. Wird ein Material mit hartem Röntgenlicht bestrahlt, wird ein Teil von der Probe gestreut aber ein weiterer Anteil dringt in die Probe ein und die Photonen des Röntgenlichts schlagen einen Teil der inneren Elektronen der Atome aus ihren Schalen. Da dieser Zustand für die Atome energetisch ungünstig ist, werden die nun leeren Schalen von Elektronen aus den äußeren Schalen aufgefüllt. Die Energiedifferenz von der äußeren zur inneren Schale wird als diskrete Energie in Form von Röntgenphotonen abgegeben. Diese charakteristische Fluoreszenzstrahlung besitzt bestimmte Energien bzw. Wellenlängen, die, wenn erfasst von einem Detektor, zur Bestimmung der Atome eines Materials benutzt werden können (Bild 8.32). Da die Intensität der charakteristischen Fluoreszenzstrahlung proportional der Konzentration der Atome in einem Material ist, lässt sich auch die Menge der chemischen Komponente mit diesem Analysenprinzip bestimmen. Dieselbe Verfahrensweise wird bei der mikrochemischen Analyse mit dem REM und dem EDX-Detektor angewendet. Der Unterschied zwischen RFA und REM-EDX besteht darin, dass beim REM anstelle eines Röntgenstrahls ein Elektronenstrahl als Primärstrahlquelle verwendet wird, um die charakteristische Röntgenfluoreszenzstrahlung zu erzeugen [8.37].

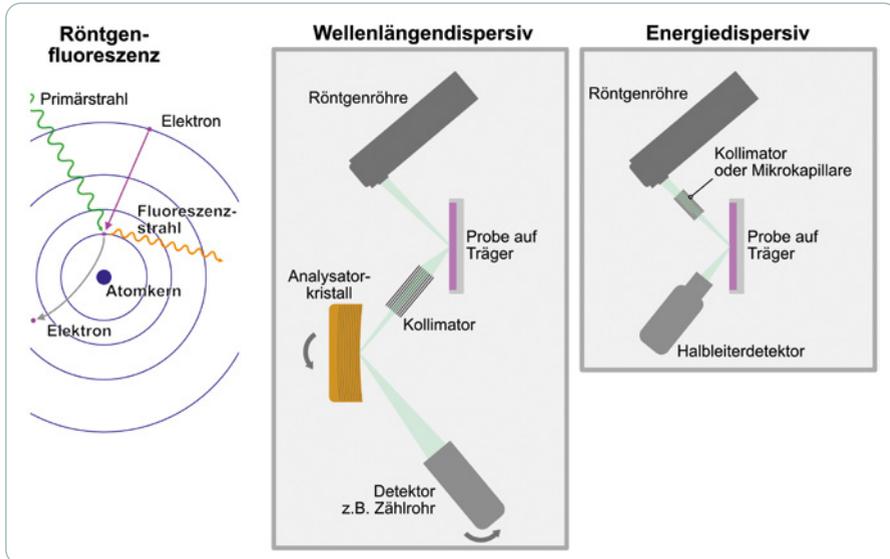


Bild 8.32 Erzeugung der Röntgenfluoreszenzstrahlung (links). Prinzip der wellenlängendispersiven RFA (WDRFA; Mitte). Prinzip der energiedispersiven RFA (EDRFA; rechts).

Röntgenfluoreszenzgeräte besitzen eine primäre Röntgenquelle, eine Vorrichtung zur Aufnahme der Probe, oftmals in Form eines automatischen Probenwechslers, sowie ein Detektorsystem (Bild 8.32). Bei der primären Röntgenquelle wird weißes Röntgenlicht in Form von Bremsstrahlung erzeugt sowie die charakteristische Strahlung des Zielmaterials in der Röntgenröhre. Es werden zwei verschiedene Systeme unterschieden, einerseits das wellenlängendispersive und andererseits das energiedispersive System. Die Systeme unterscheiden sich wesentlich in der Detektoranordnung und der Art und Weise, wie eine Messung erfolgt [8.37].

Wellenlängen- und energiedispersive Systeme

Bei der wellenlängendispersiven RFA (WDRFA) wird die Wellenlänge der charakteristischen Fluoreszenzstrahlungen von Atomen bestimmt (Bild 8.32). Dies erfolgt über einen Analysator-kristall von einem bekannten Material mit definierten d -Wert. Wird der Kristall, auf den die Fluoreszenzstrahlung einfällt um den Winkel q rotiert, kann nach der Bragg-Gleichung ($n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta_n$) die Wellenlänge eines gebeugten Strahls bestimmt werden. RFA-Geräte für eine Vollanalyse besitzen zumeist nicht nur einen, sondern mehrere Kristalle mit unterschiedlichen d -Werten, welche die gesamten Wellenlängenbereiche der meisten zu messenden chemischen Elementen abdecken. In der Praxis rotiert der Analysator-kristall während der Messung einer Probe den entsprechenden Wellenlängenbereich ab in dem die charakteristische Fluoreszenzstrahlungen bestimmter Atome vorkommen und

gleichzeitig werden die Intensitäten der charakteristischen Strahlungen mit einem Detektor, z. B. eines Szintillationszählrohrs, ermittelt. Das Ergebnis ist ein Spektrum bei dem die Intensität der charakteristischen Strahlung über deren Wellenlänge bzw. Winkel aufgetragen ist. Die Intensität einer charakteristischen Fluoreszenz ist proportional der Menge des Atoms in der Probe (nach entsprechender Kalibrierung) [8.38].

Die Messungen laufen vollautomatisch und mittels Probenwechsler können in einer vorgegebenen Zeit hohe Probenvolumina analysiert werden. Der Hauptvorteil der WDRFA ist eine hohe Auflösung und Nachweisgenauigkeit auch von leichten Elementen. Mittels der Methode lassen sich mit hoher Genauigkeit auch Spurenelemente nachweisen. Zusammen mit der hohen Messkapazität bildet es das Arbeitspferd bei der Güteüberwachung von mineralischen Rohstoffen und anorganischen Festprodukten aber auch zur zuverlässigen chemischen Charakterisierung von mineralischen Baustoffen. Der Nachteil besteht darin, dass WDRFA-Geräte groß sind und dementsprechend mehr Platz benötigen.

Bei der energiedispersiven RFA (EDRFA) wird die Energie der Photonen der charakteristischen Fluoreszenzstrahlung der Atome bestimmt. Dies wird mittels eines Halbleiterdetektors realisiert, der die eintreffenden Photonen entsprechend ihrer Energien auflöst und deren Anzahl bestimmt. Gängige Halbleiterdetektoren bestehen aus lithiumdotierten Siliziumkristallen (Lithiumdrift- bzw. Si(Li)-Detektoren), die mit Flüssigstickstoff gekühlt werden müssen oder den heutigen gängigen Siliziumdriftdetektoren, bei denen die erforderliche niedrige Analysentemperatur von $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ mit einem Peltierelement erreicht wird [8.38]. Bei der EDRFA wird kein Analysatorkristall benötigt; der Detektor ist meist nahe der Probenoberfläche platziert, um so viel der Fluoreszenzstrahlung wie möglich einzufangen.

Die Vorteile der EDRFA sind sehr kompakte Geräte. Die Messungen verschiedener Elemente in einer Probe erfolgt aufgrund des Halbleiterdetektors simultan. Die Messungen dauern normalerweise 10 bis 90 Sekunden und sind damit sehr schnell. Seit einigen Jahren gibt es kleine portable EDRFA-Geräte, die mit vor Ort genommen werden können und häufig zur Identifikation von Schwermetallen in Abfall- und Reststoffen angewendet werden [8.37]. Weitere Anwendungsgebiete solcher leichten Geräte sind die chemische Analyse von Kunstobjekten wie Gemälden oder Keramiken. Mittels der Methode können schnell qualitative bis semi-quantitative Analysen von Farb- oder Glasurschichten durchgeführt werden. Die Nachteile der EDRFA sind eine geringere Auflösung und Nachweisgrenze von leichten Elementen, insbesondere von Natrium und Magnesium.

Um quantitative Analysen mittels RFA durchzuführen, werden die Proben entweder in ein Glas umgewandelt (Schmelztablette) oder mit einem Klebstoff zu einer Pulvertablette gepresst. Die Umwandlung des Probenpulvers in ein Glas

erfolgt bei ca. 700° bis 900 °C in einem Ofen mit Hilfe eines Flussmittels, in der Regel Lithiumtetraborat. Die Umwandlung in eine Schmelztablette hat den Vorteil, dass die Probe dadurch absolut homogen und keine störenden Effekte durch Korngrenzen oder Korngrößenunterschiede auftreten. Referenzproben, mit verschiedenen Elementkonzentrationen, können durch Mischen von verschiedenen Salzen hergestellt wurden, selbst wenn die Salze mit der eigentlichen Probe nichts zu tun haben. In Form von Schmelztabletten sind Referenzproben der eigentlichen Probe sehr ähnlich und Matrixeffekte müssen nicht berücksichtigt werden. Bei Presstabletten wird das sehr feine, trockene Probenpulver mit einem Polymer vermischt und bei hohem Druck in einer hydraulischen Presse verdichtet. Bei Presstabletten können Matrixeffekte die Messergebnisse beeinflussen, weshalb Referenzproben häufig aus demselben Stoff, wie die zu messende Probe bestehen. Die Analysenergebnisse einer Probe werden anhand von Kalibrationskurven quantifiziert. Kalibrationskurven werden mit Referenzproben (Standard) mit bekannten Elementgehalten erzeugt. Sie müssen für jedes zu messende Element ermittelt werden [8.38].

EDRFA- und WDRFA-Geräte besitzen meist auch Auswerteroutinen, die eine standardlose Quantifizierung erlauben. Diese Routinen, die auf Fundamentalparameteralgorithmen beruhen, sind allerdings in ihrer Genauigkeit nicht so zuverlässig wie die Quantifizierung mit Kalibrationskurven. Außerdem erzeugt eine Fundamentalparameterberechnung relative Konzentrationen, die über die gemessenen Elemente zu 100 Masse-% normiert werden, wohingegen eine Quantifizierung mit Kalibrationskurven absolute Konzentrationen ergibt.

Mittels der RFA-Methode lassen sich Elemente von Natrium aufwärts bestimmen. Das heißt, dass leichtere Elemente wie Lithium, Beryllium, Bor, Stickstoff, Kohlenstoff oder Sauerstoff nicht bestimmt werden können. Deshalb werden Wasser oder CO₂ (in Form von Carbonat) meist über den Glühverlust bestimmt.

Die Ergebnisse der chemischen Analyse werden für gewöhnlich in Oxidform in Masse- bzw. Gewichts-% angegeben. Traditionell hat sich etabliert, dass die Haupt- und Nebenelemente entsprechend ihrer häufigsten Wertigkeit gelistet werden, meist beginnend mit 4-wertigen Oxiden, gefolgt von Sesquioxiden, zwei- und einwertigen Oxiden, gefolgt von Phosphor und Schwefel: SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, Cr₂O₃, CaO, MgO, MnO, Na₂O, K₂O, P₂O₅, SO₃.

Tabelle 8.1 gibt jeweils ein Beispiel der chemischen Zusammensetzung eines Portlandzements, einer Flugasche und eines Hüttensands wieder. Spurenelemente werden meist in Elementform in Tausendstel Promille (parts per million, ppm) angegeben.

Chemische Bestandteile	CEM I	FA	HS
	Gehalt in Masse-%		
SiO ₂	19,7	56,7	34,4
TiO ₂	0,30	0,94	2,87
Al ₂ O ₃	4,85	21	12,84
Fe ₂ O ₃	3,46	5,92	0,32
Cr ₂ O ₃	0,02	0,01	0,01
CaO	60,6	4,06	29,9
MgO	2,42	1,87	15,85
MnO	0,05	0,06	0,64
BaO	0,06	0,19	0,08
SrO	0,08	0,16	0,05
Na ₂ O	0,5	0,98	0,5
K ₂ O	1,14	1,95	0,66
P ₂ O ₅	0,14	0,59	0,01
SO ₃	3,57	na	2,62
Glühverlust	3,16	3,72	0
C	na	2,76	na
Total	100,07	100,91	100,81

Tabelle 8.1 Beispiele der chemischen Zusammensetzung eines Portlandzements (CEM I), einer Flugasche (FA) und eines Hüttensands (HS).

Mikro-Röntgenfluoreszenzanalyse (μ RFA)

Bei den meisten μ RFA-Geräten handelt es sich um energiedispersive Systeme, die eine schnelle chemische Analyse ermöglichen (Bild 8.33). Die Besonderheit dieser Geräte ist die Röntgenoptik, die eine Fokussierung des primären Röntgenstrahls auf der Probenoberfläche erlaubt. Einige Gerätetypen besitzen eine variable Röntgenoptik, was als »Multi- oder Flexispot« vermarktet wird. Hier ist es möglich, den Durchmesser des Röntgenstrahls auf der Probe zu variieren. Die Fokussierung des Röntgenstrahls wird über Polykapillaren erreicht, welche den Durchmesser des Primärstrahls, je nach den Spezifikationen der Polykapillare, auf Werte zwischen 20 und 100 μ m reduzieren [8.39]. Dies ermöglicht eine chemische Analyse mit guter Ortsauflösung. Im REM können zwar mittels EDX-Detektoren mit 1 bis 5 μ m höhere Auflösungen erreicht werden, die μ RFA hat jedoch den Vorteil, dass größere Probenflächen in kürzerer Zeit untersucht werden können.

Bild 8.33 Ein Gerät für die Mikro-Röntgenfluoreszenzanalyse. Die Röhren-Detektoranordnung befindet sich im oberen Teil der Probenkammer (nicht sichtbar). Zu sehen ist der in allen drei Richtungen bewegliche Probenstisch mit einer Probe. Viele Geräte erlauben Probengrößen von 200 mm × 150 mm × 100 mm oder mehr.



Alle μ RFA-Geräte besitzen einen variablen Probenstisch, der in x-, y- und z-Richtung bewegt werden kann (Bild 8.33). Der Tisch bewegt hierbei die Probe quasi unter dem Röntgenstrahl. Die Röntgenröhre mit der Polykapillare hat keine eigene Fokussiereinrichtung. Vielmehr wird der Röntgenstrahl auf der Probe mit dem z-Vortrieb des Tisches scharfgestellt. Für die genaue Einstellung der Schärfe stehen Videokameras mit verschiedenen Vergrößerungen zur Verfügung, deren Schärfebene mit der des Röntgenstrahls übereinstimmt. Da der Arbeitsabstand zwischen der Probe, der Röntgenoptik und dem Detektor begrenzt ist (ca. 10 bis 15 mm), darf eine Probe nicht zu hohe Höhenunterschiede aufweisen. Ideal sind gesägte oder geschliffene Probenoberflächen [8.39].

Gemessen werden Punktanalysen, d. h. abhängig vom Strahldurchmesser wird die Probe über die Strahlfläche zur Fluoreszenz angeregt. Moderne Silikon-driftdetektoren können innerhalb von Sekundenbruchteilen vom Fluoreszenzspektrum genügend Intensität einfangen, um eine Elementbestimmung durchzuführen. Wird die Probe in periodischen, zeitlichen Abständen unter dem Röntgenstrahl entlang einer Linie in x- oder y-Richtung bewegt, lässt sich ein Linienspektrum erstellen, welches die Intensität der Elemente entlang der gemessenen Linie darstellt. Wird die Probe nun in x- und in y-Richtung alternierend unter dem Röntgenstrahl bewegt, lassen sich Elementverteilungen auf der Probenoberfläche darstellen [8.39].

Bild 8.34 zeigt das Summenspektrum und Elementverteilungen einer Putzprobe, die von einem historischen Gebäude in Florianopolis, Brasilien, entnommen wurde. Das Gebäude wurde im neoklassizistischen Stil gegen Ende des 19. Jahrhunderts errichtet [8.40]. Der Putz besteht aus drei Schichten und einer abschließenden Farbschicht. Er wurde mittels Mikroskopie gefügekundlich untersucht und mittels μ RFA sollten die Mengenverhältnisse bestimmter Komponenten in den Schichten geklärt werden. Die Gefügeanalyse erbrachte drei Hauptputzschichten (Spritzbewurf, Unter- und Oberputz), sowie mehrere Farbschichten. Der Unterputz besaß zwei Arbeitslagen, die sich etwas in ihrer Porosität unterschieden.

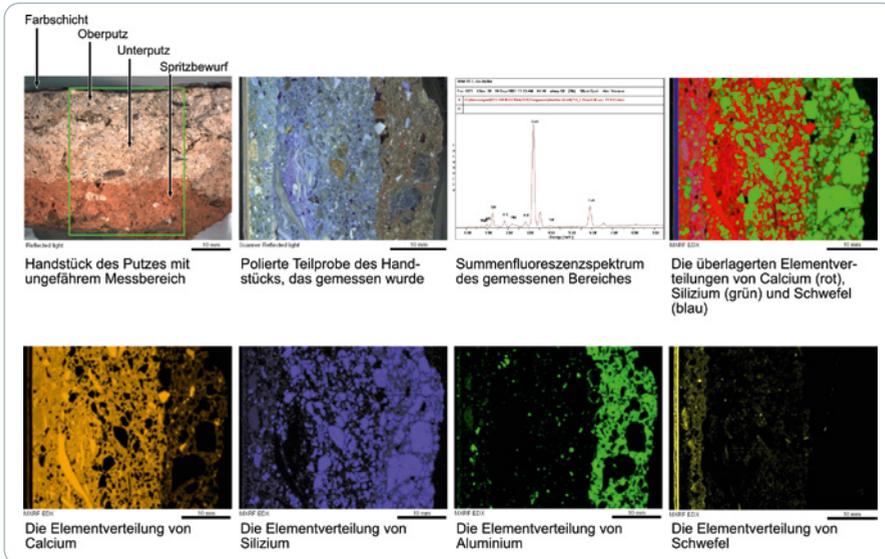


Bild 8.34 Beispiel der μ RFA-Ergebnisse einer historischen Putzprobe mit dem Summenspektrum und den verschiedenen Elementverteilungsbildern.

Das Elementverteilungsbild von Calcium zeigt deutlich, dass es sich sowohl beim Unter- als auch Oberputz um einen Kalkmörtel handelte. Das Siliziumverteilungsbild zeigte im Unter- und Oberputz neben dem Siliziumgehalt in der Gesteinskörnung auch etwas im Bindemittel, was mit den mikroskopischen Analysen übereinstimmte, da sowohl in beiden Putzschichten natürliche hydraulische Anteile als auch Portlandzementklinker nachgewiesen wurde. Beim Spritzbewurf handelte es sich jedoch um einen reinen Lehmörtel, was sich in den Elementverteilungsbildern in einem hohen Aluminium- und Siliziumgehalt sowie einem wesentlich geringeren Calciumanteil widerspiegelt. Das Schwefelverteilungsbild deutet an, wieviel Portlandzement in Unter- und Oberputz verwendet wurde (Calciumsulfat wird in Portlandzement als Erstarrungsverzögerer verwendet, siehe Kapitel 3.4.2). Demnach ist der Schwefelgehalt im Oberputz wesentlich höher als im Unterputz, was andeutet, dass im Oberputz mehr Portlandzement verwendet wurde, was auch mit den mikroskopischen Beobachtungen übereinstimmt. Der hohe Schwefelgehalt in den Farbschichten wurde durch das Pigment Barytweiß (BaSO_4) erzeugt. Die mikroskopischen und μ RFA-Ergebnisse gaben auch Hinweise bezüglich der mechanischen Eigenschaften der Putzschichten. Aufgrund der unterschiedlichen Gehalte an Portlandzement war demnach für das Elastizitätsmodul des Spritzbewurfs ein geringerer Wert zu erwarten als für den Oberputz, mit einem dazwischenliegenden Wert für den Unterputz. Diese nicht unbedingt der heute gängigen Praxis entsprechenden Arbeitsweise entsprach durchaus der örtlichen Tradition dieser Zeit, da die Handwerker, die mit dem rela-

tiv neuen Material Zement umgingen, versucht waren, eine besser verarbeitbare und beständigere Deckputzschicht aufzutragen. Das Beispiel zeigt, dass durch ortsaufgelöste chemische Untersuchungen eine Menge zusätzlicher Ergebnisse erarbeitet werden können, die zur Klärung spezifischer Fragestellungen beitragen.

In Bild 8.35 ist ein weiteres Beispiel, in Form einer Betonprobe zu sehen, die einseitig sulfathaltigen Wässern ausgesetzt war. Die Elementverteilungsbilder zeigen das Eindringprofil von Sulfat, das in den Verteilungen durch Schwefel repräsentiert ist. Durch eine weitere Messung wurde ein Konzentrationsprofil erstellt, welche die Sulfatgehalte im Beton in Form von SO_3 -Gehalten quantifizierten. Ähnliche Eindringprofile lassen sich von Chloriden oder Alkalien erstellen, die einen großen Einfluss auf die Beständigkeit des Betons haben.

Die μRFA lässt sich bei vielen Fragestellungen einsetzen. Durch den fokussierten Röntgenstrahl können örtlich begrenzt chemische Informationen gewonnen werden, die sonst nur mit dem REM-EDX vergleichbar sind. Im Gegensatz zum REM können in den meisten μRFA -Geräten wesentlich größere Proben und größere Probenausschnitte in kürzerer Zeit untersucht werden, wobei es wesentlich einfacher als im REM ist, sich auf der Probenoberfläche zu orientieren.

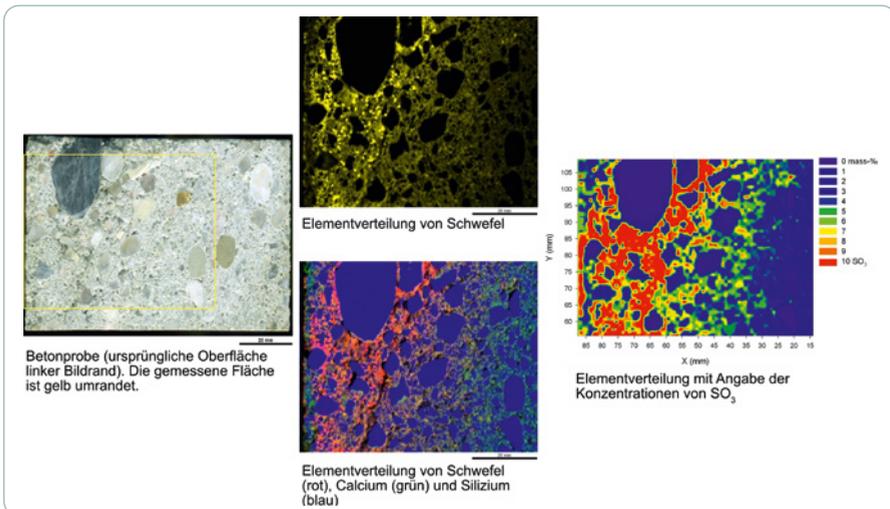


Bild 8.35 Eine Betonprobe mit einem Eindringprofil von Sulfat (repräsentiert durch Schwefel) und die Ergebnisse der Quantifizierung des Sulfatprofils.

8.4.2 Mörtelanalyse

Bei der Mörtelanalyse wird meist nach den ursprünglichen Anteilen der Ausgangsstoffe Bindemittel und Gesteinskörnung (Zuschlag) gefragt (B/Z-Verhältnis). Weitere Fragestellungen beziehen sich auf das Bindemittel, z. B. hydraulische Anteile in hydraulischen Kalken, das Gips/Kalk-Verhältnis in Gips/Kalk-Mörtel oder das Wasser/Zement-Verhältnis in einem Zementmörtel. Bei der Gesteinskörnung ist deren Art und Zusammensetzung, deren Kornform und deren Korngrößenverteilung (Sieblinie) von Interesse [8.41]. Einige dieser Fragestellungen wurden schon in vorigen Kapiteln bei der Gefüge- und Phasenanalyse angesprochen.

Die Ermittlung des B/Z-Verhältnisses bei Mörtel ist nicht genormt und deren Bestimmung hängt stark von der Art des Bindemittels ab [8.42]. Bei Mörteln ist zu berücksichtigen, dass das Bindemittel ursprünglich in einer anderen (nicht-hydratisierten) Form vorlag (Ausnahme: Lehm als Bindemittel). Um das ursprüngliche Verhältnis von Bindemittel und Zuschlag zu ermitteln, muss bekannt sein, in welcher Form dieses vorlag. Bei Gipsmörtel kommen zwei Ausgangsstoffe in Frage: Anhydrit und Bassanit. Bei Zementmörtel ist es dagegen in der Regel Portlandzement und bei Kalkmörteln Kalkhydrat oder Calciumoxid (Brandkalk) mit eventuellen Anteilen an hydraulischen Komponenten.

Zur Ermittlung des B/Z-Verhältnisses muss das Bindemittel auf seine chemischen Komponenten analysiert werden. Dazu wird eine Mörtelprobe meist in verdünnter Salzsäure (HCl) aufgelöst, vom Zuschlag abgetrennt und dann die Mengen an Calcium, Magnesium, Silizium, Aluminium und Eisen in der Lösung analysiert. Der Zuschlag wird getrennt gewogen. Zusätzlich wird die Menge an Sulfat aus der Lösung (bei Sulfatmörtel), der Glühverlust und der Carbonatgehalt (Angabe als CO₂) ermittelt. Die gelösten Komponenten können mit unterschiedlichen Methoden bestimmt werden:

- › Atomabsorptionsspektroskopie (AAS),
- › Massenspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS),
- › Gravimetrie oder Potentiometrie,
- › Spektralphotometrie.

Carbonatische Anteile können nasschemisch oder mittels Calcinierung und anschließender IR-spektrometrischer Quantifizierung der Verbrennungsgase bestimmt werden. Aus den quantitativen Angaben lassen sich die Mengen im Gesamtmörtel und die ursprüngliche Bindemittelmenge ermitteln. Hydraulische Anteile in einem Mörtel können nach Boynton [8.43] mit dem hydraulischen Index CI (Cementation Index) angegeben werden:

$$CI = \frac{2,8 \cdot \%SiO_2 + 1,1 \cdot \%Al_2O_3 + 0,7 \cdot \%Fe_2O_3}{\%CaO + 1,4 \cdot \%MgO}$$

Je nach CI-Wert werden Mörtel in hydraulische Klassen eingeteilt:

- › Nicht hydraulisch: 0,0 bis 0,3
- › Schwach hydraulisch: 0,3 bis 0,5
- › Moderat hydraulisch: 0,5 bis 0,7
- › Hoch hydraulisch: 0,7 bis 1,1

Diese Art der chemischen Mörtelanalyse ist nur möglich, solange keine säurelöslichen Bestandteile im Zuschlag vorhanden sind oder deren Menge genau bekannt ist. Handelt es sich z. B. um bekannte Mengen an carbonatischen Zuschlägen, müssen die ermittelten Mengen für Calcium und Magnesium entsprechend korrigiert werden. Sind säurelösliche Zuschlaganteile nicht bekannt, kann das B/Z-Verhältnis mit Hilfe von Dünnschliffen abgeschätzt werden. Eine schematische Vorgehensweise einer Mörtelanalyse ist in Bild 8.36 veranschaulicht. Die genaue Durchführung der chemischen Mörtelanalyse wird hier nicht weiter besprochen. Detaillierte Beschreibungen dazu finden sich in [8.41] [8.42] [8.44].

Sollen historische Mörtel nachgestellt werden, sollten jedoch nicht nur stoffliche, sondern auch mechanische Eigenschaften abgestimmt werden. Ein Fugenmörtel, der stofflich zum vorhandenen Mauermörtel kompatibel ist, aber in seinen mechanischen Eigenschaften nicht den Anforderungen des Mauerwerks genügt, ist unter Umständen nur begrenzt dauerhaft und muss möglicherweise schon nach kurzer Zeit erneuert werden [8.41].

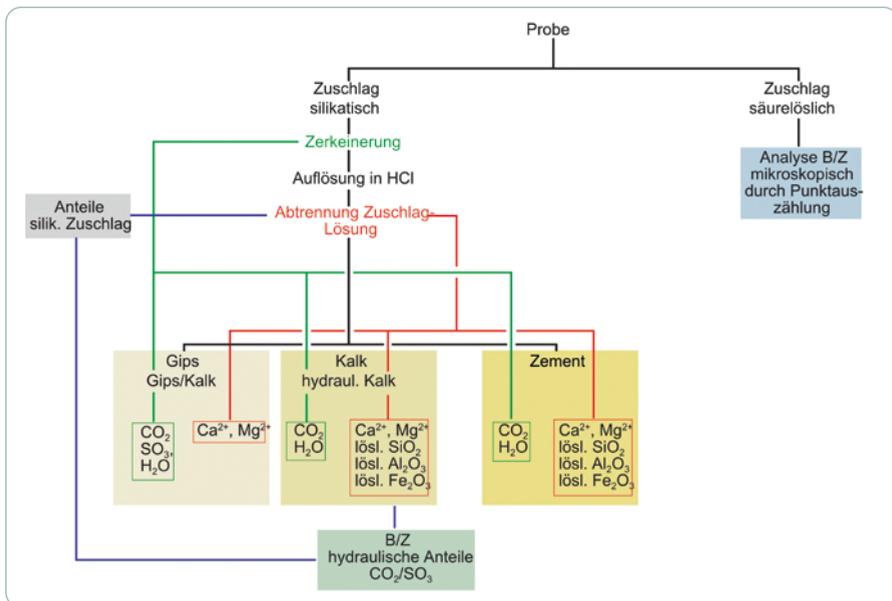


Bild 8.36 Schematisches Vorgehen bei der Mörtelanalyse.

8.4.3 Salzanalyse und Feuchtegehalt

Bei der Salzanalyse wird bestimmt, wie viel wasserlösliche Komponenten (Salze) in einem porösen Baustoff vorhanden sind. Da es sich um Salze handelt, wird davon ausgegangen, dass diese für den Baustoff potentiell schädigende Eigenschaften aufweisen, wenn ein Feuchtetransport nicht unterbunden werden kann. Soll die Menge an Salzen in einem Baustoff bestimmt werden, wird normalerweise nicht angegeben, wieviel Natriumchlorid oder Gips im Baustoff ist, sondern die Ionenkonzentrationen.

Für die Analyse der Mengen von Salzen gibt es keine standardisierten Verfahren. Üblich sind Wasserauszüge, bei der eine Mörtel- oder Mauersteinprobe aufgemahlen wird und eine definierte Menge der Probe mit einem vorgegebenen Volumen deionisiertem Wasser versetzt wird [8.45]. Welche Temperatur das Wasser haben sollte, wieviel und wie lange die Probe mit wieviel Wasser versetzt sein soll und ob zwischendurch die Probe gerührt oder geschüttelt werden soll, dafür gibt es keine einheitliche Vorgehensweise. Üblicherweise wird ein Feststoff-Wasser-Verhältnis von 1 : 100 gewählt (z. B. 1 g Probe in 100 ml Wasser) [8.45]. Das garantiert, dass auch Salze mit geringerer Löslichkeit (z. B. Gips) vollständig in Lösung gehen können. Für den Aufschluss können Maßkolben verwendet werden. Nach dem Einfüllen der Probe und des Wassers wird der Kolben mehrmals geschüttelt. Die Kontaktzeit wird zwischen 2 und 90 Minuten unter Labortemperaturen angegeben [8.45]. Anschließend wird die Lösung vom Pulver durch Filtern getrennt und einer chemischen Analyse unterzogen. In den meisten Fällen sind nur einige Ionen für die Salzanalyse interessant. Bei diesen handelt es sich um:

- › Anionen: SO_4^{2-} , Cl^- und NO_3^-
- › Kationen: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+

Die Ionen können direkt aus der Lösung mit verschiedenen Methoden bestimmt werden. Bewährt hat sich die Ionenchromatographie, da in zwei Durchläufen die Konzentrationen aller Kationen und aller Anionen gleichzeitig bestimmt werden können. Wichtig ist, dass das Ergebnis der Analysen des Wasserauszugs auf die ursprüngliche Probenmenge zurückgerechnet wird. Der Ionengehalt im Wasserauszug wird in der Regel in mg/l oder ppm angegeben. Nach der Rückrechnung auf die ursprüngliche Probenmenge muss das Ergebnis z. B. in Masse-%, Gewichts-% oder g/kg bzw. mg/g angegeben werden.

Sollen Salzanalysen in Putzen oder Mörtel durchgeführt werden, reichen üblicherweise Handstücke, die entsprechend zerkleinert werden. Soll jedoch der Salzgehalt in Mauerwerk bestimmt werden, sind Bohrungen entlang von vertikalen Achsen am geeignetsten. Es sollte allerdings dokumentiert werden, ob die Bohrung in einer Mörtelfuge oder einem Mauerstein begonnen wird. Üblich sind Spiralbohrer

mit 18 bis 22 mm Durchmesser. Es ist sinnvoll, mit einem Bohranschlag die Tiefe der Bohrung einzustellen oder in den gewünschten Abständen Markierungen am Spiralbohrer anzubringen (z. B. mit Klebeband). Das Bohrmehl einer Tiefenstufe kann direkt in einem Plastikcontainer, der unterhalb der Bohrung eng an die Wand gehalten wird, aufgefangen werden. Für die Salzanalyse reichen wenige Gramm an Bohrmehl. Einige Hersteller von Bohrmaschinen bieten Geräte an, die eine direkte Absaugung des Bohrmehls in kleine Plastikcontainer erlauben.

Werden zahlreiche Daten bestimmt, z. B. Bohrprofile an mehreren Profilachsen, empfiehlt sich die Darstellung der Ergebnisse in einem Diagramm. Im Diagramm können auch Grenzwerte von Ionenkonzentrationen, z. B. nach WTA [8.46], eingetragen werden. In Bild 8.37 ist ein Beispiel für die Darstellung von Ergebnissen von Salzanalysen aufgeführt. Dabei wurden entlang einer Wandachse von einem Mauerwerk in zwei Tiefenstufen (0–5 cm und 15–20 cm) Bohrmehlproben entnommen. Die Konzentrationen der Chlorid-, Nitrat- und Sulfationen sind in den drei nebenstehenden Diagrammen aufgeführt. Die Ergebnisse zeigten eine Abhängigkeit der Chlorid- und andeutungsweise auch der Nitratkonzentration von der Höhe der Wand. Sulfat zeigte dagegen keine klare Abhängigkeit seiner Ionenkonzentrationen von der Wandhöhe. Das lag daran, dass der Mauermörtel gipshaltig war und unterschiedliche Mengen an Mörtel angebohrt wurden.

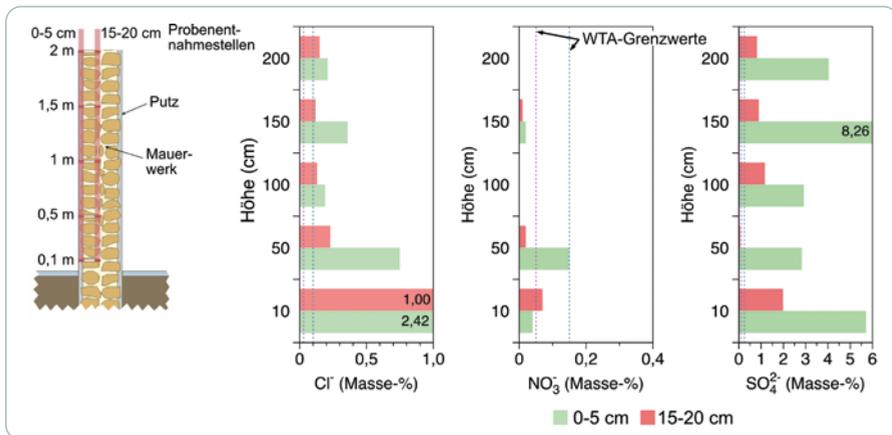


Bild 8.37 Ionenkonzentrationen von Chlorid, Nitrat und Sulfat entlang der vertikalen Achse eines Mauerwerks, bestimmt in zwei Tiefenstufen (rote und grüne Balken).

Wie viele Tiefenstufen gebohrt werden und wie viele Bohrungen entlang einer Wandachse durchgeführt werden, hängt von den jeweiligen Gegebenheiten vor Ort und den Fragestellungen ab. In dem in der Abbildung gezeigten Beispiel spielte die Tiefenauflösung keine wesentliche Rolle. Hier war vielmehr wichtig, wie hoch

die aufsteigende Grundfeuchte die Chloride bzw. Nitrate in das Mauerwerk transportiert hatten. Bei erdberührendem, dickem Mauerwerk könnte dagegen die Tiefenauflösung eine wichtigere Rolle spielen, um eine bessere Verteilung der Salzgehalte zu ermitteln.

Mit der chemischen Mengenbestimmung von Salzionen in Mauerwerk wird häufig gleichzeitig die Frage nach dem Feuchtegehalt gestellt. Die Materialfeuchte kann mit verschiedenen Methoden bestimmt werden. Einige Methoden bestimmen die Feuchte indirekt und relativ [8.47]. So kann beispielsweise die Feuchte im Beton mit einem RF-(relative Feuchte)-Sensor bestimmt werden. Die Methode wird meist zur Belegreife von zementgebundenen Fußböden verwendet. Andere Methoden sind zerstörungsfrei [8.47]. Hier soll das einfach durchzuführende Darrverfahren besprochen werden [8.47] [8.48].

Darrmethode

Soll der Feuchtegehalt eines Baustoffs bestimmt werden, müssen zuvor einige Überlegungen angestellt werden. Dazu gehören:

- › Die Feuchte im Baustoff schwankt mit den Umgebungsbedingungen, manchmal auf täglicher, fast immer jedoch auf saisonaler Basis. Es ist deshalb empfehlenswert, bei der Probenentnahme Datum, Uhrzeit, Umgebungstemperatur und die Luftfeuchte zu dokumentieren.
- › Es muss sorgfältig geplant werden, wo die Proben genommen werden müssen.
- › In einem Mauerwerk besitzen die Steine meist eine andere Porosität als ein Putz oder Mauermörtel, was zu unterschiedlichem Feuchtetransporteigenschaften und oft zu unterschiedlichen Feuchtegehalten führt. Bei der Angabe des Feuchtegehalts ist das zu beachten.

Proben zur Feuchtebestimmung können Handstücke, Bohrkerne oder Bohrmehlproben sein. Bohrkerne sind dahingehend problematisch, dass bei deren Entnahme trocken gebohrt werden muss und daher mit einer Temperaturerhöhung des Materials und entsprechenden Feuchteverlusten zu rechnen ist. Um einer zu großen Erwärmung der Bohrkronen vorzubeugen, sollten Kernbohrer von mindestens 50 mm verwendet werden [8.48]. Bei Bohrmehlproben ist ebenfalls mit einer Erwärmung des Bohrers zu rechnen und durch die höhere Oberfläche der Bohrmehlpartikel ist mit einem entsprechenden Feuchteverlust zu rechnen. Bohrmehlproben können abschnittsweise entnommen werden, z. B. um ein Feuchteprofil einer Wand zu erhalten. Um Feuchteverluste zu minimieren, sollte nach jedem Tiefenabschnitt die Bohrkronen etwas abgekühlt werden. Bild 8.38 zeigt ein Beispiel für Feuchteprofile von einem Mauerwerk.

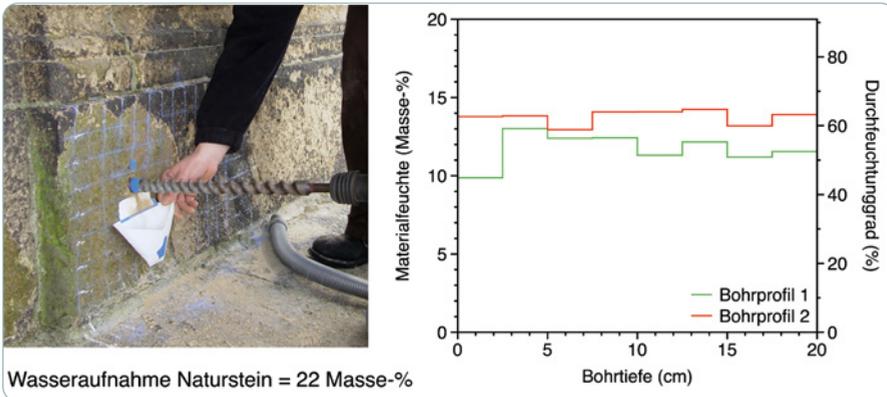


Bild 8.38 Entnahme von Bohrmehlproben zur Bestimmung von Feuchteprofilen an einem Natursteinmauerwerk (links); Feuchteprofile, abhängig von der Tiefe (rechts) mit Darstellung des Durchfeuchtungsgrads.

Wichtig ist, so schnell wie möglich nach der Entnahme die Masse aller Proben zu bestimmen. Dazu sollten die Proben am besten direkt vor Ort gewogen werden. Sollte das nicht möglich sein, sind die Proben direkt nach deren Entnahme in dampfdicht verschließbaren Behältern zu verpacken (z. B. aus Glas oder Kunststoff). Besteht Zweifel an der Dichtheit der Verschlüsse, können diese mit Klebeband zusätzlich gesichert werden. Plastikbeutel sind weniger geeignet, da sie nicht immer dicht verschlossen werden können. Nach dem Eintreffen im Labor müssen die Proben, soweit nicht bereits erfolgt, gewogen werden und anschließend bis zur Massekonstanz in einem Trockenschrank getrocknet werden. Üblicherweise wird als Trocknungstemperatur in den meisten Fällen 105° bzw. 110 °C angegeben. Hier ist zu berücksichtigen, dass bei dieser Temperatur nicht nur freies oder physikalisch gebundene Feuchte, sondern unter Umständen auch chemisch gebundenes Wasser von Phasen wie Gips, Thenardit oder Hydratphasen in Zement oder hydraulischen Kalken entfernt wird. Es ist deshalb empfehlenswert, die Trocknungstemperatur auf 60 °C, und bei Gipsbaustoffen auf 40 °C zu reduzieren [8.48].

Die Massekonstanz nach dem Trocknen ist erreicht, wenn die Massedifferenz zwischen zwei zeitlich aufeinanderfolgenden Wägungen gleich oder kleiner 0,1 % ist. Die Berechnung des Feuchtegehalts erfolgt nach:

$$u_m = \frac{m_{mf} - m_m}{m_m} \cdot 100 \%$$

mit

u_m = Materialfeuchte (Masse-%);

m_{mf} = Masse feuchtes Material (g);

m_m = Masse trockenes Material (g).

Ist die Materialfeuchte eines Baustoffs bekannt, ist der Durchfeuchtungsgrad von Interesse [8.48]. Der Durchfeuchtungsgrad ist das Verhältnis der vorhandenen Materialfeuchte mit der maximalen Sättigungsfeuchte eines Baustoffs:

$$DF = \frac{u_m}{u_{\max}} \cdot 100\%$$

mit

DF = Durchfeuchtungsgrad,

u_m = Materialfeuchte,

u_{\max} = maximale Sättigungsfeuchte.

Die maximale Sättigungsfeuchte kann mittels der Wasseraufnahme bestimmt werden, bei Mauersteinen z. B. nach DIN EN 772-11. Der Durchfeuchtungsgrad ist nützlich, um einzuschätzen, wieviele der Poren in einem Material mit Wasser gefüllt sind. Bei einem hohen DF-Wert kann davon ausgegangen werden, dass eine Mehrheit der Poren des Baustoffs gefüllt ist.

Methoden für eine kontinuierliche Feuchtemessung sind zwar möglich, z. B. durch die TDR-Technik (Time Domain Reflectometer) oder durch Tensiometer, sind aber in der Praxis häufig aufwändig und fehleranfällig. Einfachere, zerstörungsarme Methoden, z. B. Verfahren, die auf dem elektrischen Widerstand beruhen, erbringen oftmals unzuverlässige Ergebnisse, wenn Salztransport im Porengefüge des Baustoffs stattfindet.

Anmerkung zur Calciumcarbid-Methode (CM-Verfahren)

Eine schon sehr lange angewendete Methode der direkten Feuchtemessung mittels dem CM-Verfahren ist für geringere Probenmengen weniger geeignet. Die Methode erfordert viel Geschick vom Anwender und ist temperaturabhängig. Beim CM-Verfahren wird Calciumcarbid in einem Druckbehälter mit der feuchtehaltigen Probe versetzt. Die Reaktion von Calciumcarbid mit Wasser erzeugt Acetylgas, das im Behälter Druck aufbaut. Durch Messen des Drucks kann auf die Menge an Acetylgas und auf den Feuchtegehalt der Probe rückgeschlossen werden [8.47].

9 SCHÄDIGUNGSPROZESSE

Die Nutzungs- und Lebensdauer von Baukonstruktionen wird von den technologischen Eigenschaften und der Dauerhaftigkeit der Konstruktionsmaterialien bestimmt. Baukonstruktionen unterliegen einem nutzungs- und umweltbedingten Alterungsprozess, auf den der Mensch mittels Unterhalts- und Pflegemaßnahmen einen entscheidenden Einfluss ausübt. Drastische Zerstörungen erfolgen bei Naturkatastrophen und Kriegen. Aber auch bei Veränderungen der Gebäudenutzung und damit verbundenen Baumaßnahmen finden oft erhebliche Eingriffe in alte Bausubstanz statt. Instandsetzungsmaßnahmen versuchen normalerweise, einen vorherigen Zustand wiederherzustellen oder, bei geänderten Nutzungsanforderungen, zu übertreffen. Dabei steht heute immer stärker der Gedanke an die Nachhaltigkeit im Vordergrund [9.1]. Eine substanzschonende, nachhaltige Instandsetzung gelingt nur bei entsprechend sorgfältiger Planung und Auswahl geeigneter Reparatur- und Austauschmaterialien.

9.1 Einflussfaktoren und Prozesse

Mineralische Baustoffe sind wie alle Materialien einer natürlichen Alterung unterworfen. Entsprechend der Umgebungsbedingungen können verschiedene Faktoren zu einer Beschleunigung der Alterung beitragen. Diese Faktoren können auf äußere natürliche, menschliche oder materialbedingte Ursachen beruhen. Bild 9.1 links zeigt einige der Einflussfaktoren, die letztendlich eine entscheidende Rolle spielen. In der Regel sind mineralische Baustoffe porös, d. h. Flüssigkeiten (z. B. Wasser) und Gase (z. B. Luft) können in den Baustoff eindringen und dort entsprechende Änderungen der Materialeigenschaften bewirken [9.2]. Dringt in eine Ziegelwand, beispielsweise durch Schlagregen, Feuchtigkeit ein, ändern sich deren wärmetechnische Kennwerte: Die Wärmeleitfähigkeit wird erhöht und damit auch der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert), d. h. die Wärmedämmung verschlechtert sich. Gleichzeitig erhöht sich bei dauerhafter Feuchtebeaufschlagung im Winter die Gefahr von bleibenden Frost- und Salzschäden.

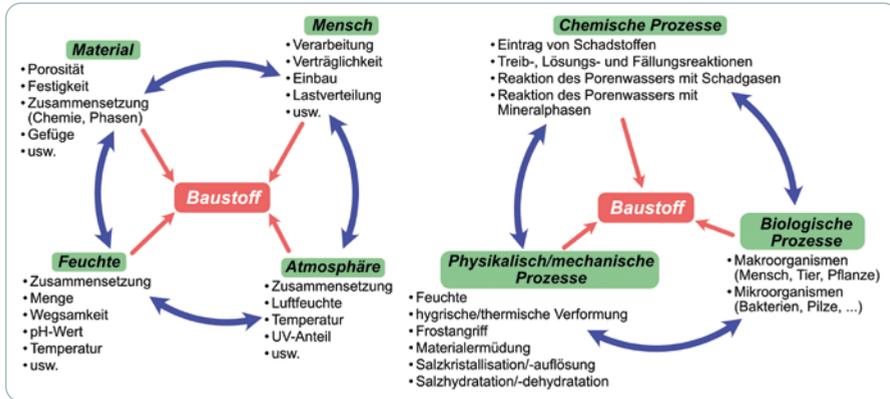


Bild 9.1 Einflussfaktoren der Beständigkeit von Baustoffen (links). Schädigungsprozesse (rechts).

Feuchte beeinflusst die Eigenschaften poröser Baustoffe und in den meisten Fällen deren Dauerhaftigkeit. Feuchte verringert die Festigkeitseigenschaften und verschlechtert die wärmetechnischen und akustischen Eigenschaften. Das Risiko der Schimmelpilz- und Mikrobenbildung steigt bei durchfeuchteten Bauteilen [9.3]. Gleichzeitig dient es als Medium für den Transport von schädlichen Stoffen (insbesondere Ionen), die im Baustoff z. B. in Form von Salzen ausblühen und durch den Kristallisationsdruck Schäden anrichten können [9.4].

Schädigungsprozesse von Baustoffen können grob in drei Gruppen eingeteilt werden: chemische, physikalisch/mechanische und biologische Schädigungsprozesse (Bild 9.1, rechts). Zu den chemischen Prozessen können der Eintrag von Schadstoffen, Lösungs-, Treib- und Fällungsreaktionen, Reaktion des Porenwassers mit Mineralphasen oder Schadgasen gerechnet werden [9.5]. Physikalisch/mechanische Schädigungsprozesse beinhalten hygrometrische Verformungen, Frostangriff, Salzkristallisation und Salzhydratation, sowie mechanische Überbeanspruchung (z. B. zu hohe Lasten, Ermüdung bei dynamischer Belastung). Biologische Schädigungsprozesse beruhen auf der Aktivität von Makroorganismen (Mensch, höhere Tiere/Pflanzen) oder Mikroorganismen (Bakterien, Pilze, Algen). Die Schädigungsprozesse sind fast immer miteinander verknüpft. Ein verbindendes Element zwischen den Schädigungsprozessen ist in den meisten Fällen Feuchte, die im Baustoff als Ausgleichsfeuchte vorhanden ist oder von außen in den Baustoff eindringt. Die Menge an Feuchte im Baustoff wird durch dessen Porosität und Porenstruktur bestimmt.

9.2 Porosität in Baustoffen und Feuchtetransport

Poröse mineralische Baustoffe besitzen keine einheitlichen Porengrößen, sondern einen Größenbereich, der bei den verschiedenen Baustoffarten unterschiedlich ist. Bild 9.2 zeigt beispielhaft Porengrößenverteilungen, die an drei verschiedenen Materialien gemessen wurden: am Zementstein eines Betons, an einem porösen Kalkstein und einem Sandstein. Die Resultate zeigen, dass die Natursteine weite Porengrößenbereiche aufweisen können, wohingegen bei Betonen der größte Anteil der Poren unter $0,1 \mu\text{m}$ liegt [9.6]. Bei zementgebundenen Baustoffen hängen die Porosität und auch die Porengrößenverteilung vom Wasser/Bindemittel-Verhältnis (W/B) ab. Je größer W/B ist, desto größer sind die Porosität und meistens auch die Porendurchmesser [9.7].

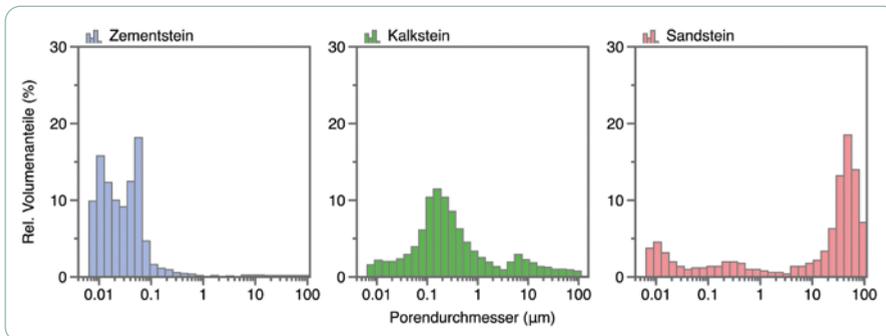
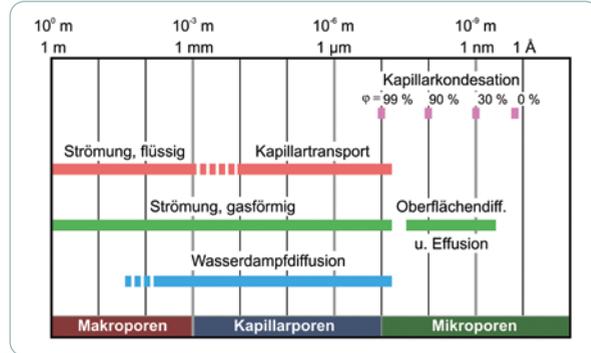


Bild 9.2 Beispiele der Porendurchmesserverteilung von verschiedenen Materialien.

Die Porengrößenverteilung und das absolute Porenvolumen hat einen entscheidenden Einfluss auf die Menge an gespeicherter Ausgleichsfeuchte und auf den Feuchtetransport (z. B. Feuchteintrag und Austrocknung). Die meisten mineralischen Baustoffe besitzen einen für Feuchte frei zugänglichen Porenraum. Nur einige Ausnahmen, z. B. Blähglas- oder Perlitprodukte, können auch geschlossene, nicht frei zugängliche Poren aufweisen.

Der Durchmesser bzw. Radius der Poren bestimmt hierbei das Transportverhalten von Wasser [9.8]. Grob lassen sich Poren in Makroporen, Kapillarporen und Mikroporen einteilen (Bild 9.3). Die Einteilung bezieht sich hierbei auf den Transport von Wasser. Für andere Materialien (z. B. technische Keramik) oder andere Disziplinen (z. B. Biologie) existieren andere Einteilungen, die sich von den hier vorgestellten unterscheiden können.

Bild 9.3 Porentypen und Transportmechanismen (nach Klopfer [9.8]).



Wasser, das in Poren transportiert wird, die größer als 1 mm sind (Makroporen), unterliegt der Schwerkraft, d. h. eingetragene Feuchtigkeit (z. B. durch Schlagregen), fließt in diesen Poren infolge der Schwerkraft nach unten.

Bei Poren unter 0,5 mm Durchmesser (Kapillarporen) überwiegen kapillare Kräfte, die ermöglichen, dass Feuchte auch entgegen der Schwerkraft nach oben transportiert wird. Kapillarkräfte sind hierbei umgekehrt proportional zum Porenradius, d. h. in kleinen Poren herrschen größere Kapillarkräfte als in größeren Poren. In der Praxis bedeutet das, dass Wasser in kleinen Poren höher steigen kann als in großen. Allerdings ist in kleinen Poren die Transportgeschwindigkeit geringer als in großen Poren. Der Kapillartransport lässt sich am einfachsten durch das im Schulunterricht durchgeführte Experiment der kapillaren Röhren veranschaulichen. Hierbei steigt gefärbtes Wasser kapillar in hinreichend engen Röhren zu unterschiedlichen Höhen auf, wobei in der engsten Röhre das Wasser am höchsten steigt und in der weitesten Röhre am niedrigsten. Bei Durchführung des Versuchs lässt sich gleichzeitig beobachten, dass in der engsten Röhre der Aufstieg am langsamsten erfolgt [9.9].

Kapillare Kräfte können mit dem Kapillardruck beschrieben werden, der durch die Young-Laplace-Gleichung definiert ist [9.10]:

$$p_c = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos\theta}{r_c}$$

mit

p_c = Kapillardruck,

γ = Oberflächenspannung Wasser/Feststoff,

θ = Kontaktwinkel Wasser/Feststoff,

r_c = effektiver Porenradius.

In sehr kleinen Poren ist der Kapillartransport von flüssigem Wasser unter Umständen so langsam, dass er nahezu zum Erliegen kommt. In diesen Poren kann Wasser nur noch in Form von Wasserdampf diffundieren [9.8]. Der Trans-

port von Wasserdampf ist insbesondere beim Trocknen feuchter Bauteile wichtig aber auch bei der Materialfeuchte, die im Gleichgewicht mit der Raum- oder Umgebungsluft steht [9.11]. Die Wasserdampfdiffusion erstreckt sich über einen weiten Porengrößenbereich; sie findet in relativ großen Poren statt, kann aber auch in Poren unterhalb eines Mikrometers erfolgen.

Baustoffe stehen über das Porensystem mit ihrer Umgebung im Gleichgewicht (Bild 9.4). Ist ein Baustoff umgeben von Wasser, nimmt er Wasser in flüssiger Form bis zur Wassersättigung auf. Kommt ein Baustoff einseitig mit Wasser in Kontakt, wird Wasser kapillar oder in Form von Strömung transportiert [9.8]. Letzteres tritt bei Druckunterschieden auf, z. B. bei drückendem Grundwasser. Die Lage der Verdunstungsfront, welche die Grenzfläche zwischen flüssigem Wasser in den Poren und Wasserdampf darstellt, ist abhängig von der Geschwindigkeit des kapillaren Transports (v_c) bzw. der Strömung und der Verdunstungsgeschwindigkeit (v_d). Ist v_c größer v_d , befindet sich die Verdunstungsfront auf der Oberfläche des Baustoffs [9.11]. Ist v_c kleiner v_d , wandert die Verdunstungsfront so lange in den Baustoff, bis sich ein Gleichgewicht zwischen Kapillartransport und Verdunstung einstellt ($v_c = v_d$) [9.12].

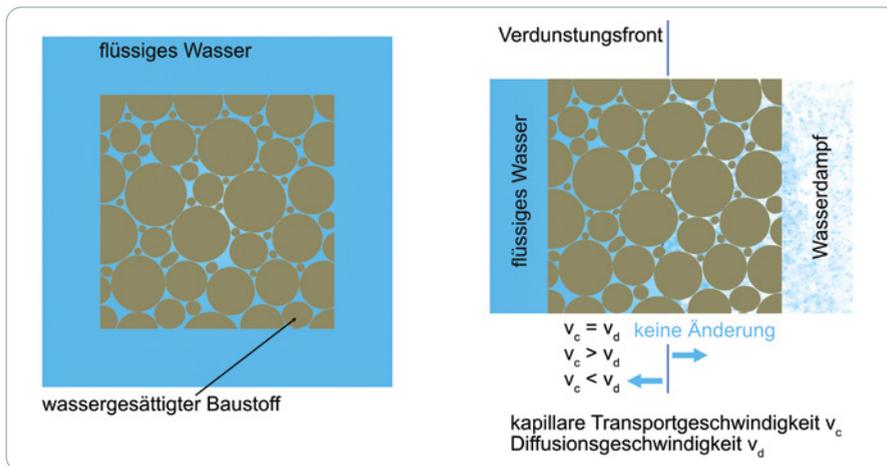


Bild 9.4 Kapillarer Wassertransport und Verdunstung.

Bild 9.5 verdeutlicht verschiedene Ausgleichsfeuchten in einem Baustoff. Poröse Materialien haben bezüglich ihres Feuchtegehalts die Tendenz, mit ihrer Umgebungsluft ins Gleichgewicht zu kommen [9.8] [9.13]: Ist die Feuchte der Luft hoch (relative Luftfeuchte, r. L.), so adsorbiert ein poröses Material mehr Feuchte in Form einer Schicht auf dessen Porenwänden [9.13]. Verringert sich die relative Luftfeuchte, z. B. durch Temperaturerhöhung der Umgebungsluft, wird so lange adsorbierte Feuchte im Material verdunsten und durch Wasserdampfdiffusion an

die Umgebungsluft abgegeben, bis der Feuchtegehalt des Materials mit dem der Umgebungsluft im Gleichgewicht ist. Poröse Baustoffe sind in der Praxis deshalb nie frei von Feuchte [9.14].

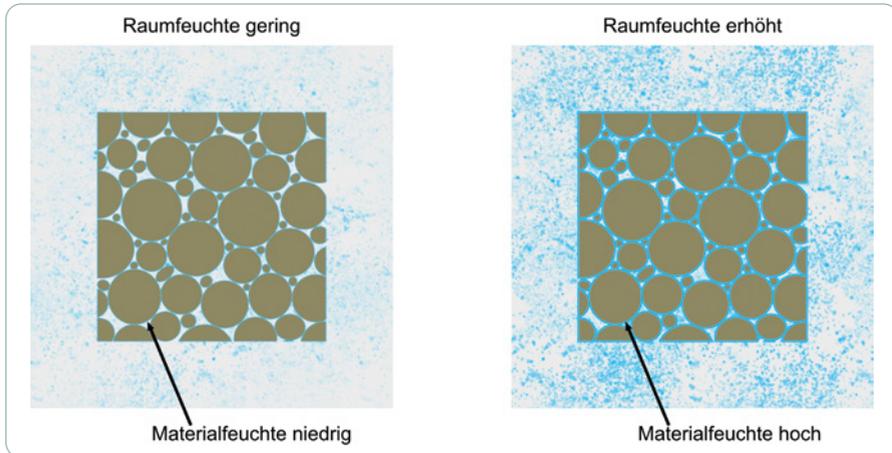


Bild 9.5 Material- und Umgebungsfeuchte.

Die relative Luftfeuchte (r. L.), oder relative Feuchte (RF), ist hierbei das Verhältnis der momentanen Wasserdampfmenge zur maximal möglichen Menge an Wasserdampf (= Sättigungsmenge) in der Luft. Erreicht die Menge an Wasserdampf in der Luft die Sättigungsmenge ist $RF = 100\%$. Bei $RF = 100\%$ kommt es zur Kondensation von Dampf, z. B. in Form von Nebel. Die Sättigungsmenge von Wasserdampf in Luft ist temperaturabhängig. Je geringer die Temperatur, desto geringer die maximale Menge an Wasserdampf, die in der Luft gespeichert werden kann. Das Mollier-Diagramm setzt die Wasserdampfmenge mit der relativen Luftfeuchte und der Temperatur in Zusammenhang. Damit lässt sich z. B. bei gegebener RF und Temperatur der Taupunkt bestimmen, d. h. die Temperatur, bei der es zur Kondensation kommt.

Die Feuchteaufnahme und -abgabe von porösen Baustoffen kann mit Sorptionsisothermen quantifiziert werden (Bild 9.6). Im Bild wurde eine Putzprobe bei konstanter Temperatur beginnend von 0 % RF in Schritten von 5 % RF stufenweise einer Luftfeuchterhöhung ausgesetzt und dabei nach Gleichgewichtseinstellung die Masse der Probe bestimmt. Die Massenzunahme geht auf die Adsorption von Wasserdampf in den Poren der Probe zurück. Wird die Umgebungsfeuchte stufenweise reduziert, verbleibt ein höherer Anteil der Feuchte, verglichen zur Adsorption zurück [9.13]. Die höhere Menge an Restfeuchte im Material bei der Desorption ist typisch für alle porösen mineralische Baustoffe und wird als Hysterese der Wasserdampfsorption bezeichnet [9.14]. Sorptionsisothermen von Bau-

stoffen sind wichtige Bezugseigenschaften. Sie geben die Feuchtespeicherfähigkeit von Materialien an, was z. B. für das Innenraumklima sehr wichtig ist (s. Kapitel 3.5.2).

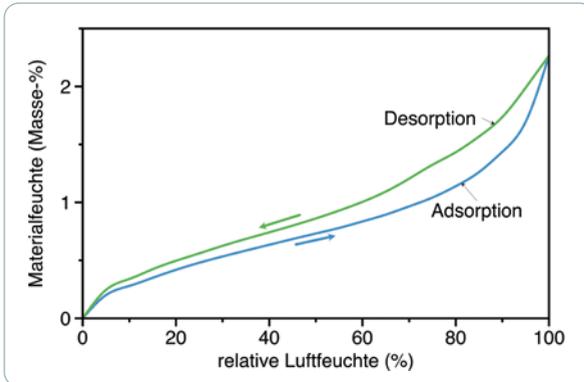


Bild 9.6 Sorptionsisothermen für einen Putz.

Unter normalen Bedingungen kondensiert Feuchte in der Luft, wenn diese die maximale Sättigung bei einer gegebenen Temperatur erreicht oder überschreitet. Dies passiert bei einer relativen Luftfeuchte von 100 %, wo Feuchte, z. B. in Form von Nebel kondensiert. In sehr kleinen Porenräumen gilt diese Gesetzmäßigkeit nicht mehr. In Poren mit sehr geringen Porenradien ändern sich die Energien, die zum Übergang zwischen dem gasförmigen und flüssigen Zustand von Wasser benötigt werden (Verdampfungsenthalpie). In diesen Poren kann es deshalb schon zur Kondensation von Wasserdampf unterhalb von 100 % der relativen Luftfeuchte kommen [9.15]. Dies ist in Bild 9.3 angedeutet. Je kleiner die Porenradien sind (Mikroporen), desto geringer sind die Luftfeuchten, bei der es zur Kondensation kommt. Diese Art der Kondensation wird Kapillarkondensation genannt, da sie von der Porengröße abhängt.

Praktische Bedeutung hat die Kapillarkondensation bei Materialien, die sehr viele Mikroporen aufweisen. Sie speichern die Feuchte in den kleinsten Poren in flüssiger Form. Ein Baustoff kann deshalb infolge der Kapillarkondensation eine teilweise Wassersättigung aufweisen, obwohl er mit flüssigem Wasser nicht in Berührung ist. Betone mit höheren Festigkeiten (geringeren W/B) beispielsweise trocknen unter normalen Umgebungsbedingungen (mittlere bis hohe Luftfeuchten) nie vollständig aus, da sie einen hohen Anteil an sehr kleinen Poren aufweisen (Bild 9.2).

9.3 Allgemeine Schädigungsprozesse

9.3.1 Frostangriff

Freies, reines Wasser gefriert bei einer Temperatur von 0°C unter Normaldruck (1,013 bar). In den Poren eines Baustoffs ist die Porenoberfläche in Wechselwirkung mit flüssigem und gasförmigem Wasser. Die Wechselwirkung nimmt mit der Abnahme des Porenradius zu: Je kleiner die Poren, desto größer die Wechselwirkung (analog zur Kapillarkondensation). Die Wechselwirkungsenergie zwischen Porenoberfläche und dem Wasser erzeugt eine Gefrierpunktserniedrigung. Man spricht hierbei von unterkühltem Wasser. Je geringer der Porenradius, desto geringer die Gefrierpunktserniedrigung [9.16].

Dies ist der Grund, warum Wasser in den Poren von Baustoffen bei geringeren Temperaturen gefriert als z. B. Wasser in einem See. Wichtig ist, dass Wasser, das sich in Poren unterschiedlicher Größe befindet, bei verschiedenen Temperaturen gefriert. Das bedeutet, dass Wasser in einem Porensystem, z. B. in einem Naturwerkstein, nicht bei einer bestimmten Temperatur, sondern in einem Temperaturbereich gefriert. Ionengehalte in der Porenlösung können den Gefrierpunkt noch weiter verringern.

Bild 9.7 zeigt das Phasendiagramm eines Gemischs aus Wasser und Salz (Streusalz). Gefriert Wasser mit einem Streusalzgehalt von 5 %, beginnt das Gemisch bei -3°C zu gefrieren. Bei weiterer Temperaturabsenkung bis -12°C gefriert nach und nach mehr Wasser und die verbleibende Salzlösung ändert sich im Salzgehalt in Richtung des Punkts A. Bei -12°C ist deshalb nicht alles Wasser gefroren, sondern koexistiert in Form einer Salzlösung mit dem neugebildeten Eis. Erst bei einer Temperatur von $-21,1^{\circ}\text{C}$ gefriert die gesamte Lösung. Dies ist der Grund, warum mit Streusalz beaufschlagte Straßen im Winter selbst bei Minustemperaturen Schneematsch aufweisen. Durch das Salz können Eis und Salzlösung gleichzeitig koexistieren.

Poröse Baustoffe können Wasser aufnehmen. Sinken die Umgebungstemperaturen ab, kann das Porenwasser gefrieren. Wasser in fester Form, Eis, hat ein ca. 9 % größeres Volumen als Wasser in flüssiger Form [9.18]. Diese Volumenvergrößerung durch das Gefrieren des Wassers kann eine Druckspannung in den Poren des Baustoffs aufbauen. Maßgebend sind hierbei der Feuchtegehalt im Baustoff und die Porengrößenverteilung.

Das Gefrieren von Wasser in einem porösen Material ist kompliziert und beruht auf verschiedenen Mechanismen. Dazu wurden verschiedene Theorien entwickelt, die auch zum Teil die Wechselwirkung von Wasser mit dem Porensystem berücksichtigen [9.18] [9.19].

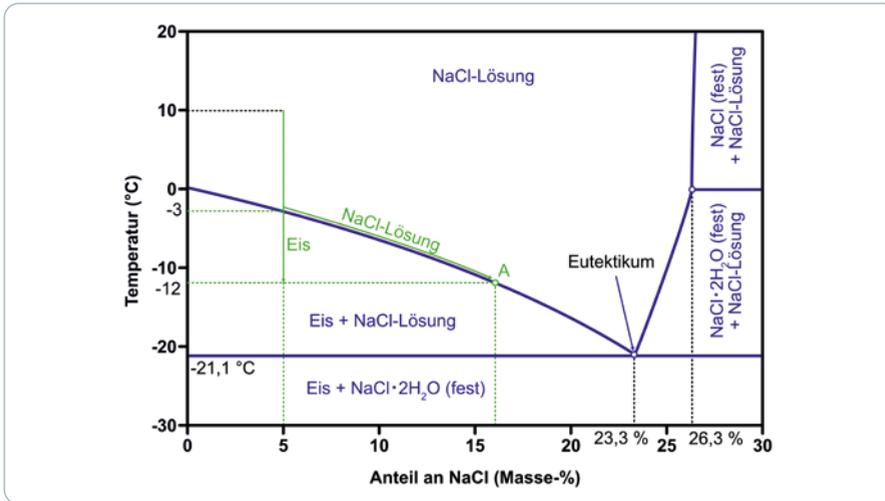


Bild 9.7 Phasendiagramm von Wasser und NaCl (nach [9.17]).

Volumenexpansion

Wie oben erklärt, ist das Volumen von Eis 109 % der gleichen Masse von Wasser. Der dadurch ausgeübte Expansionsdruck wirkt auf die Porenwandungen des Materials (Bild 9.8). Maßgeblich sind der Füllungsgrad der Poren und die Zugfestigkeit des Materials. Mineralische Baustoffe besitzen in der Regel nur eine geringe Zugfestigkeit (ca. 5–10 % der Druckfestigkeit). Ist die Pore jedoch nicht vollständig gefüllt, kann unter Umständen kein Expansionsdruck aufgebaut werden [9.18].

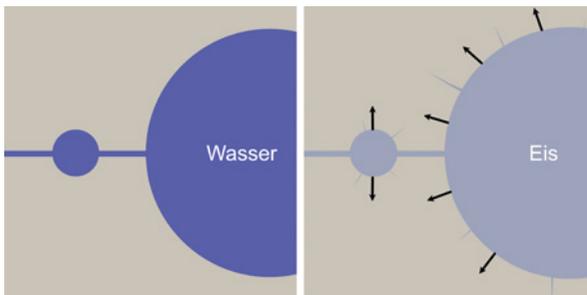


Bild 9.8 Volumenexpansion von Eis in einem Porensystem bei vollständiger Sättigung und wenn Wasser in allen Poren gefroren ist.

Der Effekt der Volumenexpansion ist statisch in dem Sinne, dass das Wasser an Ort und Stelle gefriert. Dies ist in porösen Baustoffen jedoch nur selten der Fall, da die meisten Poren miteinander verbunden sind und Wasser beim Gefrieren von anderen Poren transportiert werden kann. Dies wird in den folgenden Abschnitten beschrieben.

Theorie der Mikroislinsenpumpe

Beim Gefrieren von Wasser wird Energie in Form von Wärme frei. Das bedeutet, dass Eis eine geringere Energie aufweist als Wasser. Wenn daher Wasser in den Poren eines Baustoffs gefriert, gehen die H_2O -Moleküle in eine energetisch günstigere Form über. Erfährt ein poröses Material Temperaturen unter dem Gefrierpunkt, bildet sich zuerst in den größten wassergefüllten Poren Eis. Durch den energetisch günstigeren Aggregatzustand werden von den kleineren Poren unterkühltes Wasser hin zum Eis in den größeren Poren transportiert. Dadurch entsteht ein Unterdruck in den kleineren Poren, der sich auf den Baustoff in Form von Gefrierschwinden auswirkt [9.18] [9.20]. Dieser Vorgang wird in Bild 9.9 veranschaulicht. Abbildung (a) zeigt den Normalzustand bei Temperaturen über $0^\circ C$. Das Gefrieren beginnt in den großen Poren; zusätzliches Wasser wird zu dorthin »gepumpt« (b). Dabei wird eine Volumenverringerung der Matrix verursacht. Beim Tauen wird Wasser von den größeren zu den kleineren Poren in der Matrix »gepumpt«. Dadurch dehnt sich die Matrix aus. Zusätzliches Wasser wird aus der Umgebung in das Material aufgenommen, ähnlich eines sich ausdehnenden Schwamms (c).

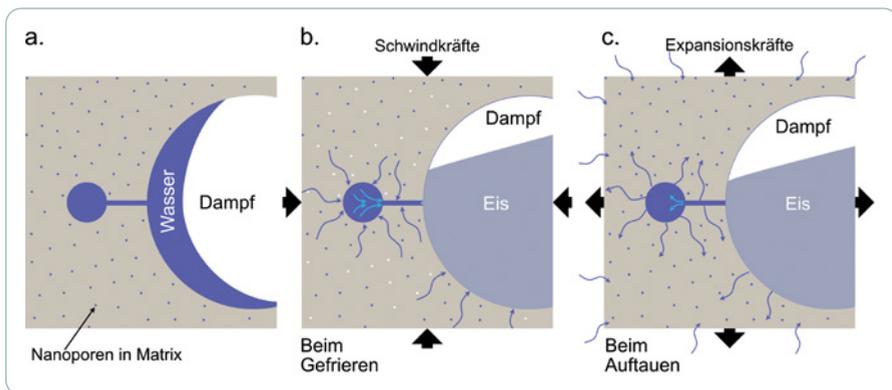


Bild 9.9 Theorie der Mikroislinsenpumpe

Der Transport findet so lange statt, bis sich ein energetisches Gleichgewicht einstellt, d. h. bis die Energiedifferenz zwischen dem Eis und dem unterkühlten Wasser null ist. In einem Material mit mittlerer oder geringer Feuchtesättigung kommt es nicht zwangsläufig zu Schäden, da zum Füllen aller größeren Poren unter Umständen nicht genügend Feuchte in den kleineren vorhanden ist, bzw. es schnell zu einem energetischen Gleichgewicht kommt [9.18]. Ist ein poröser Baustoff jedoch in Kontakt mit externem Wasser (z. B. aufsteigender Grundfeuchte) steht ein großes Reservoir zur Verfügung, um alle größeren Poren mit Eis zu füllen.

Beim Erwärmen des Baustoffs nimmt der Druckunterschied zwischen kleinen und eisgefüllten Poren wieder ab und der Baustoff beginnt, sich wieder auszudehnen. Dabei können die kleineren Poren externes Wasser aufnehmen, solange das Eis in den größeren Poren noch nicht geschmolzen ist (Bild 9.9). Beim erneuten Gefrieren kommt es zu einer Wiederholung des Prozesses, allerdings mit einem erhöhten Wassergehalt im Porensystem [9.20]. Wirken viele dieser Gefrier-/Erwärmungszyklen auf einen porösen Baustoff ein, kann es zu Schädigung des Porengefüges kommen.

Die Theorie der Mikroeislinsepumpe wird besonders bei Beton angewendet, da Beton sehr viele Poren im Nanobereich besitzt, die praktisch auch bei tiefen Temperaturen nie gefrieren, aber auch zahlreiche kapillare Poren aufweisen kann, die bei entsprechenden Temperaturgradienten Eis bilden [9.20].

Theorie des hydraulischen Drucks

Bei sinkenden Temperaturen gefriert Eis erst in den größeren Poren. Unterkühltes Wasser, das in angrenzenden kleinen Poren keinen Ausweichraum hat, verursacht in diesen einen Druck auf die Porenwandungen, der nach Powers [9.21] als hydraulischer Druck bezeichnet wird. Der Druck wird durch den Transport des Wassers erzeugt und nimmt mit höherem Durchfluss zu. Bestimmend für die Größe des hydraulischen Drucks sind die Weglänge des verdrängten Wassers bis zur nächsten wasserfreien größeren Pore, das Druckgefälle und die Wasserpermeabilität (Bild 9.10) [9.21].

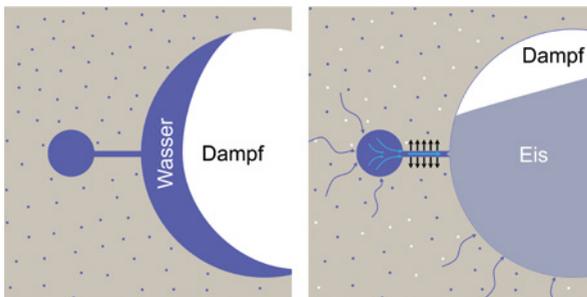


Bild 9.10 Hydraulischer Druckaufbau durch das Strömen von Wasser zu Eis.

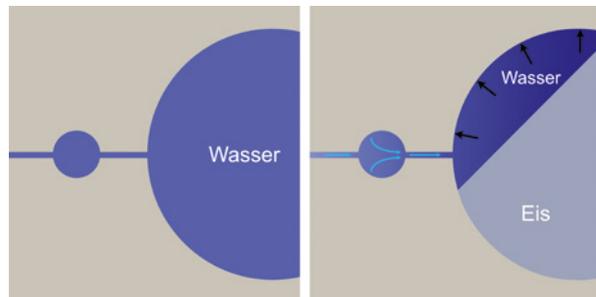
Poröse Materialien mit verschiedenen Wasserpermeabilitäten bauen beim Gefrieren von Wasser verschiedene hydraulische Drücke auf und werden entsprechend unterschiedlich durch den hydraulischen Druck geschädigt [9.18] [9.19]. Wenn das Wasser zuerst in den größeren Poren gefriert, kann das Wasser in den kleineren Poren unter Umständen nicht mehr ausweichen und es bauen sich schnell hohe Drücke auf, welche die Zugfestigkeit des Materials übersteigen können. Der Temperaturgradient ist deshalb wichtig, da bei schnellem Gefrieren von

Wasser in den größeren Poren eine hohe Druckdifferenz entsteht und durch die Verringerung des Ausweichraums für Wasser in kleineren Poren auch bei geringeren Wassersättigungsgraden (<91 %) Schäden auftreten können [9.18].

Theorie des osmotischen Drucks

Sind gelöste Bestandteile im Wasser, das sich in den Poren des Materials befinden (z. B. Tausalze oder gelöste Materialkomponenten), ergeben sich beim Gefrieren in unterschiedlichen Poren unterschiedliche Lösungskonzentrationen: In größeren Poren gefriert das Wasser schneller und die verbleibende Lösung reichert sich mit Ionen an (Bild 9.7). Dadurch besitzen die Restlösungen in den gefrierenden größeren Poren höhere Salzkonzentrationen verglichen mit den noch nicht gefrorenen Lösungen in den kleineren Poren [9.18]. Konzentrationsunterschiede stellen jedoch Ungleichgewichte dar, welche durch eine Diffusion der Ionen von der höheren zur niedrigeren Konzentration ausgeglichen werden. Auf der anderen Seite kann sich ein Konzentrationsgleichgewicht schneller durch Wassertransport von den niedrigeren zu den höheren Konzentrationen einstellen (Bild 9.11). Dies kann bei besonders feinporigen Materialien, z. B. der Zementsteinmatrix, zu einem semipermeablen Effekt führen, der dann zu einem osmotischen Druckaufbau in den größeren Poren führen kann. Aufgrund der langsameren Diffusionsgeschwindigkeiten wird diesem Schadensprozess jedoch eine geringere Bedeutung beigemessen [9.18].

Bild 9.11 Osmotischer Druck durch Konzentrationserhöhung an Salzen in der größeren Pore aufgrund von Eisbildung.



Maßnahmen gegen Frostangriff

Bei Materialien wie Baukeramik und Naturstein hilft lediglich ein guter Feuchteschutz und eine entsprechende Festigkeit. Feuchteschutz kann in manchen Fällen durch einfache bauliche Maßnahmen, z. B. einen Putz, einen ausreichenden Dachüberhang (gegen Schlagregen) oder eine Drainage bzw. Abdichtung (gegen Ablauf- oder Grundfeuchte) erreicht werden [9.22] [9.30] [9.31]. Zwar wurden in der Vergangenheit hydroprobierende Imprägnierungen für Naturstein und Ziegel sowie Klinker angewendet, diese zeigten jedoch über einen längeren Zeitraum

Folgeschäden, z. B. in Form von dünnen Abschaltungen der Baustoffoberfläche [1.1] [1.2]. Eine Hydrophobierung von Oberflächen von Naturstein und Ziegel kann deshalb in nur wenigen Fällen empfohlen werden. Einer dieser Fälle trifft auf Beton zu. Beton ist normalerweise wesentlich feinporiger als Naturstein und Ziegel und die Folgeschäden, die bei diesen beiden Baustoffgruppen auftritt, wird bei Beton eher selten beobachtet.

Allerdings gibt es bei Beton, Mauer- und Putzmörtel eine einfachere Methode, deren Frostbeständigkeit zu erhöhen. Dies wird in Form von Luftporenbildnern erreicht, die dem frischen Beton oder Mörtel beim Mischen als Zusatzmittel beigegeben werden. Luftporenbildner erzeugen im Frischbeton oder -mörtel zahlreiche kugelige Luftporen im Größenbereich zwischen 0,01 und 0,5 mm (Bild 9.12). Dadurch wird bei der Eisbildung genügend Ausweichporenraum geschaffen, um Schäden aufgrund des Mikroislinseneffekts zu begrenzen [9.18]. Neben der Anzahl der Luftporen spielt deren Abstand eine entscheidende Rolle für die Frostbeständigkeit

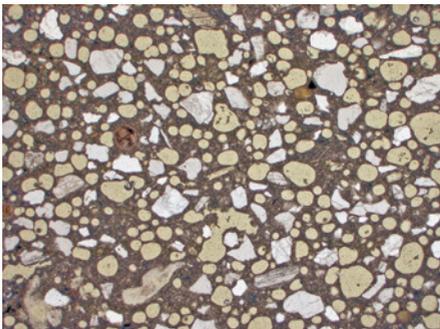


Bild 9.12 Mörtel mit Luftporen. Diese wurden mit einem Luftporenbildner erzeugt.

9.3.2 Salzangriff

Mechanismus

Salze sind in Wasser leichtlösliche Komponenten, die aus Anionen und Kationen bestehen. Das vielleicht bekannteste Salz ist Kochsalz, Natriumchlorid (NaCl), mit Natrium als Kation und Chlorid als Anion. Salze treten auf Baustoffoberflächen dann auf, wenn ein Feuchtetransport stattfindet. Im Allgemeinen muss die Porosität des Baustoffs einen Feuchtetransport zur Oberfläche erlauben. Dies ist z. B. häufig bei Mauerziegeln, porösen Natursteinen (Bild 9.13) oder Putzen bzw. Fugenmörteln der Fall [9.23].



Bild 9.13 Salzausblühungen an einem Natursteinmauerwerk eines Brückenbogens (links). Salzschäden im Sockelbereich einer Sandsteinfassade (rechts). In beiden Fällen wurden die Ausblühungen durch Tausalz verursacht.

Salze können entweder aus dem Baustoff selbst stammen oder über einen Feuchte-transport von außen zugeführt werden. Zementgebundene Baustoffe haben immer gewisse Kationengehalte (K^+ , Na^+ , Ca^{2+}), die mit von außen zugeführten Anionen (z. B. SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^-) Salze bilden können. Interne Quellen können auch das Zugabewasser für Mörtel und Beton sein, das z. B. in ariden Gebieten häufig mit Salzionen kontaminiert ist. Das gilt auch für Werksteine, die in ariden Gebieten gewonnen werden: Sie weisen häufig höhere Gehalte an Salzen auf [9.24].

Externe Salzquellen sind vielfältiger. Hier kommen in Frage [9.25]:

- › Der Baugrund – Dieser stellt besonders bei aufsteigender Feuchte eine maßgebliche Quelle dar. Selbst bei geringeren Ionengehalten kann es bei fortdauerndem Feuchteeintrag z. B. in ein Mauerwerk zu erheblichen Anreicherungen an Salzen kommen.
- › Grundwasser – Ist das Grundwasser salzhaltig, können Salze durch den Baugrund in ein Gebäude eingetragen werden.
- › Atmosphäre – Salzhaltige Aerosole kommen besonders häufig im Küstenbereich vor. Diese können in Form von Sprühnebel kilometerweit ins Inland getragen werden. Weiterhin können Luftschadstoffe (z. B. SO_2 , NH_3 , etc.) Anionen und Kationen in den Baustoff eintragen und entsprechend zur externen Salzbildung beitragen.
- › Streusalz stellt eine nicht zu unterschätzende Quelle der Salzbildung in Gebäuden dar. Häufig wird tausalzhaltiges Spritzwasser auf die unteren Gebäudebereiche gespritzt und z. B. bei Sichtmauerwerk direkt in eine Wand eingetragen (Bild 9.13).
- › Alkalische Reparaturmaterialien, die zur Behebung von Gebäudeschäden angewendet wurden (z. B. Portlandzement-Produkte, Wasserglas).

An Gebäuden können eine Vielzahl von Salzen auftreten (Tabelle 9.1). Die häufigsten Salze sind Sulfate und Nitrate [9.23] [9.26]. Chloride können im Bereich der Anwendung von Tausalzen oder im Küstenbereich ebenfalls sehr häufig auftreten.

Sulfate			Carbonate		
Gips	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	schwach löslich	Calcit/ Aragonit	CaCO_3	fast unlöslich
Thenardit	Na_2SO_4	löslich	Thermo- natrit	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	löslich
Mirabilit	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	löslich	Natrit	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	löslich
Syngenit	$\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	löslich	Trona	$\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	löslich
Hexahydrat	$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	löslich	Nitrate		
Chloride			Nitronatrit	NaNO_3	löslich
Halit	NaCl	löslich	Nitrokalit	KNO_3	löslich
Sylvit	KCl	löslich			

Tabelle 9.1 Beispiele von Salzen, die an Gebäuden beobachtet wurden [9.23].

Salze, die in Baustoffen auskristallisieren, können einen Druck auf deren Porengefüge ausüben [9.4]. Die Mechanismen, die sich bei der Salzkristallisation in Poren abspielen, sind kompliziert. Eine entscheidende Rolle spielen die Ionenkonzentrationen in der Porenlösung des Baustoffs und dessen Feuchtesättigungsgrad. Salze kristallisieren, wenn deren Sättigungsgrenze in der Porenlösung überschritten wird, d. h. wenn sich die Ionen in der Porenlösung so lange anreichern (z. B. durch Erniedrigung der Feuchtesättigung infolge von Verdunstung) bis eine bestimmte Sättigungskonzentration überschritten wird. Das Löslichkeitsprodukt eines Salzes gibt an, wie viel eines Salzes gelöst werden kann und wird durch folgende Gleichung ausgedrückt (hier am Beispiel für NaCl verdeutlicht) [9.28]:

$$(1) \quad K_0 = [\text{Na}^+] \cdot [\text{Cl}^-]$$

mit $[\text{Na}^+]$ und $[\text{Cl}^-]$ = Konzentrationen von Na^+ und Cl^- ,
sowie K_0 = Löslichkeitsprodukt von NaCl.

Wird das Löslichkeitsprodukt überschritten, tritt eine Übersättigung ein. Die Übersättigung an Ionen in einer Porenlösung ist u. a. abhängig vom Porenradius. In einem porösen Stoff kristallisieren deshalb Salze unterschiedlich, abhängig vom Porenradius. Je kleiner der Porenradius ist, desto höher kann, energetisch bedingt, die Sättigungskonzentration sein, d. h. in größeren Poren kommt es schneller zur Kristallisation von Salzen als in kleineren (analog zur Eisbildung). Allerdings erhöht sich der Kristallisationsdruck mit kleiner werdenden Poren, d. h. hier trägt die Kristallisation von Salzen zu größeren Schäden bei als in größeren Poren [9.27].

In einem porösen Baustoff kommt es nicht zur Salzkristallisation, wenn die Übersättigung der Ionen nicht eintritt (Bild 9.14). Erst wenn es z. B. durch Verdunstung zu einer Anreicherung der Salzkonzentration und schließlich zu deren Übersättigung kommt, findet eine Kristallisation statt. Anfangs werden Kristalle erst

in den größeren Poren gebildet. Bei weiterer Konzentrationsanreicherung findet auch eine Übersättigung in kleineren Poren statt und es kommt auch da zur Ausfällung von Salzen und zu entsprechenden Schäden (Bild 9.14) [9.27].

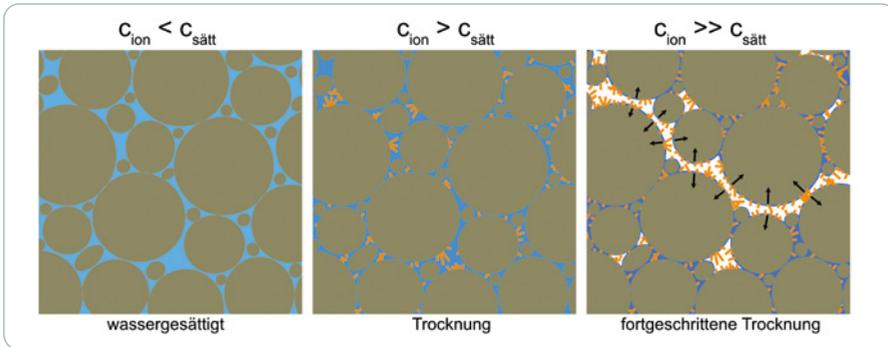


Bild 9.14 Bedingungen für die Kristallisation von Salzen in Baustoffen. Die Ionenkonzentration in der Porenlösung ist unterhalb der Sättigung (links). Das Verdunsten von Wasser führt zur Ionenanreicherung; wenn die Sättigungskonzentration überschritten ist, kristallisieren Salze (Mitte). Bei weiterer Verringerung der Feuchte durch Verdunstung kristallisieren auch in den kleinen Poren die Salze aus. Die Folge: Der Kristallisationsdruck übersteigt die Zugfestigkeit des Materials, was zur Rissbildung führt (rechts).

Schäden durch Salze treten oft an Baustoffoberflächen auf. Das hat einfache Gründe. An oder knapp unterhalb der Oberfläche befindet sich häufig die Verdunstungsfront, wo es durch Übersättigung zur Kristallisation kommt. Zum anderen ist in diesem Bereich die Zugfestigkeit des Materials geringer. Wo eine Kristallisation stattfindet, hängt von der Übersättigung ab, die normalerweise an die Verdunstungsfront gekoppelt ist. Ist die Verdunstungsfront auf der Baustoffoberfläche, werden Ausblühungen gebildet. Ist sie im Baustoff, kristallisieren die Salze in den Poren des Baustoffs aus und können unterhalb der Oberfläche wesentlich mehr Schaden anrichten, da hier die Zugfestigkeit des Baustoffs wesentlich geringer sind als im Rest des Materials.

Feuchtespeicherung

Neben Schäden durch Kristallisation im Baustoffgefüge, können Salze auch auf andere Weise schädigen. Leichtlösliche Salze besitzen die Eigenschaft, Luftfeuchte zu binden, d. h. sie sind hygroskopisch. Z. B. lässt sich beobachten, dass Kochsalz in einem Salzstreuer mit der Zeit verklumpt. Dies geschieht wegen der Feuchteaufnahme aus der Raumluft. Salze nehmen aber nicht beliebig Feuchte aus ihrer Umgebungsluft auf, sondern tun dies nur ab einer bestimmten Luftfeuchte. Die Luftfeuchte, bei der Salze hygroskopisch sind, wird als Deliqueszenzfeuchte bezeichnet [9.28]. Natriumchlorid (Kochsalz) hat eine Deliqueszenzfeuchte von

75 % bei 20 °C. Dies bedeutet, dass bei Zimmertemperatur NaCl ab einer Raumfeuchte von 75 % Feuchte so lange aufnimmt, bis es sich in eine gesättigte Salzlösung umgewandelt hat.

Befinden sich Salze im Baustoff, kann dieser deshalb Feuchte aus der Luft aufnehmen [9.29]. Bild 9.15 zeigt die Mauer der Altstadt von Kairo. Deutlich ist entlang der gesamten Mauer in ca. 3 m Höhe ein dunkler Horizont zu erkennen, bei dem es sich nicht direkt um aufsteigende Grundfeuchte handelt, sondern um Salze, die Feuchte aus der Luft aufnehmen. Die Salze werden letztendlich durch aufsteigende Grundfeuchte ins Mauerwerk eingetragen; besonders im Winter, wenn gelegentliche Niederschläge den Grundwasserspiegel erhöhen. Ab dann binden die Salze aber Feuchte permanent im Mauerwerk, unabhängig vom Grundwasserspiegel. Durch unterschiedliche Verdunstungsraten kommt es durchaus zum kapillaren Wassertransport in den Poren des Baustoffs, was unter Umständen zu Folgeschäden durch Salzkristallisation führen kann.

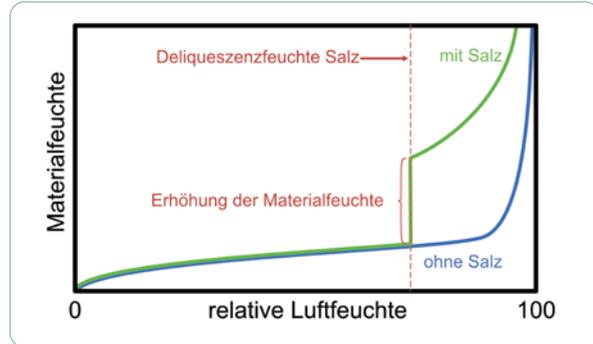


Bild 9.15 Feuchtestand in einer Mauer der Altstadt von Kairo (linke Bildseite). Die dunklen Bereiche sind salzgesättigt und nehmen aus der Umgebungsluft große Mengen an Feuchtigkeit auf.

Dieser Effekt lässt sich mit den gezeigten Sorptionsisothermen aus Bild 9.6 verdeutlichen. Bild 9.16 zeigt eine Adsorptionsisotherme eines beliebigen, porösen Baustoffs (blaue Kurve) [9.29]. Die grüne Kurve gibt die Feuchteadsorption desselben Baustoffs mit Salz in den Poren wieder. Die Kurven mit und ohne Salz sind deckungsgleich bis die Deliquescenzfeuchte erreicht wird. Von da an erhöht sich sprunghaft die Materialfeuchte, da ab diesem Punkt das Salz in den Poren solange Feuchte aufnimmt, bis es sich in der Porenlösung aufgelöst hat. Dieser Prozess

wird ausgenutzt, um Luft zu entfeuchten. Salze mit niedriger Deliqueszenzfeuchte werden in Geräten verwendet, die verhältnismäßig kleine Raumvolumen trocknen können. Der Vorteil ist, dass diese ohne Strom auskommen, die Salze müssen jedoch regelmäßig gewechselt werden.

Bild 9.16 Adsorptionsisotherme eines Baustoffs ohne und mit Salz in den Poren (schematisch nach [9.29]).



Salze sind jedoch nicht nur Feuchtespeicher, sondern können auch Wärme speichern. Die Kristallisation von Salzen ist exotherm, d. h. es wird Wärme freigesetzt. Salze werden deshalb gezielt als Latentwärmespeicher angewendet. Das einfachste Beispiel sind Taschenwärmer. Diese enthalten eine übersättigte Salzlösung, bei der eigentlich eine Kristallisation schon erfolgt sein müsste, die Salze bleiben aber in metastabiler Form gelöst. Wird jedoch ein mechanischer Impuls verursacht (z. B. durch Drücken einer dünnen Metallplatte) kommt es zur spontanen Kristallisation der Salze mit Wärmefreisetzung, die uns bei kaltem Wetter etwas Wärme einbringt. Saisonale Wärmespeicher für Häuser funktionieren ähnlich: Wärmeüberschüsse, z. B. von Solarelementen, werden zum Auflösen von Salzen angewendet (Der Sättigungspunkt ist temperaturabhängig; je höher die Temperatur, desto mehr Salze können gelöst werden). Bei Bedarf kann die gespeicherte Wärme wieder freigesetzt werden, z. B. im Winter.

Maßnahmen gegen Salzangriff

Die Maßnahmen gegen Salzangriff ähneln denen gegen Frost-/Taubelastung. Für Naturstein- und Ziegelmauerwerk ist ein entsprechender Feuchteschutz angebracht [9.30] [9.31]. Ist dies nicht möglich, kann ein Sanier- oder Opferputz aufgetragen werden, soweit es sich nicht zwingend um Sichtmauerwerk handelt [9.32] [9.33]. Ein Sanierputz ist ein Putz, dem ein Luftporenbildner zugesetzt wurde. Die Luftporen ermöglichen dem Salz genügend Ausweichraum für die Kristallisation, ohne den Putz erstmal zu schädigen. Ist ein sehr starker Feuchte-transport in einer Wand gegeben, wird die Verdunstungsfront in den Sanierputz bzw. Opferputz verlegt. Bei dauerhafter Feuchte- und Salzzufuhr kommt es letzt-

endlich zu einer Schädigung des Sanier-/Opferputzes. Er muss dann letztendlich entfernt und neu aufgebracht werden. Sanierputze sind aufgrund ihrer Mikrostruktur etwas dauerhafter als reine Opferputze oder Opferschlämme.

Sollen Wände dauerhaft vor Feuchte und Salzen geschützt werden, müssen Abdichtungsmaßnahmen ergriffen werden, soweit es sich um ablaufende oder aufsteigende Feuchte handelt. Diese bestehen aus Drainagen, vertikalen (z. B. Membranen) und im Extremfall horizontalen Abdichtungen (z. B. durch Injektionen oder Edelstahlbleche) [9.30] [9.31]. Zwar gibt es auch elektroosmotische Methoden zur Mauerwerksentfeuchtung, diese sind jedoch nicht immer erfolgreich und müssen konstant betrieben werden, womit ein gewisser Wartungsaufwand verbunden ist.

Zur Entsalzung von Mauerwerk hat sich die Kompressenentsalzung bewährt (Bild 9.17) [9.34] [9.35]. Bei dieser werden z. B. Zellulosekompressen, die mit deionisiertem Wasser getränkt werden, auf die Wandoberfläche aufgebracht. Anschließend verbleiben diese für mehrere Tage bis Wochen und müssen dann durch neue Kompressen ausgetauscht werden. Dies wird so lange wiederholt, bis der Salzgehalt der Wand kein Problem mehr darstellt. Eine Voraussetzung ist, dass vorher ein Feuchte- und Salzeintrag in die Wand unterbunden wird (z. B. durch Vertikal-/Horizontalsperren).

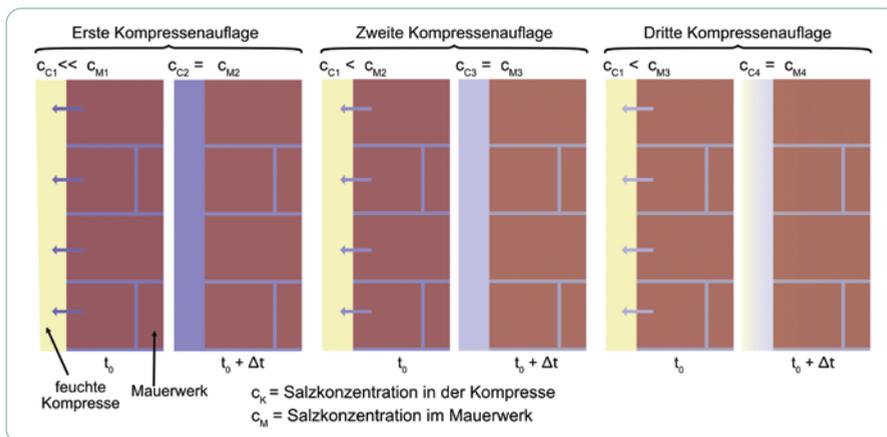


Bild 9.17 Prinzip der Kompressenentsalzung. Mit jeder neuen Auflage wird die Salzkonzentration im Mauerwerk geringer. Der Zeitpunkt t_0 ist direkt nach der Auflage der Kompressen, Δt ist die Zeitperiode nach der die Salzkonzentration im Mauerwerk derer der Komresse entspricht.

Das Prinzip der Kompressenentsalzung beruht darauf, dass die Salzionen vom belasteten Wandabschnitt in die salzfreie Komresse diffundieren. Der Diffusionsprozess kommt zum Stillstand, wenn die Salzkonzentration der Komresse gleich derer der Wand ist. Dann ist ein Austausch der Kompressen notwendig. Mit jedem

neuen Auflegen von Kompressen wird daher die Salzkonzentration der Wand verkleinert. Neben Zellulose werden als Kompressenmaterial auch Tonminerale und Zeolithe eingesetzt. Eine Beurteilung, ab welchen Salzkonzentrationen in einem Wandabschnitt Maßnahmen empfohlen werden, sind im WTA Merkblatt 3-13-01/D [9.34] aufgelistet.

9.3.3 Luftschadstoffe

Luftschadstoffe entstehen durch verschiedene technische oder natürliche Prozesse [9.36] [9.37]:

- › Verbrennung fossiler Energieträger,
 - › Kohlekraftwerke,
 - › Verbrennungsmotoren (Fahrzeuge, Schiffe),
 - › Gasturbinen (Flugzeuge, Hubschrauber),
- › Industrieprozesse (Erzaufbereitung/-verhüttung, chemische Prozesse, etc.),
- › Straßenverkehr (z. B. Bremspartikel),
- › Landwirtschaft (Massentierhaltung),
- › Deponien und Kläranlagen,
- › Wald- oder Buschbrände,
- › Vulkaneruptionen.

Luftschadstoffe können in Form von Partikeln, Aerosolen oder Gasen auftreten [9.36] (Tabelle 9.2). Aerosole sind im Küstenbereich in Form von Wassertröpfchen recht häufig. Diese können bis zu mehrere Kilometer ins Inland transportiert werden. Da die Wassertröpfchen aus dem Meer stammen, enthalten sie lösliche Salze in Form von Natrium- und Kaliumchlorid sowie Calciumsulfat. Die fossilen Energieträger verursachen Rußpartikel, SO_2 und Stickoxide. Daneben wird auch noch das Treibhausgas Kohlendioxid produziert, welches sich allerdings nur selten materialschädigend auswirkt. Die Landwirtschaft verursacht Ammoniak (Gülle) und Kohlenwasserstoffe (Verdauung von Wiederkäuern), Deponien und Kläranlagen emittieren Kohlenwasserstoffe oder PAN (Peroxyacetylnitrat). Durch Vulkanausbrüche werden mineralische Partikel und SO_2 in großen Mengen in die Atmosphäre geschleudert. Daneben sind mineralische Partikel auch Bestandteile des ganz gewöhnlichen Alltagsstaubs. Stickoxide, Ammoniak und andere Verbindungen, die Stickstoff enthalten, können außerdem auch durch Bakterien, sogenannte Nitrifikanten, auf der Baustoffoberfläche in Salpetersäure umgewandelt werden [9.40].

Partikel und Aerosole	Gase
Rußpartikel	Schwefeldioxid SO ₂
mineralische Partikel, z. B. Calcit, Quarz, Feldspat	Organostickstoffverbindungen, z. B. PAN (Peroxyacetylnitrat)
künstliche Partikel, z. B. Bremsstaub	Stickoxide NO, NO ₂ , NO ₃ , N ₂ O ₅
Wassertröpfchen mit gelösten Salzen	Ammoniak NH ₃
	Kohlenwasserstoffe C _n H _m

Tabelle 9.2 Arten von unterschiedlichen Luftschadstoffen (nach [9.36]).

Ruß- und Staubpartikel sind in der Regel für die oberflächliche Verschmutzung von Gebäuden oder Anlagen verantwortlich. Sie setzen sich auf der Baustoffoberfläche ab und verursachen eine ästhetische Beeinträchtigung. In seltenen Fällen können sie auch als Katalysatoren wirken. Dies tritt meist dann auf, wenn die Stäube Metall- oder Metalloxidpartikel enthalten (z. B. Eisenoxide) [9.41].

Wesentlich schädiger als Partikel sind Gase, insbesondere Schwefeldioxid (SO₂) und Stickoxide. Hierzu wurde bei Untersuchungen an carbonatischen Natursteinen festgestellt, dass Gemische verschiedener Gase wesentlich schädiger sind als die einzelnen Gase [9.38] [9.39]. Dies wurde an Gemischen von SO₂, NO, NO₂ und O₃ (Ozon) geprüft (wobei Ozon als Oxidationsmittel wirkt). Die Ergebnisse zeigten, dass ein Gemisch aus SO₂ + NO₂ + O₃ am schädlichsten wirkte und NO die carbonatische Gesteinsproben am wenigsten schädigte [9.38] (Bild 9.18).

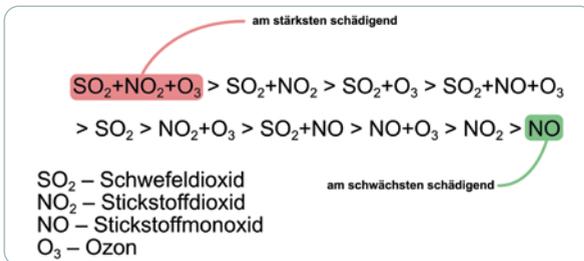


Bild 9.18 Schädigungspotential von Gemischen atmosphärischer Schadgase auf carbonatische Natursteine (nach [9.38]).

Carbonatische Gesteine, Kalkmörtel und Kalkputze sind besonders gegenüber SO₂ anfällig. Dies liegt daran, dass sich Schwefeldioxid auf carbonatischen Oberflächen in Gips umwandeln kann. Dies erfolgt nach folgendem Prozess [9.42]:

- (1) $SO_{2(Luft)} + 3H_2O \rightarrow SO_3^{2-} + 3H_3O^+$ (Bildung von Sulfid)
- (2) $SO_3^{2-} + 1/2O_2 \rightarrow SO_4^{2-}$ (Bildung von Sulfat)
- (3) $CaCO_3 + 2H_3O^+ \rightarrow Ca^{2+} + CO_2\uparrow + 3H_2O$ (Auflösung von Kalkstein)
- (4) $Ca^{2+} + SO_4^{2-} + 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (Bildung von Gips)

Gipskrustenbildungen auf carbonatischen Natursteinen waren lange Zeit ein Problem in Regionen mit hohen SO_2 -Konzentrationen in der Atmosphäre (Bild 9.19) [9.43]. In Europa ist dies jedoch mit der stufenweisen Einführung von Luftreinigungsgesetzgebungen auf nationaler und europäischer Ebene zwischenzeitlich ein geringeres Problem.

Bild 9.19 Gipskruste (dunkelgrau) auf dem Kalksteinmauerwerk (hellgrau) einer Kirche, die im städtischem Milieu Schwefeldioxidemissionen ausgesetzt war (Ste-Catherine, Brüssel).



9.4 Hygrothermische Schädigung – Wölbung von Marmorplatten

Manche Marmore sind empfindlich gegenüber Temperatur- und Feuchteschwankungen. Diese Empfindlichkeit zeigt sich in Form von Wölbungen an Platten [9.44]. Bild 9.20 zeigt eine Grabplatte aus Marmor, die sich schon so stark gewölbt hatte, dass sie gesichert werden musste. Die Grabplatte war nicht direkter Feuchte ausgesetzt, sondern war in einem Kreuzgang der Westminsterkirche in London angebracht, wo sie Temperatur- und Luftfeuchteschwankungen ausgesetzt war. Bild 9.21 zeigt ein anderes prominentes Beispiel. Es handelt sich hier um die Finlandia Hall des Architekten Alvar Aalto in Helsinki. Die ursprünglich ebenen Marmorplatten hatten sich durch Temperatur- und Feuchtwechsel schon nach weniger als zehn Jahren konkav gewölbt und erzeugten ein Muster an der Fassade, das dem einer Korbflechterarbeit ähnelte. Inzwischen wurden die Platten jedoch alle ausgetauscht.

Wölbungen können auch an anderen Natursteinplatten auftreten, sind aber am Marmor am häufigsten beobachtet worden. Bei sehr starker Durchwölbung kann es zur Rissbildung und zum Reißen der Platten kommen. Durch die Wölbung können die Verankerungspunkte der Platten zusätzlich sehr starken Querlasten ausgesetzt werden, die zum Ankerausbruch führen können.

Der Grund für die Wölbung ist, dass sich Marmor bei einer Temperaturerhöhung etwas dehnt. Die Dehnung wird durch Feuchtezufuhr (Wasser oder erhöhte Luftfeuchte) noch verstärkt. Bei Temperaturerniedrigung und Feuchteverringern

schwindet der Marmor jedoch nicht auf die ursprüngliche Dimension, sondern ein Restdehnungsbetrag bleibt erhalten [9.45]. Finden sehr viele Temperatur- und Feuchtewechsel statt, erhöht sich der Restdehnungsbetrag erheblich. Die Ursache dafür liegt im Gefüge mancher Marmore. Eine Temperaturerhöhung führt zum Dehnen der Calcitkristalle im Marmor. Die einzelnen Kristalle dehnen sich nicht nur, sondern können auch etwas um eine Achse rotieren. Eine Feuchtezufuhr erzeugt eine Dehnung zwischen den Kristallen; deren Abstand wird durch Feuchte erhöht. Bei Temperaturerniedrigung schwinden die Kristalle wieder, können jedoch nicht ihre ursprüngliche Lage erreichen, da sie sozusagen etwas verkantet sind, was den oben erwähnten Restdehnungsbetrag erzeugt [9.45].



Bild 9.20 Marmorplatten, die durch Temperatur- und Feuchtewechsel gewölbt sind; hier eine Marmorgrabplatte der Westminster Kirche in London.

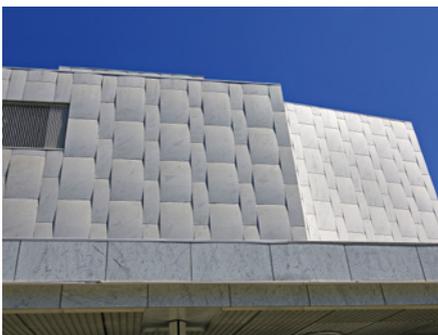


Bild 9.21 Die Finlandia Hall in Helsinki, Finnland. Die Fassadenplatten bestehen aus Marmor. Das Muster, das einer Flechtarbeit ähnelt, ist durch die Wölbung der Platten in Folge von Temperatur- und Feuchtewechsel entstanden (Foto: © Björn Schouenborg, Borås, Schweden)

Findet eine einseitige Temperaturerhöhung statt, z. B. durch Sonneneinstrahlung, und wird die Platte durch die Verankerung am Dehnen behindert, kann es zur Wölbung der Platte kommen. Je nach Art der Dehnungsbehinderung (Lage und Typ der Verankerung), sowie der Dicke der Platte kann es zu konkaven oder konvexen Wölbungen kommen [9.46].

Die Wölbung von Marmorplatten tritt nicht sehr häufig auf. Erscheint das Phänomen jedoch an Fassaden, hilft in den meisten Fällen nur ein Rückbau. Das Wölbungsvermögen von Marmorplatten kann jedoch geprüft werden. Im Rahmen des Projekts **Team**, das von der Europäischen Union gefördert wurde, konnten die Ursachen der Wölbung von Marmor aufgeklärt und eine Prüfmethode entwickelt werden [9.46]. Muss deshalb eine Fassade ausgetauscht werden, gibt die Prüfmethode eine gute Einschätzung, welcher Marmor zur Wölbung neigt und welcher nicht.

9.5 Schädigungsprozesse in Beton

Bewehrter Beton ist ein besonderes Material. Es ist ein Komposit aus Gesteinskörnungen verschiedener Größe, einem Bewehrungsmaterial und einer Matrix bestehend aus Hydratationsprodukten von Zement und gegebenenfalls mineralischen Füllstoffen. Die Matrix hat eine Nanostruktur und ändert sich mit dem Alter des Betons: Zementklinkerkörner und reaktive Zusatzstoffe, die noch vorhanden sind, können noch über Jahrzehnte weiter reagieren (s. Kapitel 3.4.2) und so die Betoneigenschaften langfristig noch etwas verändern.

Beton zeigt im erhärteten Zustand ein geringeres Volumen als im frischen. Das bedeutet, das Beton beim Schwinden zur Rissbildung neigt. Dies ist unvermeidbar und an sich noch kein Schadensmerkmal, so lange die Rissbreiten unter einem tolerierbaren Maß bleiben (normalerweise unter 0,1 mm). Beton erzeugt beim Erhärten auch Wärme. Die Wärmeentwicklung kann, je nach Bauteilvolumen, 30° bis 40 °C über der Umgebungstemperatur liegen. Beim Abkühlen der Bauteile kann es zu Volumenspannungen kommen, die ebenfalls zu Rissbildungen führen können. In beiden Fällen kann die Rissbreite durch die Betonbewehrung oder entsprechende Maßnahmen (z. B. Kühlen des erhärtenden Betons) verringert werden. Treten jedoch größere Rissbreiten auf, wenn z. B. die Bewehrungsmenge falsch bemessen wurde oder die Temperaturunterschiede zu hoch sind, kann Wasser und im Wasser gelöste Schadstoffe in den Beton und dessen Bewehrung in kurzer Zeit vordringen und entsprechende Schäden auslösen.

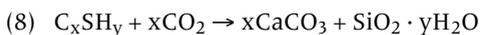
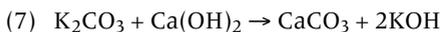
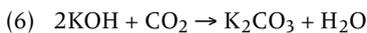
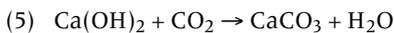
Beton zeigt eigene Formen von Schäden, die im Wesentlichen nur bei zementgebundenen Baustoffen auftreten (außer Frostschäden). Schadensmechanismen durch Frostangriff wurden schon im vorhergehenden Kapitel besprochen. Die dort aufgeführten Mechanismen gelten auch für Beton. Die bei weitem wichtigste Schädigung von Beton ist jedoch die Bewehrungskorrosion.

9.5.1 Bewehrungskorrosion infolge von Carbonatisierung und Chloridtransport

Stahlbewehrung ist die häufigste Art, die mechanischen Eigenschaften des Betons zu verbessern. Durch die Bewehrung wird insbesondere der Widerstand bezüglich Zug- und Biegezugbeanspruchung erhöht. Die Stahlbewehrung ist im alkalischen Milieu des Betons passiviert, d. h. der Stahl wird durch das Zementbindemittel vor dem Rosten geschützt. Die Passivierung kann durch verschiedene Prozesse aufgehoben werden. Einer dieser Prozesse ist die Carbonatisierung.

Carbonatisierung

Die hohe Alkalinität im Bindemittel des Betons wird durch einen Überschuss an OH^- -Ionen erzeugt, die durch die Bildung von Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) und Alkalihydroxiden (NaOH , KOH) entstehen. In Kontakt mit Luft und dem darin enthaltenen Kohlendioxid (CO_2) können diese Hydroxide carbonatisieren:



Die Reaktionen (5) bis (9) zeigen, dass so gut wie alle Hydratationsprodukte, die sich im Zementstein befinden, sich in Carbonate umwandeln können. Bei der Carbonatisierung des Zementsteins wird der pH-Wert von ca. 13,5 auf unter pH 10 gesenkt [9.47]. Dies hat zur Folge, dass die Stahlbewehrung depassiviert wird, wenn der den Stahl umgebenden Beton carbonatisiert. Die Carbonatisierung erfolgt von der Betonoberfläche zum Innern. Wird ein Stück Beton (z. B. ein Bohrkern) mittig auseinandergebrochen, kann die Carbonatisierungstiefe mittels einer Indikatorlösung sichtbar gemacht werden. Bild 9.22 zeigt ein Beispiel. Die obere Kante des Bohrkerns war die ursprüngliche Betonoberfläche und man erkennt, dass die Carbonatisierung bereits ca. 35 mm ins Innere des Betons fortgeschritten war (farbloser Bereich). Die noch alkalischen Bereiche sind durch die Indikatorlösung rot gefärbt. Als Indikator wurde bzw. wird Phenolphthalein verwendet, das jedoch wegen einer vermuteten karzinogener Wirkung nach und nach durch Thymolblau oder andere Indikatoren ersetzt wird.

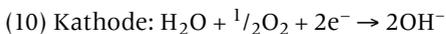
Bild 9.22 Betonbohrkern, besprüht mit Indikatorlösung. Die farblosen Bereiche am oberen Bildrand sind carbonatisiert.



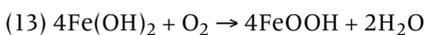
Wie schnell ein Beton carbonatisiert, hängt von dessen Qualität ab. Betone mit hohen W/Z-Werten (schlechtere Qualität, höhere Permeabilität) carbonatisieren schneller als welche mit niedrigeren Werten (bessere Qualität, geringere Permeabilität). Natürlich muss zur Carbonatisierung eines Betons eine CO₂-Quelle vorhanden sein. Ist der Beton in Kontakt mit der Atmosphäre, kann CO₂ aus der Luft von außen eindringen und die Hydratphasen in Carbonate umwandeln. Aber auch Wasser, das gesättigt mit Hydrogencarbonat (HCO₃⁻) ist, kann einen Beton carbonatisieren. Dagegen sind Betonbauteile, die im Boden lagern (z. B. Fundamente) oder im Wasser stehen, von der Carbonatisierung geschützt.

Erreicht die carbonatisierte Zone die Bewehrung, kann es zur Korrosion des Stahls kommen [9.47]. Je nach Umgebungsbedingungen werden in der DIN EN 206 Expositionsklassen festgelegt, die die Wahrscheinlichkeit einer Carbonatisierung widerspiegeln [4.3]. Entsprechend gelten bei einer hohen Expositionsklasse höhere Anforderungen an die Betonqualität und die Dicke der Betonüberdeckung, welche die Bewehrung schützt.

Der eigentliche Prozess der Depassivierung durch Carbonatisierung ist in Bild 9.23 wiedergegeben [9.47]. Dringt Sauerstoff infolge der Carbonatisierung an den Stahl, kann es lokal zu einer Anodenbildung kommen, welche Eisen (Fe) in zweiwertige Eisenionen (Fe²⁺) umwandelt. Gleichzeitig bilden überschüssige Elektronen (e⁻) mit dem eindringenden Sauerstoff und Wasser Hydroxidionen (OH⁻), die sich mit den Eisenionen zu Eisenhydroxid verbinden.



Durch weitere Sauerstoffaufnahme wandelt sich das Eisen(II)hydroxid in dreiwertiges Eisen(III)hydroxid um.



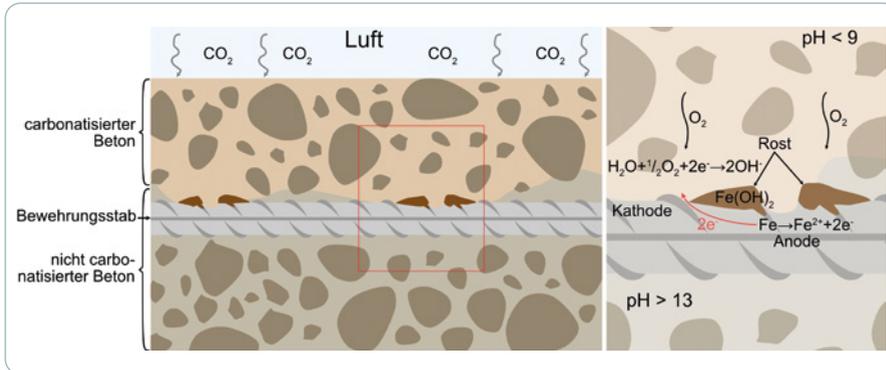


Bild 9.23 Bewehrungskorrosion durch Carbonatisierung.

Bei dem Eisen(III)hydroxid handelt es sich um eine der Phasen, die im Rost enthalten sind. Da Eisenhydroxide ein größeres Volumen als metallisches Eisen haben, kommt es im Bereich der Rostbildungen zu Spannungen, die zu Rissen oder Abplatzungen führen.

Bild 9.24 zeigt einen Schaden von Bewehrungskorrosion infolge von Carbonatisierung an einer Stütze eines Tragrahmens aus Beton. Die Risse in der Betonüberdeckung folgten grob den vertikalen Stahlstäben des Bewehrungskorbs. Entlang der horizontalen Bewehrungsbügel hatte sich so viel Rost gebildet, dass es teilweise auf die Oberfläche der Stütze transportiert wurde. Das Gebäude in diesem Beispiel stammt aus den 1930er-Jahren und es ist anzunehmen, dass die Betonüberdeckung unzureichend war und die Qualität des Betons nicht mehr heutigen Ansprüchen genügen würde. Eine Sanierung dieser schlanken Stütze würde in diesem Fall zu deren Rückbau und Ersatz mit einer neuen Stütze führen, da vermutlich die Korrosion der Stahlbewehrung zu weit fortgeschritten war, um eine Instandsetzung dieses Bauteils zu rechtfertigen.



Bild 9.24 Bewehrungskorrosion an einem Tragrahmen aus Beton.

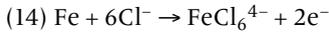
Chloridtransport

Chloridionen können die Passivierungsschicht des Stahls ebenfalls zerstören [9.48]. Chloride bzw. Chloridionen kommen in Tausalzen in Form von NaCl und KCl vor. Kritisch sind Bereiche, die im Winter von Spritzwasser betroffen sind (z. B. Hauswände, die nahe von mit Tausalzen gestreuten Straßen liegen oder Brückenbauwerke). Neben Spritzwasser reichert sich tausalzhaltiger Schnee in den Radkästen von Fahrzeugen an. Fahren diese Fahrzeuge in eine Tiefgarage oder ein Parkhaus, kann der Schnee aus den Radkästen schmelzen und als chloridhaltiges Tauwasser auf den Betonboden tropfen. Bei ungeschützten Betonoberflächen kann es deshalb bei Böden von überdachten Parkflächen (Parkhäuser, Tiefgaragen) zu erheblichen Schäden durch chloridinduzierter Bewehrungskorrosion kommen [9.49] [9.50].

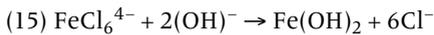
Weitere Quellen für Chloride ist gechlortes Wasser in Schwimmbädern oder Wasseraufbereitungsanlagen. Zwar handelt es sich hier um gasförmiges Chlor, das dem Wasser beigemischt wird, es löst sich jedoch ein Teil als Chloridionen. Im Innenbereich besteht ebenfalls die Gefahr eines Eindringens von Chloriden in ungeschützten Beton bei der Verwendung chlorhaltiger Reiniger. Aber auch Meerwasser hat einen hohen Gehalt an Chloridionen und Betonkonstruktionen, die Meerwasser ausgesetzt sind, zeigen ein erhöhtes Risiko einer chloridinduzierten Bewehrungskorrosion [9.49]. Allerdings sind Betonbauteile, die dauerhaft in Wasser getaucht sind, normalerweise vor Korrosion geschützt, da der zur Korrosion benötigte Sauerstoff unter Wasser nur unzureichend vorhanden ist. Meerwasserexponierte Bauteile zeigen deshalb im Bereich der Wasserlinie die häufigsten Korrosionsschäden, da hier Chloride und Sauerstoff in den Beton eindringen können.

Wie bei der Carbonatisierung ist das Eindringen von Chloriden im Beton abhängig von dessen Qualität. Der W/B- bzw. W/Z-Wert und die Art des Bindemittels bestimmt die Diffusionsgeschwindigkeit von Chloridionen. Niedrigere W/B- bzw. W/Z-Werte (bessere Qualität) verringern die Diffusionsgeschwindigkeit und Anteile von Hüttensand, Flugasche oder Mikrosilika verringern die Porenradien, was ebenfalls zu einer Verringerung der Diffusionsgeschwindigkeit führt. Außerdem können einige der Hydratphasen im Zementstein Chloridionen chemisch binden. Das chemische Bindevormögen wird insbesondere durch aluminiumhaltige Zusatzstoffe wie Flugasche oder Hüttensand erhöht [9.51]. Zemente dürfen entsprechend DIN EN 197-1 einen Chloridgehalt von 0,3 Masse-% nicht übersteigen [3.25]. Bei welchem Chloridgehalt eine Bewehrungskorrosion beginnt, hängt von unterschiedlichen Faktoren (z. B. chemische Bindung) ab und ist noch immer Gegenstand von Debatten [9.52].

Die Ursachen der chloridinduzierten Bewehrungskorrosion sind elektrochemische Reaktionen, wie bei denjenigen durch Carbonatisierung (Bild 9.25). An der Anode kommt es zur Depassivierung des Bewehrungsstahls [9.48]:



An der Kathode bildet sich aus Wasser und Sauerstoff Hydroxidionen, analog zur Gleichung (10). Die leichtlöslichen Eisenchloride wandeln sich mit Hydroxidionen in Eisenhydroxid um.



Bei fortschreitender Oxidation können sich aus Eisen(II)hydroxiden nach Gleichung (13) Eisen(III)hydroxide bilden, welche als Rost ausgefällt werden. Wenn die Korrosion initiiert ist, kommt es bei fortschreitender Bildung von Korrosionsprodukten (Rost) zu Rissen im Beton und letztendlich zu Abplatzungen der Betonüberdeckung (Bild 9.26).

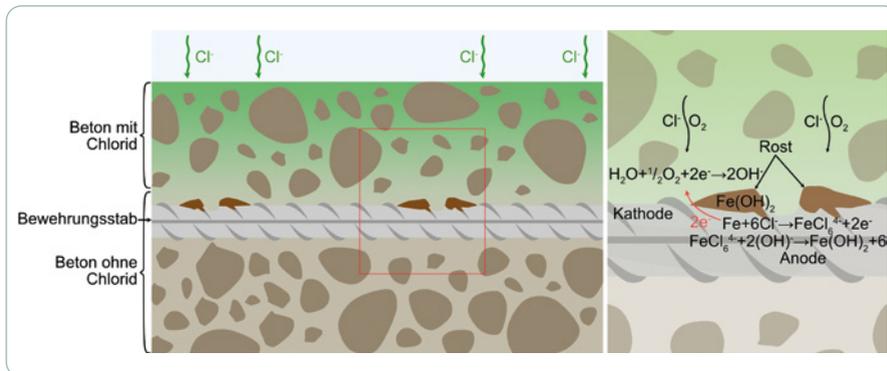


Bild 9.25 Chloridinduzierte Bewehrungskorrosion.



Bild 9.26 Chloridinduzierte Bewehrungskorrosion in einem Beton einer Anlage am Meer. (Foto: © Katarina Malaga, Mölndal, Schweden)

Bewehrungskorrosion verursacht gewaltige Kosten bei der Unterhaltung von Infrastrukturkonstruktionen aller Art, aber auch bei Gewerbe- und Wohngebäuden, insbesondere, wenn diese chloridinduzierter Bewehrungskorrosion ausgesetzt sind. Die Sanierung und Instandsetzung von geschädigten Bereichen ist sehr aufwändig und in vielen Fällen muss die Betonüberdeckung bis unterhalb der ersten Bewehrungslage komplett abgearbeitet werden [9.53] [9.54]. Meist wird die Bewehrung entrostet, mit einem Polymer beschichtet und anschließend ein polymermodifizierter Reparaturbeton aufgebracht. Bei starker Korrosion muss die Bewehrung in manchen Fällen komplett ausgetauscht werden [9.54].

9.5.2 Alkali-Kieselsäurereaktion (AKR)

Die Alkali-Kieselsäurereaktion (AKR) ist eine Reaktion, bei der ein Teil der Gesteinskörnung im Beton mit Alkalien im Bindemittel chemisch reagiert. Dieser Mechanismus tritt relativ selten auf, verursacht bei einer fortschreitenden Schädigung jedoch hohe Kosten für die Instandsetzung. Das Reaktionsprodukt ist wasserhaltig und hat ein sehr großes Volumen. Letzteres ändert sich außerdem mit den Umgebungsbedingungen: Sind diese trocken, ist das Volumen geringer, sind sie feucht, schwillt das Reaktionsprodukte deutlich an [9.55]. Die Folgen sind Rissbildungen, die in der gesamte Dicke eines Betonbauteils entstehen und massive konstruktive Schäden verursachen können (Bild 9.27).

Bild 9.27 Alkali-Kieselsäure Reaktion in einer Betonstütze eines Gebäudes (links) und in einem Brückens Pfeiler (rechts). Deutlich sind ausgeprägte Rissbildungen zu erkennen.



Gesteinskörnungen, die zusammen mit Alkalien und Wasser ein quellfähiges Reaktionsprodukt bilden können, werden als alkaliempfindlich bezeichnet [9.56]. Nur wenige Gesteinsarten sind alkaliempfindlich und können bei hohem pH-Wert reagieren. Darunter befinden sich:

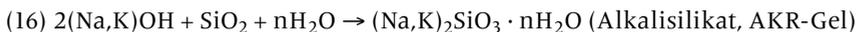
- › Opalsandsteine,
- › poröse Flinte,
- › Kieselkalk,
- › manche Grauwacken oder Sandsteine,
- › manche Granite oder Rhyolite,
- › Schiefer, oder andere Gesteine, die bei hohem pH-Wert lösliches Siliziumdioxid bereitstellen.

Damit eine AKR auftritt, müssen drei Voraussetzungen erfüllt sein [9.55]:

- › Es muss eine reaktive Gesteinskörnung mit ausreichend löslichem SiO_2 vorhanden sein.
- › Ein Betonbauteil muss einer hohen Umgebungsfeuchte mit ggf. häufigen Feuchte-/Trockenwechsel ausgesetzt sein.
- › Es müssen ausreichend Alkalien im Zementstein vorhanden sein; diese können interne oder externe Quellen besitzen:
 - › hoher interner Alkaligehalt im Zement,
 - › externer Alkalieintrag durch z. B. Streusalz oder Meerwasser.

Wenn alle diese Voraussetzungen erfüllt sind, kommt es mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einer Alkali-Kieselsäurereaktion im Beton. Durch das Vermeiden einer der Voraussetzungen kann eine AKR vermieden werden.

Die eigentlichen Reaktionen spielen sich im feuchten Milieu im alkalischen Bereich des Zementsteins ab. Siliziumdioxid von Gesteinskörnungen, das sich bei hohem pH-Wert auflöst, kann nach der folgenden vereinfachten Reaktionsgleichung mit den Alkalien, die im Zementstein gelöst sind, reagieren (Bild 9.28):



Da das wasserhaltige Alkalisilikat manchmal farblos ist und eine gelartige Beschaffenheit hat, wird es oftmals als AKR-Gel bezeichnet. Das AKR-Gel ist ein Reaktionsprodukt (16), das sich lokal entweder rund um alkaliempfindliche Gesteinskörnungen oder entlang von vorhandenen Mikrorissen in diesen bilden kann. Das Bild 9.28 illustriert Reaktion (16), abhängig von der Art der reaktiven Gesteinskörnung und dem Ort, an dem sich das AKR-Gel bildet. Wird eine bestimmte Menge an Gel geformt, kann durch deren Volumenzunahme die Zugfestigkeit der Gesteinskörnungen und des Zementsteins überschritten werden und es kann zur Rissbildung kommen. Ein typisches Schadensbild, das durch AKR verursacht wird, sind deshalb Risse, die nicht nur durch die Zementsteinmatrix verlaufen, sondern auch durch Gesteinskörnungen (Bild 9.28).

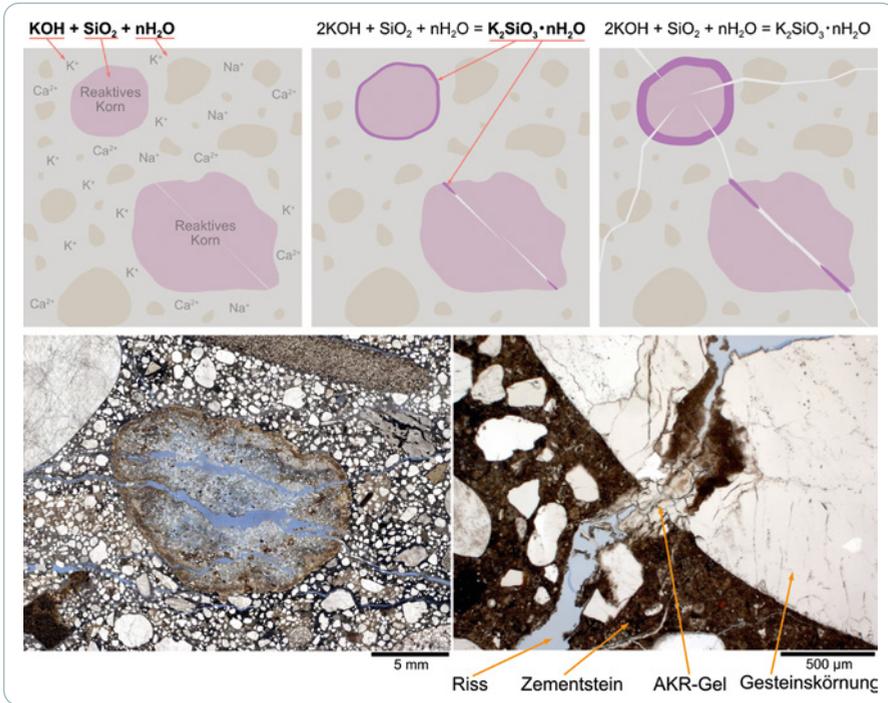


Bild 9.28 Mechanismus der Bildung von AKR-Reaktionsprodukten (AKR-Gel; obere Reihe). Mikrogefüge von geschädigten Betonen: Ein Opalsandstein, bei dem sich AKR-Gel überwiegend an den Korngrenzen gebildet hat (links unten) und ein reaktiver Granit, bei dem AKR-Gel in schon vorhandenen Rissen entstanden ist (rechts unten). Beide Bilder wurden an Dünnschliffen mit einem Polarisationsmikroskop aufgenommen.

Wichtig ist, dass die Schädigung mit der Größe der Gesteinskörnung zunimmt [9.57]. Deshalb ist eigentlich nur Beton von einer Schädigung durch eine Alkali-Kieselsäurereaktion betroffen. Zwar können in Mörtel mit Portlandzement Gesteinskörner auch AKR aufweisen, dort sind aber die von einer AKR verursachten Volumenänderungen bei Körnern unter 2 mm geringer und verursachen nur in den wenigsten Fällen dauerhafte Schädigungen.

Die Quelle der Alkalien, die eine AKR verursacht, bestimmt die Zusammensetzung des AKR-Gels. Wird die AKR durch einen hohen Alkaliengehalt im Zement verursacht, bildet sich überwiegend $K_2SiO_3 \times nH_2O$. Stammen die Alkalien dagegen von Tausalzen, Meerwasser oder alkalienhaltigen Puzzolanen, bildet sich überwiegend $Na_2SiO_3 \times nH_2O$ [9.58].

Bauwerke, bei denen eine AKR im Beton auftreten kann, sind Betonfahrbahnen (externe Taumittel), Brückenbauwerke, Dämme, Schleusen und andere Wasserbauwerke, exponierte Außenbauteile von Gebäuden und Tiefgaragen oder Parkhäuser. Letztere sind besonders taumittelbelastetem Schnee ausgesetzt, der in den Rad-

kästen von Fahrzeugen in die Tiefgarage oder das Parkhaus verbracht wird, dort als alkalibelastetes Tauwasser auf die Betondecke tropft und bei ungeschütztem Beton mit alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen eine AKR verursachen kann. Bei neuen Betonen kann eine AKR durch die geeignete Auswahl der Gesteinskörnungen vermieden werden. Dazu werden Prüfungen durchgeführt, welche eine Bestimmung der Reaktionsfähigkeit von Gesteinen erlauben. Die Prüfungen, Prüfkriterien und Regeln zur Produktüberwachung sind in der Alkali-Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) festgeschrieben [9.56]. Weiterhin kann ein Zement verwendet werden, der einen niedrigen Alkaligehalt in Verbindung mit einem niedrigen W/B-Wert im Beton hat, um das Eindringen von externen Alkalien zu erschweren.

Bei vorhandenen Bauwerken sind Instandsetzungsmaßnahmen schwierig, da im Fall von Alkalizufuhr aus dem Zement Bauteile meist im gesamten Querschnitt betroffen sind. Das bedeutet, dass Risse durch Injektionen geschlossen werden müssen (z. B. Dämme, Wasserbauwerke), der Expansionsdruck durch das AKR-Gel durch Anschneiden von Bauteilen abgebaut werden muss (z. B. Dämme), umfangreiche Feuchteschutzmaßnahmen getroffen werden oder ganze Bauteile rückgebaut und erneuert werden müssen [9.59]. Eine AKR tritt oftmals nicht unmittelbar auf, sondern es kann mehrere Jahre dauern, bis erste Schäden sichtbar werden. Bei einer AKR, die durch einen zu hohen Alkaligehalt im Zement verursacht wurde, können im Innern eines Bauteils Schäden in Form von Rissbildungen vorhanden sein, ohne dass diese auf der Bauteiloberfläche bereits sichtbar sind. Dies liegt daran, dass im Oberflächenbereich des Betons Alkalien bis zu einer Tiefe von 20 bis 40 mm durch Niederschläge oder direktem Kontakt mit Wasser ausgewaschen werden können und in diesem Bereich der Alkaligehalt zu niedrig ist, um eine AKR auszulösen.

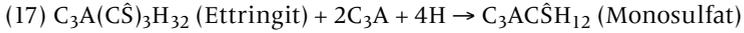
9.5.3 Sulfatangriff

Externer Sulfatangriff

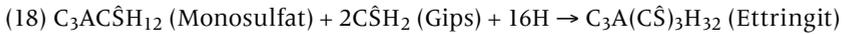
Der Angriff durch Sulfationen ist ein sehr spezifischer Schädigungsmechanismus, der nur in Baustoffen mit Portlandzement als Bindemittel (Beton, Zementmörtel) vorkommt. Dies kommt daher, dass nur im Portlandzement Hydratphasen auftreten, die zu einer Schädigung durch einen Sulfatangriff führen. Der Sulfatangriff in zementgebundenen Baustoffen ist daher nicht mit einem Salzangriff infolge von Sulfatsalzen zu verwechseln.

Der Mechanismus des Sulfatangriffs beruht auf der Umwandlung von Monosulfat in Ettringit. Wie in Kapitel 3.4.2 beschrieben, wird bei der Hydratation von Portlandzement in einem sehr frühen Stadium Ettringit gebildet. Ettringit erzeugt zuerst die plastischen Eigenschaften des Frischbetons (-mörtels), um dann bei

fortschreitender Hydratation das Erstarren einzuleiten. Beim weiteren Erhärten wird Ettringit durch die weitere Hydratation von Calciumaluminat (C_3A) in Monosulfat umgewandelt:



Gleichzeitig wird durch die vermehrte Bildung von C-S-H-Phasen der Porenraum im Bindemittel verringert, was sich in einer Erhöhung von dessen Festigkeit zeigt. Beim Sulfatangriff wird aus dem Monosulfat wieder Ettringit [9.60]. Dies wird durch Sulfationen erzeugt, die von außen in den Beton eindringen (z. B. lösliche Sulfate aus Böden, Meerwasser oder sulfatkontaminiertes Süßwasser) [9.61]. Dies kann nach der folgenden Reaktion erfolgen:



Monosulfat tritt im Zementstein sehr fein verteilt auf. Trifft Sulfat auf dieses feinverteilte Monosulfat, wandelt es sich in Ettringit um, was eine Volumenzunahme auf das 2,3-fache bedeutet [9.62]. Die Volumenzunahme erzeugt im Zementstein Spannungen, die dessen Zugfestigkeit übersteigen können, was zu Rissbildungen führt (Bild 9.29). Zwar könnte angenommen werden, dass bei Beginn der Hydratation doch ursprünglich Ettringit vorhanden war, doch hat sich die Porosität des Zementsteins mit der Zeit so stark verringert, dass die Rückbildung von Monosulfat nach Ettringit unweigerlich starke Spannungen im Zementstein erzeugt.

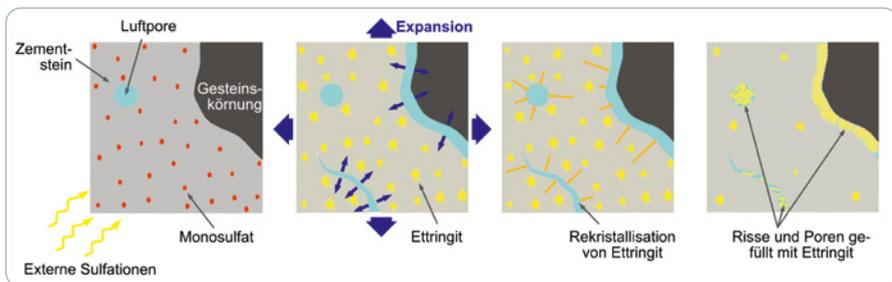


Bild 9.29 Sulfatangriff von Beton. Aus Monosulfat bildet sich bei externem Sulfateintrag Ettringit. Da Monosulfat sehr fein und zahlreich im Zementstein verteilt ist, kommt es bei der Umwandlung zu einer erheblichen Volumenexpansion, welche eine Rissbildung im Zementstein verursacht. Im Laufe der Zeit rekrystallisiert Ettringit in Form von größeren Kristallen in Rissen und Luftporen (nach [9.62]).

Die Rissbildungen verlaufen im Zementstein und um Gesteinskörnungen (Bild 9.30) und selten durch Gesteinskörnungen (im Gegensatz zur AKR). Die eigentliche Umwandlung von Monosulfat nach Ettringit findet im Zementstein statt. Bei weiterer Sulfatzufuhr und ausreichender Feuchte findet eine Rekrystallisation von Ettringit aus dem Zementstein in den Rissen und Poren statt (Bild 9.29 und Bild 9.30).

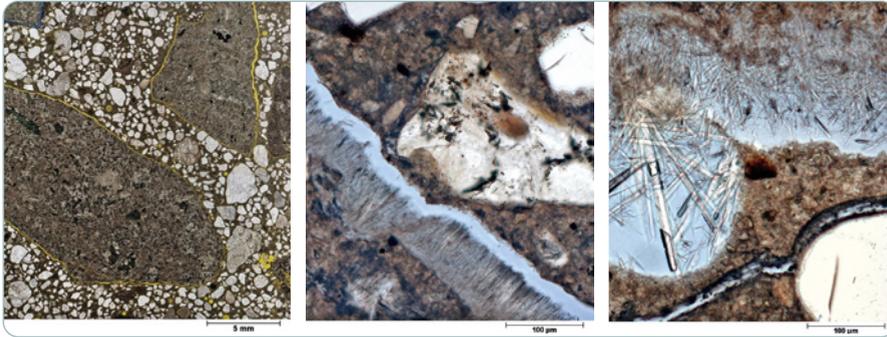


Bild 9.30 Bei Sulfatangriff im Beton entstehen Risse typischerweise zwischen dem Zementstein und Gesteinskörnungen (links; Mikroskopbild eines Dünnschliffs, Porenraum gelb eingefärbt). Spätere Rekrystallisation von Ettringit führt dazu, dass Risse und Luftporen häufig mit Ettringit gefüllt werden (mittleres und linkes Bild; Porenraum hier blau eingefärbt).

Verzögerte Ettringitbildung infolge einer Erwärmung des Betons

Zement ist sulfathaltig, d. h. dem Material wird beim Mahlen der Klinkerkörner Gips oder Anhydrit zugemischt, um die Erstarrung zu regeln. Schon in den ersten Sekunden der Hydratation bildet sich Ettringit, welches eine schnelle Erstarrung des Zements verhindert und einen Beton erst für mehrere Stunden verarbeitbar macht. In den ersten 24 Stunden liegt Sulfat fast ausschließlich in Form von Ettringit vor.

Wird der Beton in diesem frühen Stadium erwärmt, z. B. auf 70 °C, wandelt sich ein Teil des Ettringits schnell in Monosulfat um und der verbleibende Teil löst sich im Porenwasser des Betons auf [9.62]. Doch wieso sollte sich ein Beton erwärmen? Dafür gibt es zwei Gründe:

- › Der sich erhärtende Beton erzeugt eine hohe Hydrationswärme durch ungenügende Kühlung und einen hohen Zementgehalt.
- › Der Beton wird einer Wärmebehandlung unterzogen, um eine schnellere Erhärtung zu erreichen.

Letzterer Punkt wurde und wird immer noch in der Betonfertigteilindustrie angewendet, um schneller eine hohe Anfangsfestigkeit zu erreichen. Früher wurden Wärmebehandlungen bis zu 80 °C durchgeführt. Bei dieser Temperatur erreicht der junge Beton sehr schnell eine hohe Festigkeit, was z. B. bei verspannten Bauteilen wichtig sein kann.

Nach der Abkühlung des Betons und noch Jahre später, wenn Bauteile schon in Nutzung sind, kann bei ausreichendem Feuchteangebot das bei höherer Temperatur gebildete Monosulfat durch Aufnahme des im Porenwasser gelösten Sulfats

zu Ettringit umwandeln [9.62]. Die Volumenzunahme durch die Ettringitbildung erzeugt im erhärteten Beton Spannungen, die zu Rissbildungen im Zementstein führen können. Dabei verursacht der in Bild 9.29 illustrierte Mechanismus ohne die externe Sulfatzufuhr ähnliche Schäden wie bei externem Sulfatangriff (Bild 9.30).

Die verzögerte Ettringitbildung wurde erst in den 1980er-Jahren auf die Wärmebehandlung von Beton zurückgeführt. In dieser Zeit wurde schnell reagiert und die maximale Wärmebehandlungstemperatur von Beton im Fertigteilwerk auf 60 °C begrenzt [9.63]. Diese Maximaltemperatur wurde als unbedenklich für die verzögerte Ettringitbildung eingestuft.

10 KONSERVIERUNG UND SCHUTZMASSNAHMEN

Konservierungs- und Schutzmaßnahmen werden durchgeführt, um einen gegebenen Zustand eines Bauwerks behutsam zu bewahren oder zu verbessern [10.1]. Bei der Konservierung stehen neben funktionellen Aspekten schwerpunktmäßig die Erhaltung des Bauwerkscharakters, der Bausubstanz und der Bauweise im Vordergrund. Bei der Instandsetzung spielen oftmals die Funktion und die Nutzung eines Bauwerks eine größere Rolle als seine Geschichte und Bauweise. In der Praxis ergeben sich in der Regel Kompromisse zwischen Instandsetzung, Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen [10.2].



Bild 10.1 Schutzüberdachung von archäologischen Bauwerksresten (links) sowie temporäre Wintereinhausung eines Brunnens (Mitte) und einer Skulptureneinhausung (rechts).

Konservierungs- und Restaurierungseingriffe sind oftmals auf Oberflächenbehandlung und Schutzmaßnahmen konzentriert, um die originale Bausubstanz so weit wie möglich zu erhalten [10.3]. Schutzmaßnahmen schließen auch Schutzüberdachungen und temporäre Einhausungen ein (Bild 10.1). Instandsetzungen von Bauwerken können mit massiven, konstruktiven Eingriffen einhergehen,

um zum einen die Konstruktion als solche zu erhalten oder nutzungsbedingt erhöhte Nutzungslasten zu ermöglichen. Oberflächenschutz ist bei Instandsetzungen insbesondere von Betonkonstruktionen oftmals die letzte Stufe einer Reihe unterschiedlicher Maßnahmen. In diesem Kapitel werden Maßnahmen zur Konservierung und zum Schutz von mineralischen Oberflächen in der Denkmalpflege besprochen. Einige dieser Verfahren werden heute nicht mehr verwendet, weil sie sich als unwirksam oder sogar schädlich herausgestellt haben oder weil inzwischen neue, wirksamere Methoden zur Verfügung stehen. Maßnahmen zur konstruktiven oder thermischen Instandsetzung von Bauwerken sind Gegenstand weiterer Bände dieser Buchreihe und werden hier nicht behandelt.

Betrachtet werden die Festigung von porösen Materialien, Oberflächenschutz durch hydrophobe Imprägnierungen (Hydrophobierung) und Maßnahmen zum Schutz vor Graffiti. Alle diese Maßnahmen haben Vor- und Nachteile, die von Fall zu Fall abgewogen werden müssen. Eine für jeden Anwendungsfall geeignete Methode zum Oberflächenschutz existiert nicht. Jeder falsche Konservierungsversuch kann an einer Oberfläche oder einem Bauteil mehr Schaden anrichten, als ursprünglich vorhanden war. Sollen Materialien und Oberflächen authentisch erhalten werden, müssen die Konservierungsmethoden deshalb bestens geplant und genau auf die vorhandenen Baustoffe und deren Zustand abgestimmt werden.

10.1 Festigung

10.1.1 Konzept

Bauteile sind unterschiedlichen Umgebungsbedingungen ausgesetzt, die gerade bei porösen mineralischen Baustoffen wie Naturstein, Ziegel, Lehm oder Mörtel zu Materialschäden führen können. Schadensmechanismen manifestieren sich meist in Form von Gefügestörungen und führen häufig zu einem Verlust der Oberflächenfestigkeit (z. B. infolge der Kristallisation von Salzen unterhalb der Oberfläche von Mauersteinen), der letztendlich zu einem Materialverlust beiträgt.

Bei der Festigung wird eine Substanz in das Porensystem eines geschädigten Materials eingebracht und dadurch ein Festigkeitsverlust ausgeglichen [10.3] [10.4]. Das Festigungsmittel, bei dem es sich meist um eine Suspension oder Dispersion handelt, wird entweder durch kapillares Saugen oder mittels eines moderaten Drucks in die Poren transportiert. Die Dispersion/Suspension polymerisiert oder verfestigt sich in den Poren des Baustoffs zu einem neuen Bindemittel, das dem geschädigten Gefüge einen Teil der ursprünglichen Festigkeit zurückgibt [10.3].

Der Erfolg der Maßnahme hängt davon ab, ob der Festiger von der geschädigten Oberfläche bis hinab in die ungeschädigten Bereiche des Steins eindringen kann

(Bild 10.2). Dies setzt voraus, dass die Oberfläche das Eindringen des Festigers erlaubt. Sie darf also weder verschmutzt noch verkrustet sein. Ist dies nicht der Fall, muss vorher eine Reinigung erfolgen. Welches Reinigungsverfahren dafür geeignet ist (z. B. Heißdampf, Strahlverfahren, Laser), richtet sich nach der Art der Verschmutzung oder Kruste und dem Untergrund. Wird eine Festigung trotz einer verschmutzten Steinoberfläche durchgeführt, besteht die Gefahr, dass sich das Festigungsmittel nur auf der Oberfläche und etwas darunter anreichert und dadurch eine sehr feste, krustenartige Oberfläche erzeugt wird (Bild 10.2). Bei hygrothermischer Beanspruchung des Steins kann es mit der Zeit zur Ablösung dieser Kruste führen. Auch die Salz- und Feuchtebelastung des Untergrunds beeinflusst die Wirksamkeit einer Festigung. Poren, die mit Salzen oder Wasser gefüllt sind, können die festigende Chemikalie kapillar schlecht transportieren. Bei einem versalzten Mauerwerk müssen daher vor einer Festigung zunächst Maßnahmen zur Verringerung des Salzgehalts und anschließend eine Trocknung erfolgen.

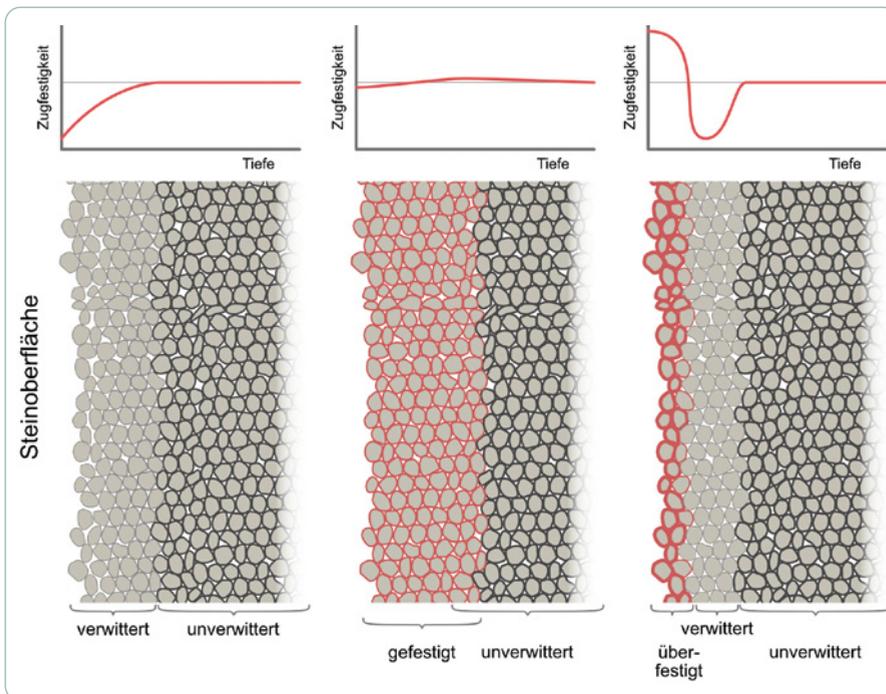


Bild 10.2 Konzept der Festigung: Material mit oberflächlicher Verwitterung (linkes Bild), gefestigtes Material (Mitte). Eine Überfestigung der Oberfläche (rechtes Bild) schadet dem Material und ist deshalb zu vermeiden.

10.1.2 Kalk- und Barytwasser

Kalkwasser wurde gelegentlich zur Festigung von Putzen und Kalksteinen erprobt und auch eingesetzt [10.5]. Das Prinzip beruht auf einer gewissen Löslichkeit von Calciumhydroxid in Wasser (ca. 1,7 g/l bei 20 °C). Wird ein Kalkputz mit Kalkwasser behandelt, scheidet sich beim Verdunsten des Wassers entlang der Porenwände Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ab. Durch Aufnahme von Kohlensäure (CO_2) aus der Luft bildet sich Calcit (CaCO_3):



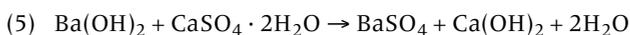
Der neugebildete Calcit wirkt als zusätzliches Bindemittel in der Matrix des Putzes bzw. Kalksteins. Der Nachteil ist, dass aufgrund der moderaten Löslichkeit nur sehr wenig Calciumhydroxid mit einem Behandlungsschritt in den Poren abgeschieden werden kann. Die Behandlung muss also wiederholt durchgeführt werden [10.4]. Außerdem werden mit dieser Festigungsmethode selbst bei porösen Materialien nur wenige Millimeter Eindringtiefe erreicht. Dabei besteht die Gefahr, dass die behandelte Materialoberfläche überfestigt wird, wenn die Calciumhydroxidlösung nicht ausreichend in den Porenraum eindringen kann.

Laborversuche haben ergeben, dass reine Kalkmörtel mit geringer Festigkeit erfolgreich mit Kalkwasser gefestigt werden können. Jedoch tritt eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften erst nach mehr als 160 Behandlungszyklen auf [10.6]. Da zwischen den Behandlungen eine Trocknung erfolgen sollte, verursacht diese Methode in meisten Fällen einen zu hohen Zeit- und damit Kostenaufwand.

Bariumhydroxid in wässriger Lösung (Barytwasser) ist eine weitere Substanz, die zur Festigung von Putzen und Naturstein angewendet wurde. Das Prinzip ist das gleiche wie bei der Behandlung mit Kalkwasser. Bariumhydroxid, das als Lösung in den Porenraum des Putzes eingebracht wird, wandelt sich durch Kohlendioxidaufnahme in Bariumcarbonat um [10.7]:



Kalkputze, die gipsbelastet sind, können mit einer Bariumhydroxidlösung behandelt werden [10.8]. Dabei wird Gips teilweise aufgelöst und als schwerlösliches Bariumsulfat im Porenraum des Putzes fixiert:



Calciumhydroxid kann nach dem Trocknen der Lösung nach Reaktion (2) durch CO_2 -Aufnahme als Calcit abgeschieden werden.

Der Erfolg dieser Methoden ist stark von der Porosität des Substrats und der Anzahl der Behandlungsschritte abhängig. Ist das Substrat zu dicht, kann es zu Kalk- bzw. Bariumcarbonatkrusten kommen, welche die Oberfläche vergrauen.

Um ein besseres Eindringen von Kalkhydrat in ein poröses Material zu ermöglichen, wurde Nanokalk entwickelt. Bei diesem Stoff handelt es sich um eine Dispersion von kolloidalen Calciumhydroxidpartikeln, die in Alkohol (meist Ethanol oder Iso-Propanol) gelöst sind [10.9] [10.10]. Durch die Dispergierung von Calciumhydroxid in Alkohol lassen sich wesentlich höhere Konzentrationen erreichen (25–50 g/l) als dies bei wässrigen Lösungen der Fall ist (1,5–2 g/l). Die Anwendung des Festigers bei Kalksteinen und Kalkputzen hat zu befriedigenden Eindringtiefen und einer Festigung der Oberflächzone geführt [10.9] [10.10]. Der Mechanismus ist hierbei derselbe wie bei Kalkwasser. Allerdings hat auch hier die Porosität des Substrats einen entscheidenden Einfluss auf die Eindringtiefe des kolloidalen Calciumhydroxids. Bei dichterem Substrat mit geringerem kapillarem Saugen kann sich ein Grauschleier bilden und das Festigungsmittel an der Oberfläche anreichern [10.10].

10.1.3 Wasserglas

Wasserglas wurde bereits im 19. Jh. entwickelt und seither als Bindemittel für Farben verwendet (Silikatfarben). Gelegentlich wurde das Material stark verdünnt zur Festigung verwitterter Natursteine eingesetzt [10.11]. Angewendet wurde früher Natriumwasserglas, heute sind zusätzlich Kalium- und Lithiumwasserglas auf dem Markt. Wasserglas besteht aus Alkalioxid und Siliziumdioxid und ist in wässriger Lösung flüssig. Beim Verfestigen reagiert es nach der folgenden Gleichung:



Wie aus der Gleichung ersichtlich ist, kondensiert das Alkalisilikat zu wasserhaltigem Siliziumdioxid, das die Poren im Material teilweise oder ganz ausfüllt. Bei der Reaktion entsteht aber auch Alkalicarbonat, das ein leichtlösliches Salz ist und bei möglichem Transport im Mauerwerk Schäden auslösen kann. Diese Gefahr besteht besonders bei Wasserglas, das zum Feuchteschutz in poröses Mauerwerk eingepresst wird. Es können hierbei erhebliche Mengen an Alkalicarbonat gebildet werden, die bei ungünstigen Bedingungen im Mauerwerk nach oben wandern und entsprechende Schäden durch Salzkristallisation und Feuchte-speicherung verursachen können [10.12].

Wasserglas wird im Betonschutz verwendet, zum einen als Imprägnierung, um Betonoberflächen zu festigen und gleichzeitig zu versiegeln und zum anderen in Form von Beschichtungen oder Beschichtungssystemen, ebenfalls um die Betonoberfläche zu versiegeln und damit zu schützen. Bei Imprägnierungen werden Mischungen von Kalium- und Natriumwasserglas oder Kalium- und Lithium-

wasserglas verwendet. Diese können bis zu mehreren Millimetern in den Beton eindringen und die Porosität des Betons stark vermindern. Für Beschichtungen werden meist Gemische aus Kalium- und Natriumwasserglas, die Füllstoffe enthalten können, verwendet. Aufgrund der silikatischen Zusammensetzung besitzen diese Beschichtungen einen guten Haftverbund zum Untergrund. Der Grund, warum bei Beton Wasserglasimprägnierungen weniger schädlich sind als z. B. bei Natursteinen, liegt an dessen feineren Porenstruktur und daran, dass die Porenlösung im Beton bereits Alkalien enthält.

10.1.4 Polymere

Polymere sind organische Substanzen, die natürlich vorkommen (z. B. Baumharze, Cellulose, pflanzliche Öle) oder industriell in großem Maßstab aus Rohöl oder aus pflanzlichen Stoffen synthetisiert werden (Kunststoffe). Polymere bestehen aus Makromolekülen, die sich als Ketten oder Netze periodisch wiederholen [10.13]. Im Baubereich werden Polymere in verschiedenster Form eingesetzt, z. B. in Farben, Klebern, Zusatzmitteln für Beton, Beschichtungsstoffen oder als Schäume. Die Festigung von Baustoffen wird meist mit Monomeren oder Oligomeren (d. h. einzelne oder vereinzelt Makromoleküle) durchgeführt, die entweder selbst in flüssiger Form vorliegen (z. B. Epoxidharz) oder in einem Lösungsmittel gelöst sind. Nach dem Tränken eines Materials, z. B. eines Natursteins, mit dem polymerbasierenden Festiger, vernetzt sich dieser im Porenraum des Substrats, entweder durch Verdunstung des Lösungsmittels oder durch die Wirkung eines Härter. Letztendlich liegen Polymere in fester Form vor und können, je nach Eindringtiefe in das Substrat, z. B. einen Teil der Festigkeit eines verwitterten Materials zurückgewinnen.

Schon früh wurde die Festigung mit natürlichen Polymeren, z. B. mit Leinöl oder Paraffin, an geschädigten Naturstein- oder Putzoberflächen erprobt. Nach dem Zweiten Weltkrieg wurden synthetische Polymere im alltagsgebrauch allgegenwärtig und auch zunehmend in der Denkmalpflege eingesetzt. Einen vorläufigen Höhenpunkt erreichte die Anwendung von Polymeren in den 1960er- und 1970er-Jahren.

Nachteil der synthetischen wie natürlichen Polymere sind ihre Alterungsbeständigkeit, die meist weit unter der von anorganischen Festigungsmitteln liegt. Das bedeutet, dass die gefestigten Oberflächen nach einigen Jahren möglicherweise vergilben und die zu Anfangs elastischen Polymere in den Poren verspröden können [10.13]. Bei der Anwendung von Polymeren ändern sich oftmals auch die Glanzeigenschaften der Oberflächen, wobei diese im Extremfall glänzend werden können. Bei Materialien mit sehr feinen Poren kann es außerdem zum Porenverschluss an der Oberfläche kommen, mit dem Risiko des Abschälens, wenn ein häufiger Feuchtetransport, z. B. im Mauerwerk, stattfindet [10.13].

Acrylate

Als Festiger kommen unterschiedliche Polymere zur Anwendung. Eine Gruppe, die auch heute noch eine Rolle spielen, sind Acrylharze, wie beispielsweise das in Bild 10.3 gezeigte Polymethyl-Methacrylat (PMMA), das auch als Acrylglas bekannt ist [10.11]. In der Farbindustrie werden Acrylate als Bindemittel verwendet und sind mögliche Komponenten in polymermodifizierten Reparaturmörteln für Beton und Natursteine [10.3]. PMMA wird durch die Vernetzung von Methyl-Methacrylat (MMA) gewonnen, dem Monomer und Ester der Methacrylsäure und Methylalkohol [10.3]. In der Denkmalpflege wird vor allem Paraloid B72 eingesetzt, das ein Co-Polymerisat aus Ethylmethacrylat und Methacrylat ist (Bild 10.3) [10.14], bei dem sich beide Molekülgruppen periodisch im Polymer abwechseln. Paraloid B72 findet außerdem als Klebstoff und Beschichtungsmaterial Verwendung. Das Material kommt als fester Stoff in den Handel und wird in einem Lösungsmittel, z. B. Toluol, in der gewünschten Konzentration aufgelöst.

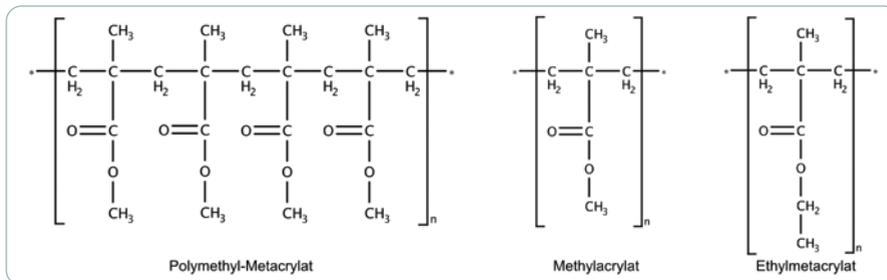


Bild 10.3 Polymethyl-Methacrylat (PMMA), das aus einzelnen Monomeren von Methyl-Methacrylat (MMA) verknüpft ist. Rechts daneben – Die Co-Polymere des Paraloids B72, die sich alternierend zu einem Acrylat verknüpfen.

PMMA wird bei der Acrylharzvolltränkung (AVT) angewendet [10.3]. Bei der AVT werden bewegliche Objekte oder demontierbare kleinere Bauteile aus Naturstein (z. B. Skulpturen) behandelt. Diese waren für gewöhnlich starken Witterungseinflüssen ausgesetzt und meist stark geschädigt. Das eigentliche Verfahren besteht darin, zuerst das Wasser aus den Poren des Objekts (z. B. eine Marmorskulptur) durch schonendes Trocknen zu verdunsten, anschließend in einer Druckkammer unter Vakuum die Luft aus den Poren des Natursteins zu entfernen um dann unter Vakuum die Kammer mit Methyl-Methacrylat zu fluten. Wenn das Objekt vollständig in MMA getaucht ist, wird ein Druck von ca. 10–15 bar aufgebracht, was dazu führt, dass das flüssige MMA in die Poren des Natursteins eindringt und diese vollkommen ausfüllt. Nach der Tränkung und dem Abscheiden des überschüssigen MMAs wird das Monomer durch Anwendung von Druck und Temperatur in der Druckkammer ausgehärtet, wobei sich das MMA zum festen PMMA

vernetzt [10.3]. Eine Modifikation des Verfahrens zielt darauf ab, den Porenraum des Natursteins nicht vollständig zu füllen, sondern diesen nur mit dem Polymer auszukleiden. Dazu wird eine Mischung von MMA mit Silanen eingesetzt.

Obwohl das ATV-Verfahren soweit verfeinert wurde, dass nahezu kein Unterschied im Erscheinungsbild eines Objekts vor und nach der Behandlung auftritt [10.3], ist es nicht unumstritten. Es handelt sich hierbei um eine irreversible Maßnahme, die in der Vergangenheit außerdem nicht immer zum gewünschten Erfolg geführt hat.

Eine Mischung von Paraloid B72 und Kieselsäureester wurde erstmals Ende der 1970er-Jahre zur Festigung von Naturstein eingesetzt. Der sogenannte »Bologna Cocktail« diente zur Festigung einer Kalksteinoberfläche, die durch Schalenbildung sehr stark an Material verloren hatte [10.4]. Die Behandlung war erfolgreich aber weitere Anwendungen des Mittels zeigten auch hier Schwierigkeiten bei der Eindringtiefe in das Substrat.

Epoxidharz

Epoxidharz wurde besonders in den 1960er- und 1970er-Jahren zur Natursteinkonservierung eingesetzt [10.15]. Es wird auch heute noch häufig zur Reparatur von (historischen) Betonkonstruktionen in Form von Injektionen oder Schutzbeschichtungen verwendet. Epoxidharz ist auch eine der am meisten verwendeten Polymere zur Herstellung von glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK).

Das im Baubereich am häufigsten verwendete Epoxidharz basiert auf Bisphenol A und wird durch die Kondensation von Bisphenol A mit Epichlorohydrin hergestellt [10.16]. Das Reaktionsprodukt ist der Dicyclidylether von Bisphenol A. In der Praxis wird nicht das Einzelmolekül von Dicyclidylether synthetisiert, sondern Mischungen von Ketten, die mehreren Bisphenol A-Moleküle enthalten können (Bild 10.4), wobei die Anzahl n der Bisphenol A-Komponenten zwischen 0 und 20 betragen kann [10.16].

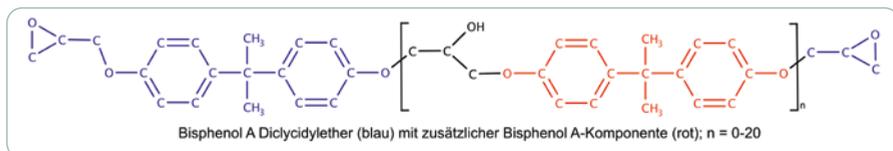


Bild 10.4 Beispiel eines Epoxidharzes auf Basis von Bisphenol A Dicyclidylether (nicht alle Wasserstoffatome gezeigt). Das Molekül stellt die unvernetzte Form des Epoxyharzes dar (vor dem Anrühren mit einem Härter).

Bisphenol A Dicyclidylether und dessen Variationen sind flüssig und farblos. Für die Vernetzung des Moleküls ist ein Härter notwendig. Die Härter bestehen meist aus mehrwertigen Aminen wie 1,3-Diaminobenzol oder das aliphatische Diet-

hylentriamin. Die Aushärtung mit Diethylentriamin findet bereits bei Raumtemperatur statt, dieses ist jedoch aufgrund seiner Flüchtigkeit gesundheitlich nicht unbedenklich. Aus diesem Grund werden heute weniger flüchtige Vormischungen mit Epoxidharz und Polyaminen als Härter eingesetzt [10.16]. Wird der Härter mit dem Epoxidharz gemischt, reagieren die Ethylenoxidringe mit den funktionellen Komponenten des Härters zu einem Polymernetzwerk.

Epoxidharz ist selbst in verdünntem Zustand sehr viskos. Die Eindringtiefe des Polymers sogar bei porösen Substraten ohne Anwendung von Druck sind deshalb begrenzt. Aus diesem Grund wird Epoxidharz heute überwiegend als Klebstoff zur Klebung oder als Verpressgut bei der Rissinjektion von Beton eingesetzt, jedoch nur noch sehr selten bei der Festigung von Naturstein. Epoxidharze kommen ebenfalls als Beschichtungssysteme auf Beton zum Einsatz, um das Eindringen von Feuchte und Kohlendioxid in den Beton zu verhindern und damit die Carbonatisierung oder eventuelle Schäden durch eingebrachte Schadstoffe zu verlangsamen.

Polyurethane

Polyurethane wurden ebenfalls zur Festigung von Naturstein und Lehmbaumaterialien erprobt [10.17] [10.18]. Polyurethan ist wie Epoxidharz ein Polymer, das verbreitet im Baubereich angewendet wird, meist in Form von Beschichtungen, Klebern, Schäumen oder Wärmedämmstoffen.

Polyurethane (PU) werden durch die Verknüpfung von Polyisocyanaten mit Polyolen (mehrwertige Alkohole) hergestellt. Bild 10.5 stellt das Produkt aus der Synthese von PU aus Di-Isocyanat und Polyol dar. Da manche der Isocyanatkomponenten stark giftig und flüchtig sind, werden stattdessen Präpolymere (reaktive Oligomere) verwendet, die weniger flüchtig und gesundheitsschädlich sind.

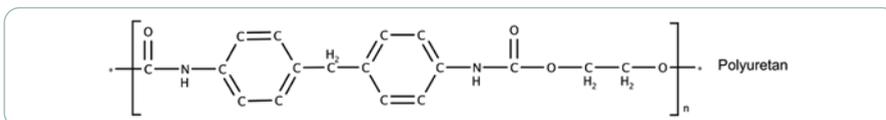


Bild 10.5 Ein Beispiel eines Polyurethanmoleküls (nicht alle Wasserstoffatome gezeigt).

In einer Studie wurde die Anwendung von Polyurethanen zur Festigung von Lehmbaumaterialien untersucht. Dazu wurden Präpolymere von aliphatischen Isocyanaten erwogen, da diese relativ günstig und in guter Qualität zu erhalten sind [10.17]. Das Ziel war es, ein feuchterhärtendes Polyurethan zu erzeugen, das im Porenraum des Lehms polymerisierte. Labor- und Feldversuche erbrachten die gewünschten Resultate eines Festigers mit hoher Eindringtiefe, guten mechanischen Eigenschaften, geringem Schwinden, in-situ Polymerisation und keiner

wesentliche Änderung der behandelten Oberfläche. Allerdings zeigte das Material auch starke Nebenwirkungen, wie Überfestigung der behandelten Bereiche oder Aufschäumen bei zu hohem Feuchtegehalt des Substrats [10.17] [10.18]. Andere Studien schlugen silikoniertes Polyurethan zur Steinfestigung vor, das neben den festigenden Eigenschaften noch hydrophobe Eigenschaften besaß [10.18].

Polyurethane werden auch als Materialien für Beschichtungssysteme zum Schutz von Betonoberflächen eingesetzt. Diese Beschichtungssysteme sind in der Regel dampfdicht und besitzen sehr hohe μ -Werte. Die Funktion der PU-Beschichtung ist, zu verhindern, dass CO_2 und Feuchte (in der auch Schadstoffe enthalten sein könnten) in den Beton eindringen. Einige der PU-Beschichtungen sind außerdem elastifiziert und besitzen rissüberbrückende Eigenschaften. Letzteres ist besonders dann wichtig, wenn z. B. durch dynamisch auftretende Lasten Risse im Beton zu erwarten sind.

10.1.5 Kieselsäureester

Silizium hat ähnliche Eigenschaften wie Kohlenstoff und bildet mit Wasserstoff Silan SiH_4 , analog zum Methan CH_4 [10.20]. Im Silan lassen sich die Wasserstoffatome durch andere Baugruppen ersetzen, z. B. mit Chlor (ClSiH_3 Chlorosilan, Cl_2SiH_2 Dichlorosilan, Cl_4Si Tetrachlorosilan, etc.), Fluor, Alkylgruppen (CH_3SiH_3 Methylsilan, $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{SiH}_3$ Ethylsilan, etc.) oder Alkoxygruppen (CH_3OSiH_3 Methoxysilan, $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OSiH}_3$ Ethoxysilan, etc.) [10.20].

Zur Festigung von Naturstein wird fast ausschließlich das Tetraethoxysilan (TEOS), $\text{Si}(\text{OCH}_2\text{CH}_3)_4$, verwendet (Bild 10.6). TEOS wird im deutschen auch als Tetraethylorthosilikat, Orthokieselsäuretetraethylester oder schlichtweg als Kieselsäureester (KSE) bezeichnet. Letzterer Name beschreibt eigentlich alle Alkoxysilane, hat sich aber speziell als Bezeichnung für TEOS eingebürgert. Ester sind eigentlich Reaktionsprodukte von organischen oder anorganischen Säuren mit Alkohol. Im Falle der Kieselsäureester ist es die Orthokieselsäure H_4SiO_4 mit einem Alkohol. Bei der Herstellung von KSE wird jedoch keine Orthokieselsäure verwendet, sondern Siliziumhalogenide, z. B. Tetrachlorosilan oder Tetrafluorosilan, das mit Alkoholen, z. B. Methanol oder Ethanol, zu Alkoxysilanen bzw. Kieselsäureestern reagiert.

TEOS wurde schon in den 1920er-Jahren in England als Steinfestiger eingesetzt, wurde dort jedoch nicht als effektiv angesehen [10.20]. Eine Wiederbelebung der Anwendung fand in den 1960er-Jahren und besonders in den darauffolgenden 1970er-Jahren statt, nachdem Wacker Chemie zwei Steinfestigungsprodukte patentieren ließ: Wacker OH und Wacker H, beide basierend auf TEOS, letztere mit Anteilen an Methyltriethoxysilan, um dem Festiger hydrophobe Eigenschaften

zu verleihen [10.20]. In den folgenden Jahren kamen zahlreiche weitere Produkte von Wacker und anderen Herstellern auf den Markt und KSE bzw. TEOS ist heute wohl einer der am meisten verwendeten Steinfestiger für silikatische Gesteine.

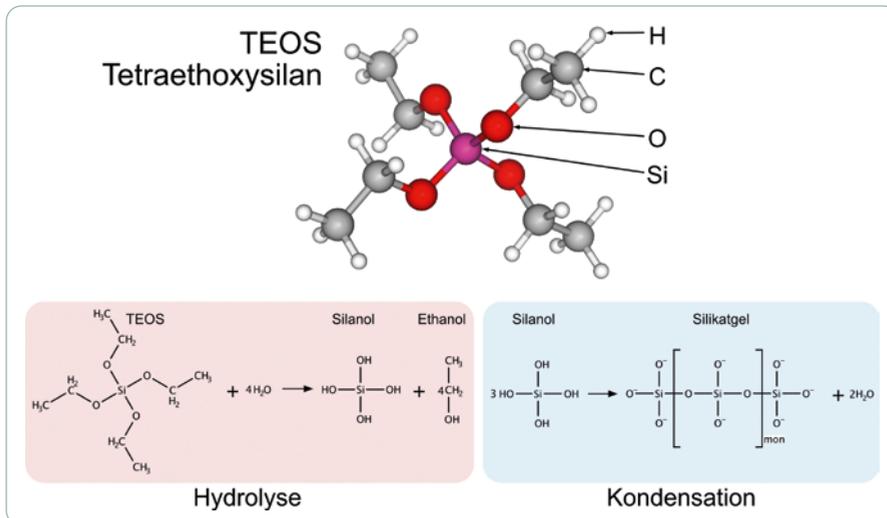


Bild 10.6 Oben – Molekül des Tetraäthylorthosilikats (Tetraäthoxysilan). Unten – Hydrolyse von TEOS und Kondensation des Silanols zu einem Silikatgel.

TEOS ist in flüssiger Form vorhanden. Es reagiert mit Wasser zu Silanol und Ethanol (Bild 10.6). Das Wasser für die Hydrolyse-reaktion zu Silanol und Ethanol kommt vom Substrat, z. B. der Ausgleichsfeuchte eines Sandsteins. Die weitere Reaktion wird als Kondensation bezeichnet (Bild 10.6): Silanolgruppen verknüpfen sich über ein dreidimensionales Netzwerk zu einem Silikatgel, das im Wesentlichen aus Siliziumdioxid und Wasser besteht [10.20]. Die Hydrolyse und Kondensation von TEOS kann nach der Behandlung eines Natursteins Wochen oder sogar Monate betragen. Um den Ablauf der Hydrolyse-reaktion etwas zu beschleunigen, werden heute oftmals Katalysatoren verwendet. Eine Katalyse der Hydrolyse kann unter sauren oder basischen Bedingungen erfolgen oder durch Zinn in Form einer zinnorganischen Verbindung, welche als Katalysator eingesetzt wird [10.3]. Die Gelbildung findet unter Abgabe von Wasser statt, weshalb dieses schwindet und in aller Regel Schrumpfrisse aufweist (Bild 10.7). Das Gel ist außerdem sehr spröde, was weniger erwünscht ist. Aus diesem Grund werden bei manchen Produkten sogenannte Weichsegmente in das dreidimensionale Kieselgelnetzwerk eingebaut. Dieses kann aus Dimethyl-Disiloxan oder aus Polyether bestehen [10.3]. Aufgrund dieser Weichsegmente kommt es zu weitaus weniger Schwindrissen und das Gel ist weniger spröde.

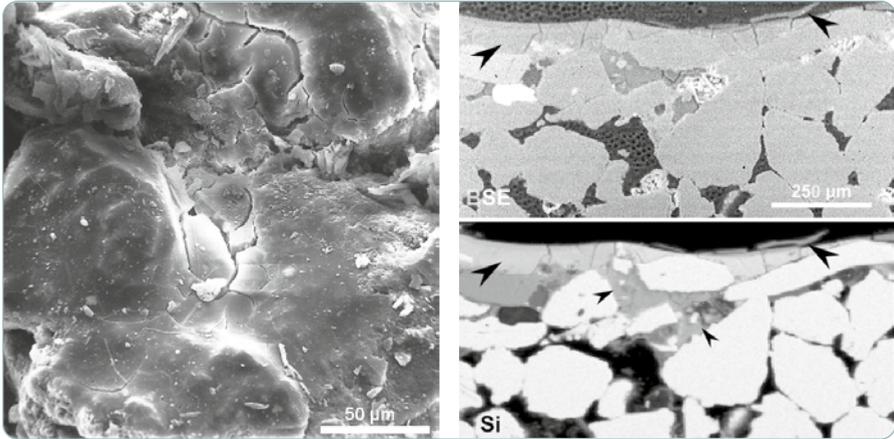


Bild 10.7 Links – Kieselgel in einem Sandstein mit Schrumpfrissen (REM-Aufnahme im Rückstreuelektronenmodus). Rechts – Anreicherungen von Kieselgel in einem stark durchfeuchteten Sandstein (Pfeile). Das obere Bild zeigt eine REM-Aufnahme im Rückstreuelektronenmodus (BSE), das untere die Elementverteilung von Silizium (Si) von derselben Probe.

Die Anwendung von KSE in verwitterten silikatischen Natursteinen erfolgt meist mit dem Flutverfahren, durch Sprühen oder gelegentlich durch mit Festiger getränkte Kompressen. Es werden normalerweise mehrere Arbeitsgänge aufgewendet. Bei der Tränkung ist der Feuchtegehalt des Natursteins zu beachten. Ist dieser zu feucht, kann es zu einer beschleunigten Hydrolyse kommen, was unter ungünstigen Umständen ein ungenügendes Eindringen des KSE und eine Überfestigung der Natursteinoberfläche zur Folge haben kann. Ein dauerfeuchtes Bauteil kann beim Trocknen KSE an die Oberfläche transportieren, wo es zur Krustenbildung kommen kann (Bild 10.7). Vor der Anwendung von KSE-Produkten muss deshalb eine Trocknung des Bauteils erfolgen. Ist das Bauteil salzbelastet, muss eine Entsalzung vorgenommen werden, da Salze Feuchte im Naturstein bindet (s. Kapitel 9).

KSE ist siliziumbasiert und eignet sich deshalb besonders gut für silikatische Gesteine, wie Sandsteine, Quarzite oder Grauwacken. Für Kalkstein oder Marmor ist KSE weniger geeignet, da ein Effekt der Festigkeitssteigerung bei verwitterten Carbonatgesteinen wesentlich geringer ausgeprägt ist als bei silikatischen Gesteinen [10.20].

Steinfestiger auf Basis von KSE/TEOS wird in unverdünnter Form oder verdünnt mit Lösungsmittel (meist Alkohol) angeboten. Durch zusätzliche Additive werden unterschiedliche Gelabscheidungsrate und Reaktionsvermögen im Porengefüge eines Substrats erreicht. Dadurch können bei wiederholter Behandlung mit KSE unterschiedlicher Gelabscheidungsrate maximale Eindringtiefen und optimierte Festigkeitsprofile erreicht werden.

10.1.6 Kieselsole

Kieselsole sind Dispersionen aus einem Dispersionsmittel und sehr kleinen Partikeln aus amorphem Siliziumdioxid (SiO_2) und sind nicht zu verwechseln mit Wasserglas. Die Größe der Partikel beträgt 15 bis 500 nm [10.21]. Die Dispersion enthält in der Regel Additive, z. B. Ammonium-Ionen (NH_4^+), um die Partikel im Dispersionsmittel zu stabilisieren und um ein frühzeitiges Koagulieren und Sedimentieren des Siliziumdioxids zu verhindern. Einige Hersteller bieten Produkte an, die spezifizierte Größenbereiche der Kieselolpartikel aufweisen. Je nach Größenbereich eignen sich die Produkte dann zur Festigung von Naturstein oder als Bindemittel für Farben, Schlämmen oder Opferputze.

Kieselsole als Steinfestiger wurden sowohl für silikatische als auch carbonatische Gesteine erprobt [10.21] [10.22] [10.23]. Frühere Studien berichteten von erfolgreichen Anwendungen in verwitterten Kalksteinen und Sandsteinen, die sogar zu einer Teilentsalzung von kontaminierten Kalksteinen führten [10.21] [10.22]. Die Studien sind jedoch nicht konklusiv bezüglich der Langzeitfolgen/-beständigkeit der Behandlung, Eindringtiefen des Festigers und der Festigkeitsänderungen über das behandelte Gesteinsprofil. Neuere Untersuchungen mit Kieselol als Festiger für poröse Kalksteine [10.24] [10.25] erbrachten Eindringtiefen unter 10 mm und einen moderaten Festigkeitsanstieg der behandelten Proben, letzteres bestimmt indirekt mittels Ultraschallmessungen. Allerdings zeigte eine der Studien einen geringeren Widerstand behandelter Proben im Salzkristallisationstest [10.24]. Kieselsole verfestigen sich beim Verdunsten des Dispersionsmittels (meist wässrig) und koagulieren zu einem dreidimensionalen porösen Netzwerk von amorphem Siliziumdioxid. Während das Kieselol in Suspension ist, sind auf der Oberfläche überwiegend Silanolgruppen (Si-OH) vorhanden. Tritt eine Gelbildung ein, z. B. durch Verdunsten, Absenkung des pH-Werts oder eines Gelbildners werden einzelne Partikel über Siloxangruppen (Si-O-Si) verbunden [10.26]. Das verfestigte Kieselol erreicht hierdurch eine gewisse Festigkeit, welches die Wasserdampfdiffusion aber noch erlaubt. Bezüglich der Eindringtiefen gelten ähnliche Beschränkungen wie bei in Alkohol dispergierten Nanokalk, das bei porösen Gesteinen recht hohe Eindringtiefen erreicht und bei dichteren Substraten Anreicherungen an deren Oberfläche verursacht.

Heute werden Kieselsole auch gerne als Bindemittel für Beschichtungen, Schlämme oder als Injektionsmaterial eingesetzt.

10.1.7 Quellminderer

Manche Natursteine haben bei Feuchteänderungen ein beträchtliches Quell- und Schwindvermögen. Die daraus resultierenden Formänderungen eines Natursteins oder -bauteils kann zwischen befeuchteten und trockenen Zonen lokal zu erheblichen Eigenspannungen führen, die bei häufigen Feuchte-Trocken-Wechsel zu Schäden meist im Oberflächenbereich des Natursteins führen. Dies tritt bei Natursteinen auf, die Minerale mit hohem Quellvermögen besitzen, wie quellfähige Tonminerale (z. B. Smektit).

Bei den betroffenen Gesteinen handelt es sich um tonreiche Sandsteine, tonhaltige Kalksteine, Tonsteine und manche Tonschiefer (niedrigmetamorph), sowie um vulkanische Tuffe, die zumeist Tonminerale enthalten. Werden solche Gesteine mit wasser- oder lösungsmittelhaltigen Festigern behandelt, kommt es in ungünstigen Fällen zu Quellverformungen der Natursteine, die eine weitere Schädigung einleiten können. Um solche quellungsbedingten Schäden zu vermeiden, wurden Quellminderer entwickelt.

Quellminderer bestehen aus organischen Kationen, die in die Zwischenschichten der quellfähigen Tonminerale eintreten, das vorhandene Kation austauschen (meist Na^+ , Ca^{2+} oder Mg^{2+}) und das organische Molekül fest einbinden, sodass ein weiteres Quellen der Tonminerale nur noch schwach möglich ist. Eine organische Komponente, die eingesetzt wird, ist Diaminbutandihydrochlorid ($\text{H}_2\text{N}(\text{CH}_2)_4\text{NH}_4 \cdot 2\text{HCl}$) [10.3]. Die Komponente wird in einer wässrigen Lösung stark verdünnt angewendet und liegt darin als ammoniumhaltiges Molekül mit Chloridionen vor. Trifft es auf ein quellfähiges Tonmineral, wird dessen hydratisiertes Kation aus den Tonzwischenschichten mit dem organischen Kation ausgetauscht. Das Molekül wird hierbei über die positiven Ladungen der Ammoniumkomponenten verankert. Eine zusätzliche Bindung mit den Tonschichten wird durch Wasserstoffbrücken der Alkyle mit den Tetraederschichten der Tonminerale erreicht.

Bild 10.8 zeigt das Molekül und Ergebnisse der Quellmessungen eines Ettringer Tuffs, ohne und mit einer Behandlung von einem Quellminderer auf Basis von Diaminbutandihydrochlorid. Bei dem Versuch wurden jeweils vier entsprechend behandelte oder nichtbehandelte Prüfkörperprismen in vier Stufen mit Wasser bis zur Einstellung eines konstanten Wassergehalts getränkt und deren Verformung mit induktiven Wegaufnehmern bestimmt. Deutlich ist die starke Verminderung der Quellung der Prüfkörper, die mit dem Quellminderer behandelt wurden zu erkennen.

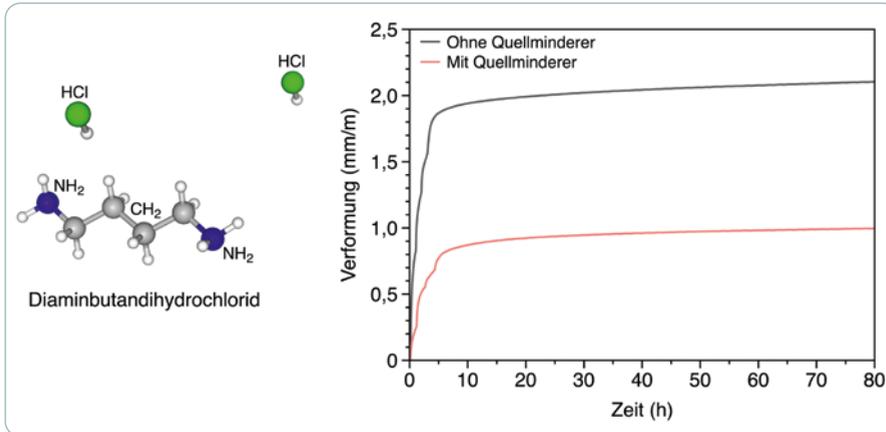


Bild 10.8 Links – Molekülstruktur des Diaminbutandihydrochlorids. Rechts – Verformungsergebnisse bei vollständiger Wassertränkung von Etringer Tuffproben, die mit oder ohne Quellminderer behandelt wurden.

Wichtig zu wissen ist, dass die Behandlung eines Natursteins mit einer Diaminbutandihydrochlorid-Lösung eine geringe Menge an Chloridionen freisetzt. Diese verbinden sich mit den aus den Tonen freigesetzten Kationen (Na^+ , Ca^{2+} oder Mg^{2+}) zu Salzen, die beim Verdunsten des Wassers unter Umständen Ausblühungen verursachen können oder bei einer Tiefenbehandlung den Feuchtegehalt des Natursteins erhöhen können. Finden sich Stahlteile, z. B. Anker, im Natursteinmauerwerk, ist darauf zu achten, dass diese nicht mit dem Quellminderer bzw. den Chloridionen in direktem Kontakt kommen.

10.2 Hydrophobierung

10.2.1 Konzept

Das Konzept der Hydrophobierung beruht darauf, die Baustoffoberfläche durch organische, hydrophobe Moleküle wasserabweisend zu machen, um diese dadurch vor direktem Feuchteeintrag zu schützen bzw. vor dem Eintrag schädlicher Stoffe, die im Wasser gelöst sein könnten. Es handelt sich bei der Hydrophobierung deshalb um eine Schutzmaßnahme. Im Gegensatz zu Farb- und Anstrichsystemen oder Putzen sollen Hydrophobierungsmittel die Oberfläche eines Substrats visuell nicht beeinträchtigen, z. B. Sichtmauerwerk oder Sichtbeton. Allerdings gibt es mittlerweile auch zahlreiche Farbsysteme oder Putze mit hydrophoben Eigenschaften, die eine etwas längere Lebensdauer und eine einfachere Reinigung, z. B. einer Hausfassade, versprechen.

Bild 10.9 gibt das Konzept der Hydrophobierung wieder: Im Idealfall sollte eine Hydrophobierung eine Wasserdampfdiffusion möglichst unbehindert erlauben. Dadurch wird dem Substrat ermöglicht, dessen Feuchte durch Wasserdampftransport der Umgebung anzupassen. Flüssiges Wasser, z. B. in Form von Regen, sollte von der Schicht allerdings abgewiesen werden.

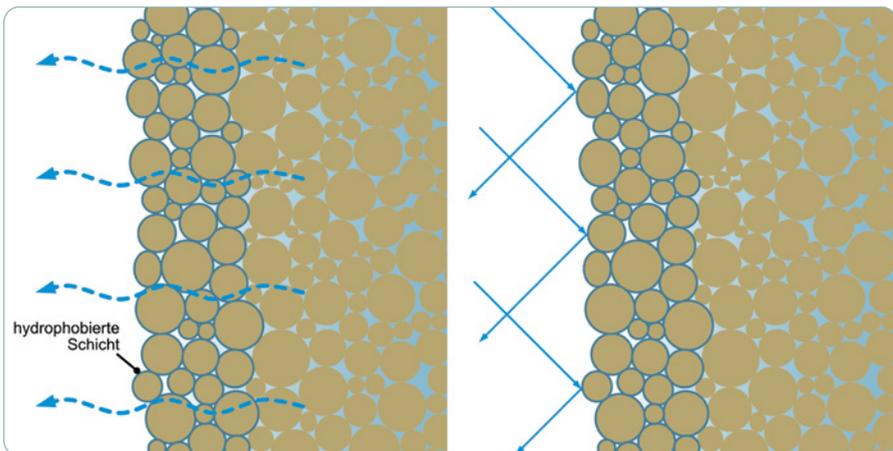


Bild 10.9 Das Prinzip einer hydrophoben Schicht: Sie sollte möglichst dampfdichten bei gleichzeitiger Wasserabweisung sein.

Das Prinzip der Wasserabweisung beruht darauf, dass Wasser auf verschiedenen Materialien eine unterschiedliche Oberflächenspannung aufbaut. Jeder hat sicher schon beobachtet, dass Regentropfen auf einem Stein relativ schnell zerfließen, wohingegen sie auf einem Pflanzenblatt noch sehr lange erhalten bleiben kön-

nen. Dies beruht darauf, dass sich Pflanzenoberflächen anders gegenüber Wasser verhalten als kristalline silikatische, carbonatische oder metallische Flächen. Auf der hydrophoben Pflanzenoberfläche besitzt Wasser eine höhere Oberflächenenergie und Oberflächenspannung als das Substrat, was zur Tropfenbildung beiträgt, wohingegen diese bei anorganischen Oberflächen geringer sind.

Die Beurteilung der Benetzung eines Materials mit Wasser erfolgt mit der Bestimmung des Kontakt- bzw. Benetzungswinkels, welcher eine quantitative Beurteilung erlaubt. Je größer der Kontaktwinkel ist, desto höher ist der wasserabweisende Effekt einer Materialoberfläche. Ist der Kontaktwinkel von Wasser unter 90° , ist ein Material hydrophil (»wasserliebend«), ist er über 90° , ist ein Material hydrophob (wasserabweisend) und bei einem Kontaktwinkel von über 150° wird von einem superhydrophoben Material gesprochen. Bild 10.10 zeigt einige Beispiele für Kontaktwinkel dieser Effekte: Auf unbehandeltem Sandstein zerfließt ein Wassertropfen, während er auf einer hydrophobierten Betonoberfläche verbleibt und beim superhydrophobem Effekt auf dem Lotusblatt abperlt. Superhydrophobe Stoffe besitzen zusätzlich zu einer hydrophoben Schicht eine mikrostrukturierte Oberfläche.

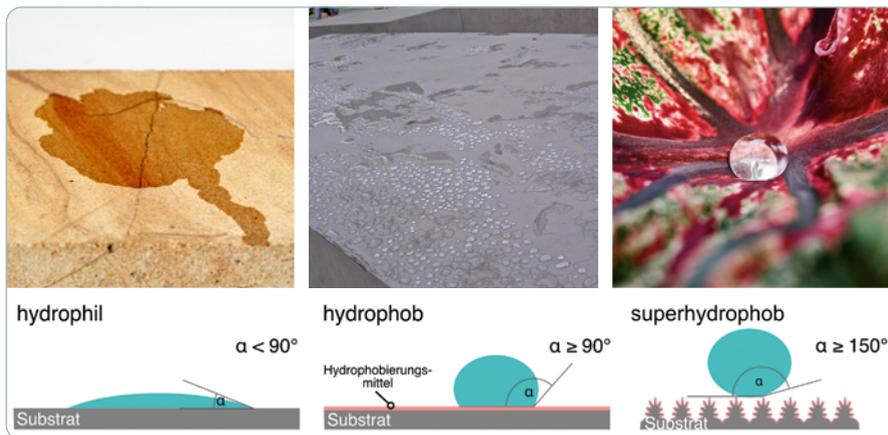


Bild 10.10 Obere Reihe – Wassertropfen auf unbehandeltem porösen Sandstein (links), auf einem hydrophobierten Beton (Mitte) und auf einem Lotusblatt mit superhydrophobem Effekt (rechts). Untere Reihe – Kontaktwinkel von Wasser bei verschiedenen Oberflächeneigenschaften.

Soll untersucht werden, ob ein Material mit einem Hydrophobierungsmittel behandelt wurde, können einfache Prüfungen vorgenommen werden. Das Besprühen z. B. eines Bohrkernquerschnitts mit Wasser zeigt schnell, ob eine Hydrophobierung vorliegt: Der hydrophobierte Bereich bleibt hell, während der unbehandelte Bereich das Wasser schneller aufnimmt und dunkel wird. Stehen nur Oberflächen zur Verfügung, können Wassertropfen mit einer Pipette auf-

gebracht werden, um zu sehen, ob der Tropfen aufgesogen wird oder aufgrund einer Hydrophobierung als solche eine Weile bestehen bleibt (Bild 10.11). Da über Jahrzehnte das Hydrophobierungsmittel direkt auf der Oberfläche abgebaut sein kann, ist eine Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme mit einem Karsten-Prüfrohr die bessere Lösung. Bei dieser Methode wird das Prüfrohr mit einer Dichtmasse auf die saugende Fläche aufgebracht, mit Wasser befüllt und die Wasseraufnahme des Substrats an der Volumenskala des Rohrs über eine bestimmte Zeit abgelesen. Hydrophobierte Flächen zeigen eine wesentlich langsamere Wasseraufnahme als nichthydrophobierte. Kontaktwinkel können relativ genau mit einem Kontaktwinkelgerät gemessen werden. Die Messdaten geben den Kontaktwinkel wieder und zeigen nicht nur, ob ein Material hydrophil oder hydrophob ist, sondern auch wie gut eine Hydrophobierung noch funktioniert, was besonders bei zurückliegenden Behandlungen wichtig sein kann.

Viele Polymere, darunter auch Öle, Fette oder Wachse, sind hydrophob. In den letzten 40 Jahren hat sich jedoch eine Gruppe von Polymeren in der Anwendung durchgesetzt: Silane und Silikonharze.



Bild 10.11 Ein Sandstein, der mit einem Hydrophobierungsmittel durch Tränkung von der linken Seite behandelt wurde. Die Kontaktwinkel der Wassertropfen nehmen von der behandelten Oberfläche zum unbehandelten rechten Bereich sichtlich ab.

10.2.2 Silane und Silikonharze

Näheres zur Definition und Herstellung von Silanen kann in Kapitel 10.1.5 oder in [10.20] nachgelesen werden, an dieser Stelle soll nur auf die Hydrophobierung mit Silanen und Silikonharzen eingegangen werden. KSE sind normalerweise von sich aus durch die Alkoxygruppen hydrophob, werden aber nach der Hydrolyse und Kondensation hydrophil. Silane, die als Hydrophobierungsmittel eingesetzt werden, haben in der Regel neben drei Alkoxygruppen (z. B. $-O-CH_2-CH_3$) noch eine Alkylgruppe (z. B. $-CH_2-CH_3$). Die Alkylgruppe bleibt während der Hydrolyse und Kondensation des Silans erhalten. Siloxane sind Oligomere der Silane, deren Siliziumatome über ein Sauerstoffatom miteinander verknüpft sind. Die Wiederholungsrate der Monomere in Siloxanen liegt zwischen zwei und zehn [10.3]. Eines

der vielleicht bekannteren Siloxane ist Polydimethylsiloxan, ein Silikonöl, das verschiedenste technische Anwendungen hat, z. B. als Gleitmittel, Chemikalie gegen Kopfläuse und Entschäumer in Lebensmitteln.

Silikonharze sind Silane, die bereits hydrolysiert und teilweise kondensiert sind. Sie werden oftmals auch als Polysiloxane bezeichnet [10.3]. Meist werden sie in einem Lösungsmittel, z. B. Toluol, gelöst angeboten und kondensieren dann vollständig, wenn dieses verdunstet. Silikonharze werden in allen technologischen Bereichen verwendet, z. B. bei Pulverbeschichtungen oder temperaturbeständigen Bestandteilen. Früher wurden Silikonharze auch in der Denkmalpflege als Imprägnierungen für Naturstein- oder Ziegelmauerwerk verwendet (z. B. in Form von Methylsilikonharz, Bild 10.12). Heute werden jedoch andere Produkte bevorzugt. Silikonharze werden im Baubereich als Bestandteil von Massenhydrophobierungsmitteln verwendet, die z. B. einem Mörtel oder Beton bei der Herstellung untergemischt werden, um das gesamte Material hydrophob zu machen und nicht nur dessen Oberfläche.

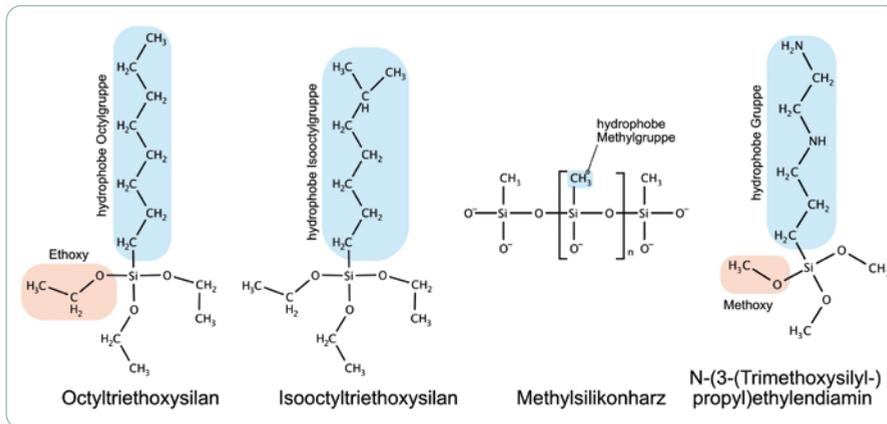


Bild 10.12 Verschiedene Hydrophobierungsmittel auf Silanbasis. Beim Methylsilikonharz können die Sauerstoffe mit weiteren Siliziumatomen verbunden sein oder mit Wasserstoff eine OH-Gruppe bilden.

Eine kleine Auswahl von Silanen, die zur Imprägnierung oder Massenhydrophobierung angewendet werden/wurden, ist in Bild 10.12 gezeigt. Neben Octyltriethoxysilan (auch in der Iso-Form) werden als Alkyle auch Isobutyl- und früher auch Methylgruppen verwendet. Letzteres wird heute jedoch aufgrund einer geringeren Alkalibeständigkeit weniger häufig eingesetzt. Das in Bild 10.12 gezeigte N-(3-(Trimethoxysilyl)propyl)ethyldiamin wird als Massenhydrophobierungsmittel für Beton angewendet. Hydrophobierungsmittel für die Denkmalpflege müssen alkalibeständig sein, da sie häufig in Kontakt mit alkalischen Baustoffen kommen, z. B. Fugenmörtel oder Steinergänzungsstoffen. Bei der Betoninstand-

setzung werden Hydrophobierungsmittel relativ häufig eingesetzt, besonders dann, wenn das Erscheinungsbild einer Oberfläche nicht gestört werden soll.

Ähnlich wie bei KSE bilden Silane durch eine Hydrolyse- und Kondensationsreaktion ein zweidimensionales Netzwerk in Form einer Silikonharzschicht in den imprägnierten Bereichen des Baustoffs (Bild 10.13) [10.27]. Da die Silikonharzschicht sehr dünn ist, füllt es die Poren nicht vollständig aus, was eine Dampfdiffusion nach der Imprägnierung noch zulässt. Silane wirken auf silikatischen Substraten am besten. Zwar lassen sich diese auch auf andere Materialien anwenden, z. B. Kalksteine und Marmor, sind dann aber unter Umständen nicht so beständig wie auf silikatischem Material.

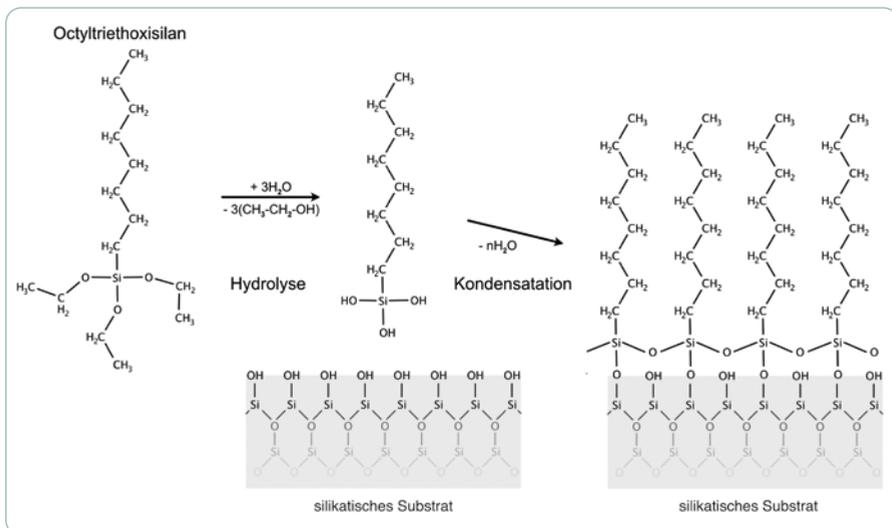


Bild 10.13 Hydrolyse- und Kondensationsreaktion eines Silans auf einer silikatischen Baustoffoberfläche. Nach der Kondensation bildet das Hydrophobierungsmittel ein Silikonharz, wobei die organischen Gruppen senkrecht von der Baustoffoberfläche abstehen und wasserabweisend wirken.

10.2.3 Stearate

Stearate sind Salze der Stearinsäure. Diese werden gelegentlich als Massenhydrophobierungsmittel in Putzen angewendet, z. B. in Form von Calcium- oder Zinkstearat. Stearate sind jedoch wesentlich weniger effektiv in ihrer hydrophoben Wirkung als Silane [10.28].

10.2.4 Anwendung

Hydrophobierungsmittel werden bei vorhandenen Bauwerken als Imprägnierungen benutzt. Silane werden entweder in Lösungsmittel, in Form einer wasserbasierenden Dispersion oder als Gel verwendet. Lösungsmittel- oder wasserhaltige Produkte werden durch Sprühen oder durch Fluten aufgebracht (Bild 10.14). Gelartige Produkte können durch Aufspritzen, mit einem Pinsel oder mit dem Roller appliziert werden. Das silanhaltige Gel wird dick auf die Oberfläche aufgetragen und dringt dann über einen längeren Zeitraum in die Poren des Substrats ein. Der Gelüberschuss wird dann nach einer Weile entfernt. Die Gelform verhindert ein schnelles Verdunsten des Lösungs- bzw. Dispersionsmittels und ein verbessertes Eindringen des Hydrophobierungsmittels in das Substrat. Gelartige Produkte haben sich besonders bei Beton bewährt, da herkömmliche Anwendungen aufgrund der feinen Porenstruktur von Beton nur selten zu hohen Eindringtiefen geführt haben.



Bild 10.14 Aufbringen eines Hydrophobierungsmittels durch Fluten. Mittels Spritze und Kanüle (links); mit einer Spritzflasche (rechts). (Fotos: © Katarina Malaga, Mölndal, Schweden)

10.2.5 Risiken in Zusammenhang mit Hydrophobierungsmitteln

Sollen Naturstein- oder Ziegelmauerwerke durch eine Hydrophobierung geschützt werden, sind sorgfältige Voruntersuchungen durchzuführen. Besonders wichtig ist die Fragestellung, ob ein Feuchtezugang noch anders als über die zu hydrophobierende Mauerwerks- bzw. Bauteiloberfläche erfolgen kann. Erfahrungen aus der Vergangenheit haben gezeigt, dass bei einem hydrophobierten Mauerwerk oder Bauteilen aus Naturstein erhebliche Schäden auftreten können, wenn ein kapillarer Feuchtetransport vom Steininnern zur Oberfläche gegeben ist. Dies kann erfolgen, wenn Feuchte über schadhafte Fugen oder aufsteigendes Wasser tief in das Mauerwerk eindringt. Zwar sollte in einem solchen Fall die hydrophobierte Randzone des Mauerwerks ein Abtrocknen der Feuchte erlauben. Dies kann aber nur erfolgen, wenn die Verdunstung wesentlich höher ist, als der kapillare Transport von Feuchtigkeit zur hydrophobierten Randzone. Ist die Verdunstung dagegen geringer, kommt es an der Grenzfläche der hydrophobierten Randzone des Mauerwerks und dem unbehandelten Restbereich zur Feuchteakkumulation.

Wird kapillar nicht nur Feuchte transportiert, sondern auch Ionen, werden entsprechend Salze auskristallisiert, was in den Poren einen entsprechenden Kristallisationsdruck erzeugt. Bei Frost kann das Wasser in den Poren unterhalb der hydrophobierten Randzone gefrieren und Spannungen induzieren. Da die hydrophobierte Randzone wesentlich trockener ist als die darunterliegenden unbehandelten Bereiche, kommt es zu einem Spannungsaufbau aufgrund hygrischer Verformung, zusätzlich zu den beiden bereits genannten lokalen Beanspruchungen durch Feuchte und Salzkristallisation [10.29]. Die Folge kann im extremen Fall den Verlust der hydrophobierten Randzone bedeuten. Wenn hydrophobierte Natursteine stark durchfeuchtet werden, weil Wasser z. B. durch schadhafte Fugen in das Mauerwerk eindringt, kann es zu der in Bild 10.15 gezeigten Schadensentwicklung kommen. Meist tritt an der Grenzfläche der hydrophobierten Randzone und dem unbehandelten Stein eine Feuchteakkumulation mit Salzbildung und Frosteinfluss auf. Bei dem Bauwerk aus Ettringer Tuff rechts im Bild führte dies zum Abschalen der hydrophobierten Randzone. Die Steinfläche darunter war an dem kalten Wintertag, an dem das Foto entstand, teilweise gefroren.

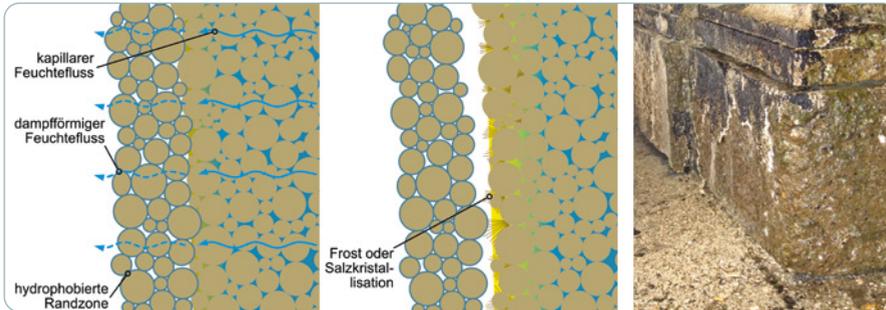


Bild 10.15 Möglicher Schadensverlauf bei hydrophobierten Natursteinen schematisch und an einem Bauwerk aus Ettringer Tuff (rechts).

Bei einer großflächigen Hydrophobierung kann es möglicherweise zur Schädigung großer Mauerwerksbereiche kommen [10.30]. Ob sich unterhalb der hydrophobierten Randzone Salze bilden, lässt sich auch bildlich nachweisen. Bild 10.16 zeigt die Ergebnisse einer chemischen Untersuchung eines Bohrkerns aus vulkanischem Tuff, der Bestandteil eines den 1980er-Jahren hydrophobierten Mauerwerks war. Die Daten wurden mittels der Mikro-Röntgenfluoreszenzanalyse ermittelt (siehe Kapitel 8.4.1). Die Aufnahmen zeigen die Verteilung der Elemente Schwefel, Silizium und Kalium in diesem Bohrkern und die aus den Elementverteilungen berechneten Intensitätsprofile von Silizium und Schwefel in Abhängigkeit von der Tiefe. In der Dünnschliffaufnahme des Bohrkerns ist der Bereich der untersuchten Elementverteilung blau markiert (B). A enthält die Aufnahme des Bohrkerns mit den Mikro-RFA-Daten. Sie zeigt die Überlagerung von Schwefel, Silizium und Kalium in dem blauen Bereich aus B. Der linke Bereich der Probe stellt die Oberfläche des Bohrkerns dar. Deutlich ist eine Anreicherung von Schwefel in einer Tiefe von 6–10 mm zu erkennen. Schwefel repräsentiert hierbei Gips, der unterhalb der hydrophobierten Randzone ausgefällt wurde. Die Grafik unten (C) stellt die Elementintensitäten, abhängig von der Tiefe, korrespondierend zum obigen Elementverteilungsbild dar. In den ersten sechs Millimetern tritt eine Anreicherung von Silizium auf, welche teilweise durch das Silikonharz verursacht wurde, das als Hydrophobierungsmittel verwendet wurde. Die Intensitätsdaten für Silizium und Schwefel wurden aus den Elementverteilungen berechnet.

Dieser Effekt ist besonders bei Natursteinen oder Ziegeln zu erwarten, die nicht nur stark durchfeuchtet sind, sondern auch einen höheren kapillaren Wasseraufnahmekoeffizienten besitzen. Schäden dieser Art treten nicht unmittelbar nach einer Behandlung auf. Meist dauert es fünf bis 20 Jahre, bis Schäden sichtbar werden. Da Hydrophobierungen auch noch nach Jahrzehnten aktiv sein können, ist eine Risikoabschätzung oft sehr schwierig.

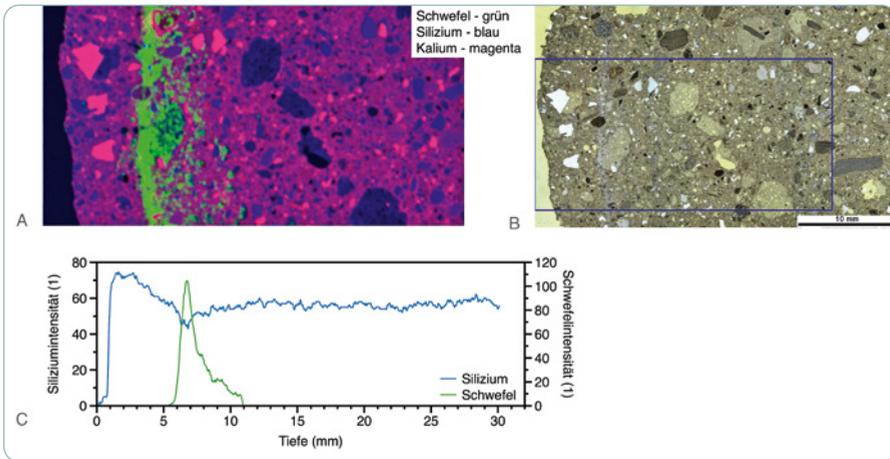


Bild 10.16 Überlagerung von Elementverteilungen von Schwefel, Silizium und Kalium aus Mikro-RFA Daten (Bildgröße: 31 mm × 24 mm) (A). Dünnschliffaufnahme des Bohrkerns (B). Der Bereich der Elementverteilung aus A ist blau markiert. Elementintensitäten, abhängig von der Tiefe (C).

Bei Beton sind Hydrophobierungen meist weniger kritisch. Da Transportvorgänge im Beton aufgrund der kleineren Poren meist sehr langsam erfolgen, kann sich eher ein Gleichgewicht von Verdunstung und Transport einstellen, sodass die bei Naturstein- oder Ziegelmauerwerk beobachteten Schäden bei Beton eher nicht auftreten. Das liegt auch daran, dass Beton im Außenbereich bei normalen Feuchtebedingungen selbst mit einer Hydrophobierung praktisch nie austrocknet.

10.3 Schutz vor Graffiti

Das Konzept der Graffiti gibt es schon sehr lange – selbst in antiken Ruinen finden sich Kritzeleien in griechischer oder lateinischer Sprache. Nach dem Zweiten Weltkrieg haben sich weltweit unterschiedliche Sprayerszenen herausgebildet, welche teilweise auch ganze Stadtteile bemalen, was in den betroffenen Gebieten zu einem Gefühl der Verwahrlosung führen kann. Graffiti sind in den meisten Fällen willkürliche Anwendungen von Farbmitteln auf Gebäudeoberflächen, Denkmälern oder Transportmitteln (z. B. U-Bahnzüge, Busse). Zwar werden Zeichen und sogenannte Tags auch anderweitig auf Oberflächen aufgebracht, z. B. durch Einritzen oder Schmirgeln, jedoch wird die überwiegende Anzahl mittels Sprühfarbe oder Permanentmarker angebracht. In der Regel erfolgen diese Anwendungen ohne Zustimmung der Eigentümer und müssen teilweise unter hohem Kostenaufwand entfernt werden. Alleine in Deutschland verursachen Graffiti jährliche Kosten in dreistelliger Millionenhöhe [10.31]. Graffiti werden deshalb manchmal

als »Farbe am falschen Platz« bezeichnet. Obwohl Graffiti in Einzelfällen eine künstlerische Ästhetik zugeordnet werden können, handelte es sich bei der überwiegenden Mehrzahl um eine Form von Vandalismus (Bild 10.17).



Bild 10.17 Graffiti, die mit verschiedenen Farbmitteln auf eine Hauswand aufgebracht wurden (links). Unsachgemäß gereinigte Fassadenplatte: Das ursprüngliche Graffiti wurde zwar entfernt, mit diesem aber auch die oberste Schicht des Sandsteins (rechts).

Neben ästhetischen Beeinträchtigungen und ökonomischen Schäden verursachen Graffitis manchmal Folgeschäden aufgrund falscher Reinigung von betroffenen Materialoberflächen. Bild 10.17 zeigt ein solches Beispiel, bei dem ein Sandstein von einer Bauwerksfassade mit einer aggressiven, mechanischen Methode gereinigt wurde. Deutlich sind an der Stelle des Graffitis Abriebspuren im Sandstein zu erkennen. Nichtsachgemäße Entfernung von Graffitis kann aber nicht nur Materialschäden verursachen, sondern bei großflächiger Entfernung auch negative Umwelteffekte erzeugen, z. B. durch das unkontrollierte Abfließen von aggressiven, chemischen Reinigern und Farbmittelresten in die Kanalisation.

Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei den Farbmitteln häufig um Sprayfarben und Permanentmarker. Die Bindemittel von Sprayfarben sind meist Acryl- oder Alkydharze (Kapitel 6), sowie Nitrocellulose mit unterschiedlichen mineralischen oder synthetischen Pigmenten, wie sie auch in der Automobilindustrie verwendet werden [10.32]. Bei Permanentmarkern handelt es sich meist um Permanentfilzstifte mit einem organischen Farbstoff, die im Schreibwarenhandel erhältlich sind. Gelegentlich verwenden »Tagger« auch Lederfarbstoffe, die tief in poröse Materialien eindringen können oder Silbernitrat, das erst nach Belichtung als Graffiti oder Tag erscheint. Da Kunstharze als Bindemittel in Sprayfarben normalerweise sehr dampfdicht sind (vgl. Bild 6.7), können sie bei großflächiger Anwendung über längere Zeiträume Probleme mit der Dampfdiffusion verursachen, was unter Umständen ein Abblättern der Farbe und möglicherweise der darunterliegenden Substratschichten (z. B. Putze) zur Folge haben kann.

10.3.1 Graffitireinigung

Der Erfolg einer Entfernung der Graffiti hängt sehr stark von der Substratoberfläche ab. Ist diese dicht und glatt, lassen sich Graffiti leichter entfernen. Ist die Oberfläche dagegen porös und uneben, verkeilt sich die Farbe besser in den Poren und Unebenheiten und ist damit auch schwieriger zu entfernen. Eine Übersicht der Reinigungseffekte bezüglich der Substratporosität ist in der Bild 10.18 wiedergegeben [10.33]. Diese Abbildung gibt einen groben Anhaltspunkt, wie schwierig eine Materialoberfläche zu reinigen ist.

Porosität	Reinigungserfolg					
	sehr gut	gut	relativ gut	relativ schlecht	schlecht	sehr schlecht
porös					Sandstein Kalkstein Ziegel Kalksandstein	Mörtel Putz Porenbeton
	Fliesen PU			Holz Beton Granit, Marmor	PVC	
dicht	Glas	Edelstahl	Aluminium Gusseisen Stahl			

Bild 10.18 Entfernbarkeit von Graffiti auf unterschiedlichen Materialien nach [10.33]. Die Porosität ist ein wesentliches Kriterium, allerdings nicht das einzige.

Sicherlich spielt auch die Art der Farbe eine Rolle und ob diese tiefer in das Substrat eindringen kann, z. B. bei Verwendung von Markern mit organischen Farbstoffen. Auch das Alter der Farbe bzw. deren Verweildauer auf dem Substrat spielt eine entscheidende Rolle. Sollen Graffiti entfernt werden, müssen diese Faktoren beim Reinigen mitberücksichtigt werden. Die Graffitireinigung wird deshalb am besten einer Fachfirma übertragen, welche die notwendigen Kenntnisse bezüglich der Farbmittel, Baustoffoberflächen und dazu passende Reinigungsmittel und -maßnahmen hat.

Die Reinigung selbst erfolgt mit unterschiedlichen Methoden. Es werden Dampfdruck- oder Wasserstrahlreiniger angewendet, aber auch Bürsten unterschiedlicher Stärke mit entsprechenden chemischen Reinigungsmitteln. Wird bei lösungsmittelhaltigen Farben ein lösungsmittelhaltiger Reiniger angewendet, ist zu beachten, dass das Substrat nicht porös ist. Da das Lösungsmittel das Bindemittel der Farbe auflöst, besteht die Gefahr, dass die pigmenthaltige Mischung von aufgelöstem Bindemittel und lösungsmittelhaltigen Reiniger tiefer in das Porengefüge des Substrats eindringt und dadurch unangenehme Farbschleier erzeugt [10.32]. Bei kulturgeschichtlich oder kunsthistorisch wertvollen Oberflächen wird

manchmal eine Partikelstrahlreinigung angewendet, wobei als Reinigungspartikel Calcit, Silica, Kunststoff, Kork oder CO₂-Eispartikel verwendet werden [10.34]. Die Methode ist jedoch zur Entfernung großflächiger Graffiti weniger geeignet, da der Arbeitsfortschritt nur sehr langsam ist. In den letzten Jahren hat sich bei wertvollen Objekten oder Bauwerken zunehmend die Laser-Reinigung durchgesetzt. Bei dieser wird ein Laserstrahl auf das Farbmittel geleitet und die Farbe wird durch Ablation entfernt. Bei der Ablation wird das Bindemittel der Farbschicht verdampft ohne dass das darunterliegende Substrat erwärmt wird. Die Methode eignet sich auch für Farbstoffe, da diese ebenfalls verdampft werden [10.32].

10.3.2 Anti-Graffiti-Systeme (AGS)

Anti-Graffiti-Systeme bestehen aus Beschichtungen oder Imprägnierungen, die auf die Baustoffoberfläche aufgetragen werden und Reinigungssysteme, die an die Beschichtung bzw. Imprägnierung angepasst sind. AGS sollen helfen, Graffiti mit einem geringeren Aufwand von Oberflächen zu entfernen. Es wird hierbei gehofft, dass durch das schnelle Reinigen von verunstalteten Oberflächen die Verursacher frustriert werden und schneller aufgeben bzw. sich andere Objekte suchen. Das Aufbringen von AGS und die Reinigung von Graffiti sollte von Firmen ausgeführt werden, die sich darauf spezialisiert und entsprechende Erfahrungen mit unterschiedlichen Oberflächen haben.

AGS haben einen unterschiedlichen Charakter, je nachdem auf welchen Untergrund diese aufgebracht werden. Auf sehr dichten Substraten, wie Metalle oder Polymere, können dichtere Beschichtungen verwendet werden, da keine Wasserdampfdiffusion zu erwarten ist. Auf porösen Substraten sollten AGS Verwendung finden, welche offen für Wasserdampfdiffusion sind. Wird dies nicht beachtet, kann es bei entsprechendem Feuchtetransport im beschichteten Substrat zu Ablösungen der Beschichtung kommen.

Über die letzten 20 Jahre wurden eine Vielzahl unterschiedlicher AGS-Produkte entwickelt, die auf verschiedenen chemischen Komponenten beruhen und bei denen unterschiedliche Vorgehensweisen bei der Reinigung angewendet werden. Eine erste Einteilung dieser Produkte erfolgte durch ein Regelwerk der Gütegemeinschaft Anti-Graffiti e.V., das die folgende Klassifizierung vorsah [10.35]:

- › Temporäre AGS (Opfersysteme), die nach einer einmaligen Reinigung wieder auf eine Oberfläche aufgebracht werden müssen.
- › Semipermanente AGS, die zwar nach einem Reinigungsgang nicht unbedingt erneuert werden müssen, die jedoch nicht so viele Reinigungszyklen überdauern wie permanente Systeme.
- › Permanente AGS, die eine vielmalige Reinigung erlauben, ohne dass die Beschichtung erneuert werden muss.

Zwischenzeitlich wurde von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BaSt) eine einfachere Klassifikation bestehend aus permanenten (AGS 1) und temporären (AGS 2) Systemen entwickelt [10.36]. In dieser neuen Klassifikation sind die temporären und semipermanenten Systeme in der Klasse AGS 2 zusammengefasst, sowie AGS 1 unterteilt in schichtbildende (AGS 1-1) und nicht-schichtbildende Systeme (AGS 1-2, z. B. Imprägnierungen) [10.37]. Diese Vereinfachung hat den Vorteil, dass Unschärfen bei der Zuordnung von AGS ausgeräumt wurden, da für die entsprechenden Klassen klare Anforderungen formuliert wurden [10.36].

Temporäre AGS

Bei den temporären AGS handelt es sich oft um mikrokristalline Wachse. Mikrokristalline Wachse oder Ceresine besitzen einen höheren Schmelzpunkt als z. B. Paraffin, sind transparent in dünnen Schichten, weich und knetbar. Meist wird AGS auf Mikrowachsbasis mit weiteren Komponenten, z. B. Copolymeren und Vernetzer gemischt um die gewünschten Eigenschaften zu erreichen. Mikrowachse lassen sich mit einem Farb- oder Niederdrucksprayer in mehreren Lagen aufbringen und Graffiti werden anschließend mit einem Heißdampfreiniger von der Oberfläche entfernt. Der heiße Wasserdampf schmilzt hierbei das Wachs und kondensierendes Wasser wäscht es zusammen mit der Graffitifarbe vom Material fort. Anschließend muss das temporäre AGS wieder neu aufgebracht werden.

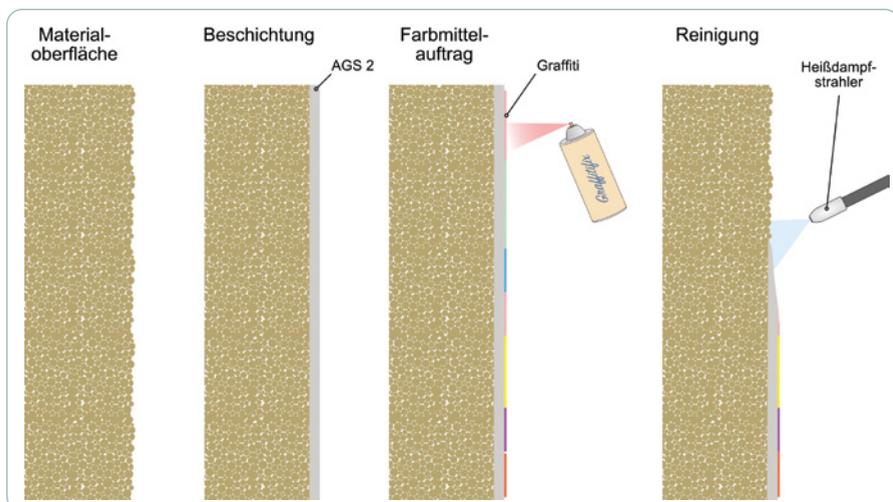


Bild 10.19 Vorgehensweise beim Aufbringen eines AGS 2 und der Reinigung von Graffiti. Nach dem Reinigen muss das AGS 2 erneut auf die Baustoffoberfläche aufgebracht werden.

Bild 10.19 zeigt die einzelnen Schritte des Aufbringens, Reinigens und Wieder-aufbringens eines AGS 2. Einige Hersteller von AGS 2 empfehlen eine Grundierung vor dem Auftrag des eigentlichen AGS vorzunehmen. Dabei handelt es sich oftmals um hydrophobe Produkte, welches zu einem als Haftvermittler dienen sollen, zum anderen ein Eindringen von abgewaschenen Farbresten in die Poren des Substrats verhindern sollen.

Temporäre AGS basierend auf Mikrowachs werden häufig auch bei porösen Oberflächen angewendet, da die Beschichtung die Dampfdiffusion zwar in einigen Fällen behindern kann, diese aber nicht unterbindet. Bild 10.20 zeigt die μ -Werte für neun verschiedene Natursteine mit unterschiedlichen Porositäten, unbehandelt und beschichtet mit einem mikrowachsbasierenden AGS 2 [10.38]. Die Daten zeigen in manchen Fällen eine Erhöhung, in anderen eine Erniedrigung des μ -Werts infolge der Behandlung. Allerdings zeigen die Standardabweichungen (Fehlerbalken im Diagramm) eine gewisse Streuung der Ergebnisse, die zum Teil auch durch Inhomogenitäten in den Natursteinen verursacht wird.

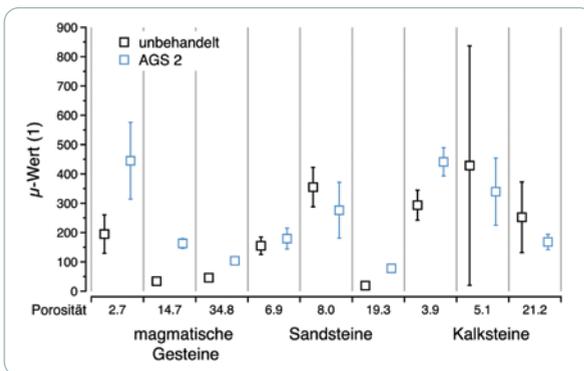


Bild 10.20 μ -Werte von neun verschiedenen Natursteinen vor und nach der Beschichtung mit einem temporären AGS (AGS 2) auf Mikrowachsbasis. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichungen an.

Letztendlich ist die Änderung der Dampfdiffusion bei Wachssystemen geringer als bei schichtbildenden AGS 1-1 aber etwas höher als bei imprägnierenden AGS 1-2. Mit Glanzänderungen des Substrats ist beim Auftragen eines wachsbasierenden Systems zu rechnen, insbesondere auf dichteren Materialien. Spielt die Ästhetik eine Rolle, sollten deshalb Musterflächen angelegt und entsprechend Glanzdaten von unbeschichteten und beschichteten Flächen vorgenommen werden.

Die Reinigung von Graffiti auf Mikrowachsbeschichtungen ist für verschiedene Substrattypen relativ gut (Bild 10.21), wenn die richtigen Reinigungsmaßnahmen angewendet wurden [10.38]. Wichtig ist, dass die Reinigung mit dem Heißdampfstrahler horizontal von Oben nach Unten erfolgt, um ein Abfließen des farbmittelhaltigen Kondensats an schon gereinigten Flächen zu vermeiden. In den meisten Fällen werden für verbleibende Farbschatten entsprechende chemische Reiniger empfohlen.

Bild 10.21 Prüfplatten eines Postaer Sandsteins vor und nach der Beschichtung mit einem mikrowachsbasierendem AGS 2 und vor und nach der Reinigung von Farbmitteln. Die Prüfung erfolgte nach [10.39].



Neben Mikrowachsbeschichtungen fallen unter temporäre Anti-Graffiti-Systeme auch Produkte, die auf Polysacchariden basieren [10.40]. Diese werden vor allem für denkmalgeschützte Materialoberflächen empfohlen. Zwar ergeben sich ebenfalls gute Reinigungsergebnisse, Beschichtungen zeigen jedoch unter Umständen eine geringere Dauerhaftigkeit, da Polysaccharide anfälliger für umweltbedingte Degradationsprozesse sind [10.40]. Das Reinigen bei Polysaccharidsystemen erfolgt durch eine Vorbehandlung mit heißem Wasser, welche die Beschichtung aufquillt. Erst danach wird mit einem Heißdampfstrahler die Farbschicht entfernt.

Permanente AGS

Permanente AGS werden einmalig auf die Baustoffoberfläche aufgebracht und können viele Reinigungszyklen überstehen. Die Methodik ist in Bild 10.22 wiedergegeben. In der Regel wird neben dem AGS 1 auch ein entsprechender Systemreiniger verwendet, der auf das AGS abgestimmt ist. Wie bereits erläutert wurde, werden nach der Einteilung der BaSt [10.36] zwei Kategorien von permanenten Systemen unterschieden. Beide Kategorien weisen oftmals fluorierte Baugruppen auf. Fluorierte Radikale besitzen oleophobe (d. h. ölabweisende) Eigenschaften und fluorierte Beschichtungen sind deshalb erheblich leichter von Graffiti zu reinigen (»Teflon«-Effekt). Wie lange fluorierte Chemikalien noch eingesetzt werden kön-

nen, bleibt abzuwarten, da die Europäische Kommission manche dieser Stoffe als umwelt- und gesundheitsgefährdend einstuft.

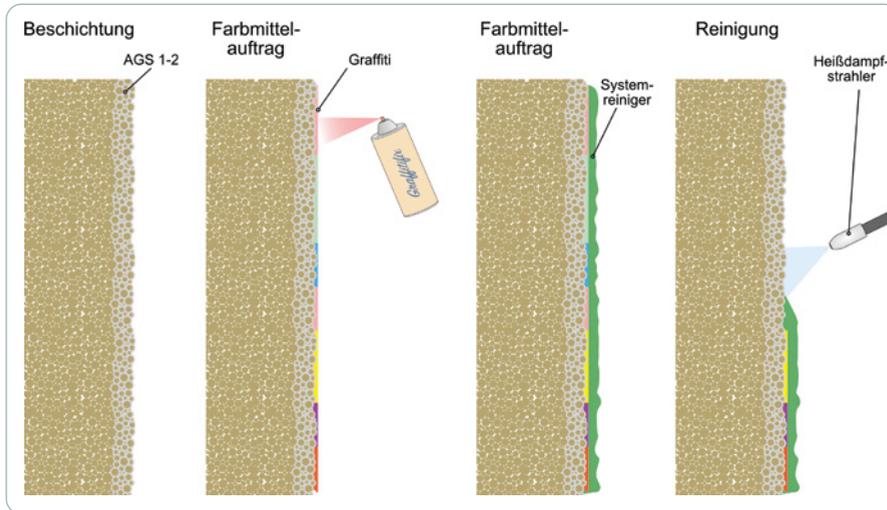


Bild 10.22 Vorgehensweise beim Aufbringen eines AGS 1 und der Reinigung von Graffiti. Nach dem Reinigen muss das AGS 1 nicht wieder auf die Baustoffoberfläche aufgebracht werden.

Bei den schichtbildenden Systemen (AGS 1-1) handelt es sich oftmals um zwei Komponenten-Systeme (2K-Systeme), die aus Polyurethan- (PU), Polyurethan/Polyester- oder Epoxidharzen bestehen. Diese sind in der Regel sehr dampfdicht und können nur auf dichten Substraten, z. B. Metallen oder Beton, aufgebracht werden. Bei Beton ist zu beachten, dass dieser nicht zu starken Feuchtewechseln ausgesetzt ist, da es sonst zu Ablösungen der Schicht kommen kann. Über die letzten Jahre kamen mehr und mehr Produkte auf den Markt, die auf wässrigen Dispersionen von Polyurethan und Acrylat basieren, die jedoch ebenfalls eine schichtbildende Wirkung aufweisen. Für Naturstein oder Ziegel sind PU- oder Epoxidsysteme nicht geeignet [10.41]. Besonders wenn starke Feuchtewechsel erwartet werden, und manchmal reichen hierzu schon Unterschiede in der relativen Luftfeuchte aus (z. B. bei hinterlüfteten Fassaden), kann es bei diesen sehr dichten Beschichtungen zu Ablösungen kommen (Bild 10.23).

Imprägnierende AGS 1-2 basieren meist auf Alkylalkoxysilanen. Die Silan- bzw. Siloxanimprägnierungen sind hydrophobierend und dringen einige Millimeter in ein poröses Substrat ein. Fast immer besitzt die Alkylgruppe einen fluorierten Abschnitt, welcher dem Silan nicht nur eine hydrophobierende, sondern auch eine oleophobe Wirkung verleiht. Diese Wirkungen bleiben auch bei wiederholten Reinigungszyklen erhalten [10.42]. Aufgrund der imprägnierenden Wirkung kön-

nen silanbasierende AGS bei sehr porösen Materialien eine geringere Reinigungswirkung aufweisen. Dies liegt daran, dass sich auf einer rauen und porösen Oberfläche ein Teil des Farbmittels, trotz der hydrophoben und oleophoben Wirkung der Imprägnierung, in den Porenzwickeln festkeilt. Die Folge sind Reste, die sich als Farbschatten bemerkbar machen (Bild 10.24). Bei glatteren, weniger rauen Oberflächen funktionierend AGS 1-2 dagegen besser und zeigen eine befriedigende Reinigungswirkung. Der Vorteil von silanbasierenden Imprägnierungen ist deren relativ geringe Änderung des Wasserdampfdiffusionsvermögens, d.h. behandelte Oberflächen können nach wie vor Wasserdampf transportieren [10.37]. Da diese Systeme hydrophob sind, gelten bei stark durchfeuchteten Bauteilen allerdings dieselben Vorbehalte bezüglich möglicher Schäden, wie sie weiter oben bei den Hydrophobierungsmitteln geäußert werden (Kapitel 10.2). Die Eindringtiefen silanbasierender AGS sind jedoch geringer als die von Hydrophobierungssystemen, denn es wird nur eine Oberflächenbehandlung erwünscht, während bei einer Hydrophobierung eine möglichst hohe Eindringtiefe erzielt werden soll.



Bild 10.23 Feuchteschäden in Form von Blasen und Abblättern an einer dampfdichten Anti-Graffiti-Beschichtung auf einer Klinkeroberfläche (links) und an einer dichten AGS 1-1-Beschichtung auf einem Naturstein (rechts).

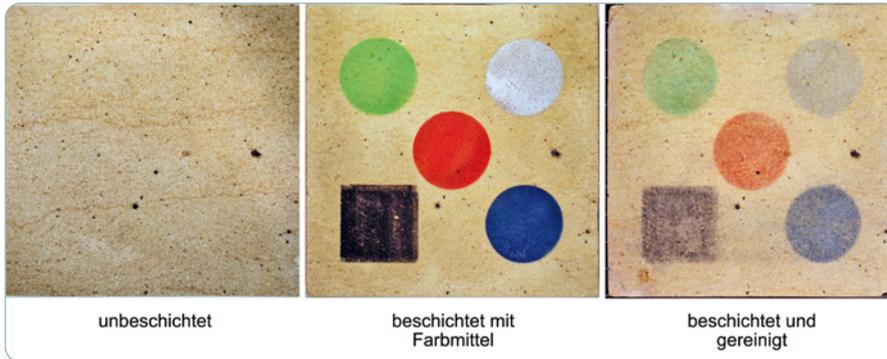


Bild 10.24 Prüfplatten eines Postaer Sandsteins vor und nach der Beschichtung mit einem silanbasierenden AGS 1-2 und der Aufbringung von Farbmitteln sowie nach der Reinigung der Platte. Die Prüfung erfolgte nach [10.39].

10.4 Regelwerke

Die Auflistung der Regelwerke im folgenden Abschnitt ist bei weitem nicht vollständig, da in verschiedenen Ländern häufig Empfehlungen und Richtlinien, sowie Normen auf nationaler Ebene definiert werden.

10.4.1 Steinfestigung und Steineränzungen

Für die Steinfestigung gibt es keine einheitlichen Regelwerke bezüglich der Produktanforderungen und deren Anwendung. Es gab zwar eine ASTM-Norm zur Auswahl von Steinfestigern, diese wurde aber 2017 zurückgezogen. Es handelt sich hierbei um:

ASTM E2167-01, 2008. Standard guide for selection and use of stone consolidants. American Society for Testing and Materials.

Anderweitig gibt es zahlreiche Literaturangaben, die sich mit der Konsolidierung von Natursteinen und Putzen bzw. Mörteln befassen und die zu einem kleinen Teil im Text zitiert und im Literaturabschnitt des Kapitels aufgeführt sind.

Für Steineränzungen existiert eine nationale Empfehlung, die von der Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege (WTA) erarbeitet wurde:

WTA 3-11-97/D. Natursteinrestaurierung nach WTA III: Steineranzung mit Restauriermörteln/ Steinersatzstoffen.

10.4.2 Hydrophobierung

Anders sieht es mit Hydrophobierungen aus. Hydrophobierungen sind ein Bestandteil des Oberflächenschutzes bei Beton. Da diese dauerhaftigkeitseinwirkenden Einflüsse auf Beton haben können, sind diese genormt. Für Beton spielen hierbei die folgenden Normen eine wichtige Rolle:

DIN EN 1504-2:2005-01. Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Definitionen, Anforderungen, Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität – Teil 2: Oberflächenschutzsysteme für Beton; Deutsche Fassung EN 1504-2:2004.

Es handelt sich hierbei um eine Produktnorm, welche Anforderungen an Oberflächenschutzsysteme, einschließlich Hydrophobierungsmittel formuliert. In der Norm sind auch die zahlreichen Prüfmethode aufgeführt, die hier nicht gelistet werden und die zur Beurteilung der Produkteigenschaften herangezogen werden. Weiterhin existieren internationale Normen und Richtlinien zur Prüfung hydrophober Schutzmittel:

ASTM D6532-00, 2014. Standard test method for evaluation of the effect of clear water repellent treatments on water absorption of hydraulic cement mortar specimens. American Society for Testing and Materials.

ASTM D5095-91, 2013. Standard test method for determination of the nonvolatile content in silanes, siloxanes and silane-siloxane blends used in masonry water repellent treatments. American Society for Testing and Materials.

NT BUILD 515, 2015. Hydrophobic impregnations for concrete – prevention of chloride ingress – filter effect. Nordtest.

Neben den Normen und Empfehlungen für Beton wurden über die letzten zehn Jahre auch entsprechende Regelwerke zur Anwendung von Hydrophobierungsmittel in der Denkmalpflege erarbeitet:

DIN EN 17114:2019-02. Erhaltung des kulturellen Erbes – Oberflächenschutz für poröse anorganische Materialien – Technische und chemische Datenblätter von wasserabweisenden Produkten; Deutsche Fassung EN 17114:2018.

DIN EN 16581:2015-03. Erhaltung des kulturellen Erbes – Oberflächenschutz für poröse anorganische Materialien – Laborprüfverfahren für die Ermittlung der Wirksamkeit von wasserabweisenden Produkten; Deutsche Fassung EN 16581:2014.

DIN EN 16302:2013-04. Erhaltung des kulturellen Erbes – Prüfverfahren – Messung der Wasseraufnahme mit Prüfrohr; Deutsche Fassung EN 16302:2013.

Die Normen beschreiben im Wesentlichen Prüfverfahren die zur Beurteilung der Wirksamkeit von Hydrophobierungsmittel herangezogen werden können. Neben diesen Normen ist eine nationale Empfehlung der WTA zu nennen:

WTA 3-17-10/D. Hydrophobierende Imprägnierung von mineralischen Baustoffen.

10.4.3 Reinigung und Anti-Graffiti-Systeme

Zur Reinigung existieren einige Normen, die bedingt auch zur Reinigung von Graffiti dienen können:

DIN EN 17138:2019-03. Erhaltung des kulturellen Erbes – Verfahren und Materialien für die Reinigung von porösen anorganischen Materialien; Deutsche Fassung EN 17138:2018.

DIN EN 16782:2016-07. Erhaltung des kulturellen Erbes – Reinigung von porösen anorganischen Materialien – Laserstrahlreinigungsverfahren für kulturelles Erbe; Deutsche Fassung EN 16782:2016.

ASTM C1515-14, 2014. Standard guide for cleaning of exterior dimension stone, vertical and horizontal surfaces, new or existing. American Society for Testing and Materials.

Bezüglich Anti-Graffiti-Systemen gibt es bisher keine europäischen aber einige amerikanische ASTM-Normen:

ASTM D6578/D6578 M-13, 2018. Standard practice for determination of graffiti resistance. American Society for Testing and Materials.

ASTM D7089-06, 2014. Standard Practice for Determination of the Effectiveness of Anti-Graffiti Coating for Use on Concrete, Masonry and Natural Stone Surfaces by Pressure Washing. American Society for Testing and Materials.

Für die Anforderungen an Anti-Graffiti-Systeme gibt es in Deutschland drei Organe, die Richtlinien/Empfehlungen formulieren. Es handelt sich hierbei um die Bundesanstalt für Straßenwesen (BaSt), die Gütegemeinschaft Anti-Graffiti e. V. und die WTA. Alle drei Organe haben Anforderungen und Prüfverfahren zur Beurteilung von Anti-Graffiti-Produkten entwickelt. Die Richtlinien der BaSt gelten in deren Aufgabenbereich der deutschen Fernstraßen. Es handelt sich hierbei um Technische Lieferbedingungen (TL) und Technische Prüfvorschriften (TP), letztere zur Prüfung der in der TL festgelegten Leistungsanforderungen bezüglich der Reinigungswirkung und einiger Charaktereigenschaften der AGS. Zwar handelt es sich bei der TL/TP hauptsächlich um die Anwendung von AGS auf Betonoberflächen, ein Übergreifen der Richtlinien auf Natursteinmauerwerk wurde im

Rahmen eines Forschungsvorhabens zumindest geprüft [10.38]. Das Regelwerk der Gütegemeinschaft Anti-Graffiti e. V. gilt für verschiedene Materialoberflächen und legt Prüfverfahren der Reinigungswirkung und Charaktereigenschaften von AGS fest. Die WTA hat Empfehlungen in der Anwendung von AGS auf mineralischen Oberflächen von denkmalgeschützten Objekten formuliert und Prüfverfahren zur Beurteilung deren Wirksamkeit vorgeschlagen:

TL AGS-Beton, 2017. Technische Lieferbedingungen für Anti-Graffiti-Systeme auf Beton. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.

TP AGS-Beton, 2012. Technische Prüfvorschriften für Anti-Graffiti-Systeme auf Beton. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.

ReGG, 2000. Regelwerk für die Bewertung von Verfahren, Technologien und Materialien zur Graffitientfernung und Graffitiprophylaxe (ReGG). Gütegemeinschaft Anti-Graffiti e.V., Berlin.

WTA 2-5-97/D. Anti-Graffiti-Systeme.

WTA 2-8-04/D. Bewertung der Wirksamkeit von Anti-Graffiti-Systemen (AGS).

11 LITERATUR

Kapitel 1

- [1.1] Weise, F.; Müller, U.: Baustoffliche Untersuchungen am Tuffstein des Charlottenburger Tors. In: Kraus, K. (Hrsg.): Arkus-Tagung. Koblenz: Institut für Steinkonservierung (IFS), 2006, S. 59–64
- [1.2] Müller, U.; Weise, F.; Grell, S.: The long term effects of a water repellent treatment on a volcanic tuff. In: Fort, R.; Alvarez de Buergo, M.; Gomez-Heras, M.; Vasquez-Calvo, C. (Hrsg.): Heritage, Weathering and Conservation. Madrid: Taylor & Francis, 2006, S. 777–784
- [1.3] Müller, U.: The micro-XRF – A new technique for the analysis of building materials. Construction Technology in Europe 26 (2004)
- [1.4] Hörenbaum, W.: Verwitterungsmechanismen und Dauerhaftigkeit von Sandsteinsichtmauerwerk. Karlsruhe: Universität Fridericiana zu Karlsruhe, 2005
- [1.5] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb. URL: <http://www.dafstb.de/index.html> [Stand: 19.08.2020]
- [1.6] https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Publikationen/Regelwerke/Regelwerke-B_node.html;jsessionid=D483535D27415B00AB2EEBA9E0AC8915.live11291 [Stand: 19.08.2020]
- [1.7] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb: DAfStb-Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen. URL: www.dafstb.de [Stand: 19.08.2020]
- [1.8] Stroh, K.; Axmann, M.: Umwelt Wissen – Praxis Asbest. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2013. URL: http://www.lfu.bayern.de/umweltwissen/doc/uw_9_asbest.pdf [Stand: 19.08.2020]

Kapitel 2

- [2.1] Balderrama, A. A.: Earthquake damage to historic masonry structures. In: Conservation of Building and Decorative Stone 2. London: Butterworth-Heinemann, 1990, S. 107–113
- [2.2] Niker: Inventory of earthquake-induced failure mechanisms related to construction types, structural elements, and materials. Padua: Università di Padova, 2010. URL: <http://www.niker.eu/downloads/> [Stand: 19.08.2020]
- [2.3] Press, F.; Siever, R.: Understanding Earth. New York: W. H. Freeman and Company, 1998

- [2.4] Vendl, A.; Wolff, A.; Pichler, B.; Weber, J.; Banik, G.: Gesteinsverwitterung und Konservierungspraxis am Kölner Dom – Stone decay and conservation practice on the Cologne cathedral. Wiener Berichte über Naturwissenschaft in der Kunst 2, 1985. S. 164–175
- [2.5] Wenzel, F. (Hrsg.): Berichte vom Wiederaufbau der Frauenkirche zu Dresden Konstruktion des Steinbaus und Integration der Ruine. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe, 2007
- [2.6] DIN EN 12440:2018-01. Naturstein – Kriterien für die Bezeichnung. Deutsche Fassung EN 12440:2017. Berlin: Beuth Verlag, 2017
- [2.7] DIN EN 12670:2019-12. Naturstein – Terminologie. Deutsche Fassung EN 12670:2019. Berlin: Beuth Verlag, 2019
- [2.8] Grimm, W.-D.: Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland. Arbeitshefte des Bayrischen Landesamtes für Denkmalpflege, Nr. 50. München, Selbstverlag 1990
- [2.9] Tucker, M.: Einführung in die Sedimentpetrologie. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 1985
- [2.10] Pettijohn, F. J.; Potter, P. E.; Siever, R.: Sand and Sandstone. New York: Springer New York, 1987
- [2.11] Robert L. Folk: Practical Petrographic Classification of Limestones. AAPG Bulletin 43 (1959) Nr. 1, S. 1–38
- [2.12] Dunham, R. J.: Classification of carbonate rocks according to depositional texture. Memoir – American Association of Petroleum Geologists 1 (1962), S. 108–121
- [2.13] Reinsch, D.: Natursteinkunde: eine Einführung für Bauingenieure, Architekten, Denkmalpfleger und Steinmetze. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 1991
- [2.14] Pentecost, A.: Travertine. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005
- [2.15] Webb, A. H.; Bawden, R. J.; Busby A. K.; Hopkins, J. N.: Studies on the effects of air pollution on limestone degradation in Great Britain. Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere 26 (1992), S. 165–181
- [2.16] Bucher, K.; Grapes, R.: Petrogenesis of Metamorphic Rocks. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag, 2011
- [2.17] Vitruvius; Rode, A. (Übers.): Des Marcus Vitruvius Pollio Baukunst, Band 1. Leipzig: bey Georg Joachim Göschen, 1796. URL: <http://digi.ub.uni-heidelberg.de/diglit/vitruvius1796a/0001/image?sid=55caed7fda2d1eb3043433bda2d0df39> [Stand: 19.08.2020]
- [2.18] Schmidt, H.: Rohstoffkenndaten der verschiedenen Erzeugnisarten der Ziegelindustrie. ZI Ziegelindustrie (1973), Nr. 7
- [2.19] Bender, W.: Vom Ziegelgott zum Industrieelektroniker – Geschichte der Ziegelherstellung von den Anfängen bis Heute. Wetzlar: Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V., 2004
- [2.20] Schüller, K.-H.: Keramik. In: Jasmund, K.; Lagaly, G. (Hrsg.): Tonminerale Und Tone. Darmstadt: Steinkopff Verlag, 1993, S. 266–311
- [2.21] Cultrone, G.; Rodriguez-Navarro, C.; Sebastian, E.; Cazalla, O.; De La Torre, M. J.: Carbonate and silicate phase reactions during ceramic firing. European Journal of Mineralogy 13 (2001), S. 621–634
- [2.22] Neroth, G.; Vollenschaar, D.: Keramische Baustoffe. In: Wendehorst Baustoffkunde. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011, S. 505–554
- [2.23] Earth Architecture. URL: <http://eartharchitecture.org> [Stand: 19.08.2020]

- [2.24] Jiyao, H.; Weitung, J.: Earth – culture – architecture: the protection and development of rammed earth and adobe architecture in China. In: 6th International Conference on the Conservation of Earthen Architecture (1990), S. 72–76
- [2.25] Tunali, S.: Adobe Structures As Our Cultural Heritage and Their Features. *European Scientific Journal* 1 (2015), S. 103–113
- [2.26] Röhlen, U.; Ziegert, C.: *Lehmbau-Praxis. Planung und Ausführung*. 2. Aufl. Berlin: Beuth Verlag, 2014
- [2.27] DIN 18945:2018-12. *Lehmsteine – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung*. Berlin: Beuth Verlag, 2018
- [2.28] Müller, U.; Ziegert, C.; Kaiser, C.; Röhlen, U.: Eigenschaften industrieller Lehm- bauprodukte für den Mauerwerksbau und Verhalten von Lehmsteinmauerwerk. *Mauerwerk* 16 (2012), S. 17–28
- [2.29] Bourgès, A.; Simon, S.; Müller, U.: The interaction of earthen materials with water in vapor and liquid phase and influences on their weathering behaviour. In: *Pre-Prints of Terra 2003*. S.1–10
- [2.30] Minke, G.: *Handbuch Lehmbau. Baustoffkunde, Techniken, Lehmarchitektur*. Staufen: ökobuch Verlag, 2012
- [2.31] Rich, H.: *Kalksandstein. Die Mauerfibel*. 8. Aufl. Düsseldorf: Verlag Bau+Technik GmbH, 2014
- [2.32] Gerstner, B.; Henning, O.: Phasenbildung und Festigkeitsentwicklung bei der Kalksandsteinbildung. *TIZ – Fachberichte Rohstoff-Engineering* 105 (1981), S. 148–151
- [2.33] DIN V 106:2005-10. *Kalksandsteine mit besonderen Eigenschaften*, Berlin:Beuth Verlag, 2005 (zurückgezogen)
- [2.34] DIN EN 771-2:2015-11. *Festlegungen für Mauersteine – Teil 2: Kalksandsteine; Deutsche Fassung EN 771-2*, Berlin: Beuth Verlag, 2015
- [2.35] DIN EN 771-4:2015-11. *Festlegungen für Mauersteine – Teil 4: Porenbetonsteine. Deutsche Fassung EN 771-4:2011+A1:2015*, Berlin: Beuth Verlag, 2015
- [2.36] DIN 20000-404:2018-04. *Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken – Teil 404: Regeln für die Verwendung von Porenbetonsteinen nach DIN EN 771-4:2015-11*, Berlin: Beuth Verlag, 2018
- [2.37] Field, R. W.: Radon: An Overview of Health Effects. In: *Encyclopedia of Environmental Health*. Amsterdam: Elsevier, 2015, S. 467–475

Kapitel 3

- [3.1] Müller, U. et al.: *Hydraulische Bindemittel*. In: *Vereinigung der Landesdenkmalpfleger in der Bundesrepublik Deutschland*. Petersberg: Michael Imhof Verlag, 2008, S. 9–21
- [3.2] DIN EN 459-1:2015-07. *Baukalk – Teil 1: Definitionen, Anforderungen und Konformitätskriterien*, Deutsche Fassung EN 459-1:2015
- [3.3] Franken, S.; Müller, H.S.: *Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke. Empfehlungen für die Praxis / Historische Mörtel und Reparaturmörtel: Untersuchen, Bewerten, Einsetzen*. Karlsruhe: Universität Karlsruhe, 2001
- [3.4] Althaus, E.: *Kalkbrennen, Baukalk und Kalkmörtel*. *Xantener Berichte: Grabung-Forschung-Präsentation* 5. Köln: Rheinland-Verlag, 1994, S. 17–32
- [3.5] Müller, U.; Kanan, M.I.: The micro structure of traditional Brazilian lime plasters – The Custom House of Florianopolis. In: *Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas – International Symposium on Mortar Technology*. Florianopolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2005, S. 736-745

- [3.6] Hughes, J.J.; Banfill, P.F.G.; Swift, D.S.: The experimental lime kiln: Production and characterisation of sustainable lime binders. In 11th International Congress on the Chemistry of Cement. S. 1 361–1 370
- [3.7] Swallow, P.; Carrington, D.: Limes And Lime Mortars – Part One. *Journal of Architectural Conservation*, 1 (1995), Nr. 3, S. 7–25
- [3.8] Szednyj, I.; Brandhuber, D.: Stand der Technik zur Kalk-, Gips- und Magnesiaherstellung – Beschreibung von Anlagen in Österreich, REP-0128. Wien: Umweltbundesamt, 2007
- [3.9] Elert, K. et al.: Über das Einsumpfen von Kalk: warum sind historische Kalkmörtel so unterschiedlich erhalten? *Restauro: Forum für Restauratoren, Konservatoren und Denkmalpfleger*, 108 (2002), Nr. 7, S. 502–508
- [3.10] Rodriguez-Navarro, C.; Hansen, E.; Ginell, W.S.: Calcium Hydroxide Crystal Evolution upon Aging of Lime Putty. *Journal of the American Ceramic Society* 81 (2005), Nr. 11, S. 3 032–3 034
- [3.11] Middendorf, B. et al.: Investigative methods for the characterisation of historic mortars – Part 1: Mineralogical characterisation. *Materials and Structures* 38 (2005), Nr. 8, S. 761–769
- [3.12] Wang, S.; Althaus, E.: Mineralogische und chemische Untersuchungen römischer Kalkmörtel aus der CUT. *Xantener Berichte: Grabung-Forschung-Präsentation* 5. Köln: Rheinland-Verlag, 1994, S. 33–40
- [3.13] Müller, U. et al.: A Sustainable Approach for the Conservation of the Timur Shah Mausoleum in Kabul, Afghanistan. In: *Proceedings of the 10DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components*. Lyon: CSTB, 2005
- [3.14] Müller, U.; Karotke, E.; Althaus, E.: Der Orakel-Tempel in der Oase Siwa – Mineralogische und chemische Untersuchungen. In: *Das Denkmal und der Lauf der Zeit*. Karlsruhe: Universität Karlsruhe, 1998, S. 47–54
- [3.15] Bundesverband der Gipsindustrie (Hrsg.): *Gips-Datenbuch*. URL: http://www.gips.de/fileadmin/user_upload/gipsdatenbuch_2013.pdf [Stand: 19.08.2020]
- [3.16] Ross, H.; Stahl, F.: *Praxis-Handbuch Putz*. 2. Aufl. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, 1997
- [3.17] Knapp, F.: *Chemical technology or chemistry applied to the arts and to manufactures*, Band 2. Philadelphia: Lea and Blanchard, 1849
- [3.18] Forg, G. et al.: *IGB Handbuch Gipsputze*, Darmstadt: Industriegruppe Baugipse im Bundesverband der Gipsindustrie e. V., 2009
- [3.19] DIN 18550-2:2018-01. *Planung, Zubereitung und Ausführung von Außen- und Innenputzen – Teil 2: Ergänzende Festlegungen zu DIN EN 13914-2:2016-09 für Innenputze*. Berlin: Beuth Verlag, 2015
- [3.20] Verein Deutscher Zementwerke e. V. (Hrsg.): *Zement – Taschenbuch 2008*, 51. Ausgabe. Düsseldorf: Verlag Bau+Technik GmbH, 2008. URL: <https://www.vdz-online.de/wissensportal/publikationen/zement-taschenbuch-2008> [Stand: 19.08.2020]
- [3.21] Locher, F.W.: *Cement: principles of production and use*. Erkrath: Verlag Bau + Technik GmbH, 2005
- [3.22] DIN EN 197-2:2014-05. *Zement – Teil 2: Konformitätsbewertung*. Deutsche Fassung EN 197-2:2014
- [3.23] Buschmann, W.: *Rheinische Industriekultur – Bonner Zementfabrik*. URL: <http://www.rheinische-industriekultur.de/objekte/Bonn/zementwerk/zementfabrik.html> [Stand: 19.08.2020]

- [3.24] Pane, I.; Hansen, W.: Investigation of blended cement hydration by isothermal calorimetry and thermal analysis. *Cement and Concrete Research*, 35 (2005), Nr. 6, S. 1 155–1 164
- [3.25] DIN EN 197-1:2011-11. Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement. Deutsche Fassung EN 197-1:2011
- [3.26] InformationsZentrum Beton GmbH (Hrsg.): Zemente und ihre Herstellung. Zement-Merkblatt Betontechnik. Düsseldorf: September 2017. URL: <https://www.beton.org/service/zement-merkblaetter/> [Stand: 19.08.2020]
- [3.27] Varas, M. J.; de Buergo, M. A.; Fort, R.: The origin and development of natural cements: The Spanish experience. *Construction and Building Materials*, 21 (2007), Nr. 2, S. 436–445
- [3.28] Hughes, D. C.; Weber, J.; Kozłowski, R.: Roman cement for the production of conservation mortars. In: *Preprints of 2nd Historic Mortars Conference & Rilem TC 203-RHM Repair Mortars for Historic Masonry Final Workshop*. S. 22–24
- [3.29] Hughes, D.; Swann, S.; Gardner, A.: Roman cement – Part Two: Stucco and decorative elements, a conservation strategy. *Journal of Architectural Conservation*, 13 (2007), Nr. 3, S. 41–58
- [3.30] Wilk, D.; Bratasz, Ł.; Kozłowski, R.: Shrinkage cracking in Roman cement pastes and mortars. *Cement and Concrete Research* 53 (2013), S. 168–175
- [3.31] Weber, J. et al.: Roman Cement Mortars in Europe’s Architectural Heritage of the 19th Century. *Journal of ASTM International*, 4 (2007), Nr. 8
- [3.32] DIN 18946:2018-12 Lehmmauermörtel – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung.
- [3.33] DIN 18947:2018-12 Lehmputzmörtel – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung.

Kapitel 4

- [4.1] Verein Deutscher Zementwerke e. V. (Hrsg.): Zement – Taschenbuch 2002. 52. Ausgabe. Düsseldorf: Verlag Bau+Technik GmbH, 2008. URL: <https://www.vdz-online.de/wissensportal/publikationen/zement-taschenbuch-2008> [Stand: 19.08.2020]
- [4.2] Lamprecht, H. O.: *Opus caementitium: Bautechnik der Römer*. Erkrath: Verlag Bau+Technik Verlag, 1996
- [4.3] DIN EN 206:2017-01. Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013+A1:2016, Berlin: Beuth Verlag, 2017
- [4.4] Yuksel, I.: Blast furnace slag. In: *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete*. Amsterdam: Elsevier, 2018, S. 361–415
- [4.5] Müller, H. S.; Guse, U.; Schneider, E.: Leistungsfähigkeit von Betonen mit Flugasche. *Beton- und Stahlbetonbau* 100 (2005), S. 693–704
- [4.6] Lewis, R. C.: Silica Fume. In: *RILEM State-of-the-Art Reports 25*. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag, 2018, S. 99–121
- [4.7] Joshaghani, A.; Moazenian, A.; Abubakar Shuaibu, R.: Experimental Study on the Use of Trass as a Supplementary Cementitious Material in Pervious Concrete. *Environmental Science and Engineering* 6 (2017), S. 39–52
- [4.8] Förstner, U.: Petrographische Untersuchungen des Suevit aus den Bohrungen Deiningen und Wörnitzostheim im Ries von Nördlingen. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 15 (1967), S. 281–308
- [4.9] Verein Deutscher Zementwerke e. V.: *Betonzusätze. Zusatzmittel und Zusatzstoffe*. Zement-Merkblatt Betontechnik. Düsseldorf: Februar 2014

- [4.10] Hoffmann, C.; Jacobs, F.: Überblick über Regelungen zu Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung. *Beton- und Stahlbetonbau* 105 (2010), Nr. 12, S.805–812
- [4.11] Momber, A.; Schulz, R.-R.: Betongefüge und Verbund zwischen Bewehrung und Beton. In: *Handbuch der Oberflächenbearbeitung – Beton*. Basel: Birkhäuser Basel, 2006, S. 599–634
- [4.12] Eßer, A.; Schöppel, K.: Schäden an Parkdecks mit unzureichender rissbreitenbeschränkender Bewehrung. *Beton- und Stahlbetonbau* 99 (2004), S.726–734
- [4.13] Speier, L.; Görtz, S.; Rath, T.: Einsatz von GFK-Bewehrung bei der Ausführung des U-Bahnhofs Brandenburger Tor. *Bautechnik* 82 (2005), S.614–624
- [4.14] Suter, R.; Bergmeister, K.: Tübbinge aus Stahlfaserbeton: Optimierung der Bewehrung durch experimentelle Untersuchungen. *Beton- und Stahlbetonbau* 99 (2004), S.858–864
- [4.15] Offermann, P.; Engler, T.; Gries, T.; Roye, A.: Technische Textilien zur Bewehrung von Betonbauteilen. *Beton- und Stahlbetonbau* 99 (2004), S.437–443
- [4.16] Flansbjerg, M.; Williams Portal, N.; Vennetti, D.; Müller, U.: Composite Behaviour of Textile Reinforced Reactive Powder Concrete Sandwich Façade Elements. *International Journal of Concrete Structures and Materials* 12 (2018) S.1–17
- [4.17] Orłowsky, J.; Raupach, M.: Textile reinforced concrete – from research to application. *Cement, Wapno, Beton* 16 (2011), Nr. 6, S.323–331
- [4.18] Lancaster, L.C.: *Concrete Vaulted Construction in Imperial Rome*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005
- [4.19] Mark, R.; Hutchinson, P.: On the Structure of the Roman Pantheon. *The Art Bulletin* 68 (1986), Nr. 1, S.24–34
- [4.20] Müller, U. et al.: Hydraulische Bindemittel. In: *Vereinigung der Landesdenkmalpfleger in der Bundesrepublik Deutschland*. Petersberg: Michael Imhof Verlag, 2008, S.9–21
- [4.21] Brunsch, T.: *Die historische Verwendung zementgebundener Kunststeine im Außenraum – Im 19. und frühen 20. Jahrhundert unter besonderer Berücksichtigung Berlins und Brandenburgs*. Berlin: Technischen Universität Berlin, 2006
- [4.22] Hellebois, A. et al.: 100-year-old Hennebique concrete, from composition to performance. *Construction and Building Materials* 44 (2013), S.149–160
- [4.23] Heidenreich, E.L.: *Engineers' pocketbook of reinforced concrete*. Chicago/New York: M.C. Clark Publishing Co., 1902
- [4.24] Cembureau. URL: <https://cembureau.eu> [Stand: 19.08.2020]
- [4.25] Neroth, G.; Vollenschaar, D.: *Beton*. In: *Wendehorst Baustoffkunde: Grundlagen – Baustoffe – Oberflächenschutz*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011, S.247–381
- [4.26] DIN 1045-2:2008-08. *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1*. Berlin: Beuth Verlag, 2008
- [4.27] Schüttler, I.: Mehr Flexibilität in der Betonfertigteileindustrie. *Betonwerk und Fertigteil-Technik* 67 (2001), Nr. 2, S.76–78
- [4.28] Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D.: *Beton Kalender – Bauen im Bestand – Brücken*. Berlin: Ernst & Sohn, 2015
- [4.29] Scrivener, K.L.: Historical and Present Day Applications of Calcium Aluminate Cements. In: *International Conference on Calcium Aluminate Cements (CAC)*, 2001. S.3–23
- [4.30] Lutze, D.; vom Berg, W.: *Handbuch Flugasche im Beton: Grundlagen der Herstellung und Verwendung*, Erkrath: Verlag Bau+Technik, 2009

Kapitel 5

- [5.1] Houben, H.; Guillaud, H.: *Earth Construction: A Comprehensive Guide*. Bradford: ITDG Publishing, 1994
- [5.2] Röhlen, U.; Ziegert, C.: *Lehmbau-Praxis. Planung und Ausführung*. 3. Aufl. Berlin: Beuth Verlag, 2020
- [5.3] Maniatidis, V.; Walker, P. A.: *Review of Rammed Earth Construction. Developing rammed earth for UK housing*. Bath: University of Bath, 2003, S. 109
- [5.4] Jaquin, P.; Augarde, C.; Gerrard, C.: *Historic Rammed Earth Structures in Spain, Construction Techniques and a Preliminary Classification*. In: *International Symposium on Earthen Structures*. Bangalore: 2007
- [5.5] *Strasse der Moderne* (Hrsg.): Berlin-Mitte: Kapelle der Versöhnung. URL: <http://www.strasse-der-moderne.de/portfolio/berlin-kapelle-der-versoehnung/> [Stand: 19.08.2020]
- [5.6] *Baunetz Wissen* (Hrsg.): *Kirche und Gemeindezentrum in Karlsruhe*. URL: <https://www.baunetzwissen.de/gesund-bauen/objekte/sonderbauten/kirche-und-gemeindezentrum-in-karlsruhe-2963659> [Stand: 19.08.2020]
- [5.7] *BauNetz Architekten* (Hrsg.): *Stampflehmhaus Ihlow*. URL: <https://www.baunetz-architekten.de/zrs-architekten-ingenieure/1110131/projekt/1143469> [Stand: 19.08.2020]
- [5.8] Pini, D.: *The inventory of the historic city of Sana'a – A tool for urban conservation*. Paris: UNESCO Press, 2008
- [5.9] Wang, S. P.; Huang, J.: *The Research on the Factors of the Fujian Hakka Tulou's Form*. *Applied Mechanics and Materials* (2013), S. 409–410, 366–371
- [5.10] Minke, G.: *Handbuch Lehmbau. Baustoffkunde, Techniken, Lehmmarchitektur, Stufen: ökobuch Verlag*, 2012
- [5.11] Volhard, F.; Röhlen, U.: *Lehmbau Regeln: Begriffe – Baustoffe – Bauteile*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2009
- [5.12] Jayasinghe, C.; Kamaladasa, N.: *Compressive strength characteristics of cement stabilized rammed earth walls*. *Construction and Building Materials* 21 (2007) Nr. 11
- [5.13] Ciancio, D.; Beckett, C. T. S.; Carraro, J. A. H.: *Optimum lime content identification for lime-stabilised rammed earth*. *Construction and Building Materials* 53 (2014)
- [5.14] Miccoli, L.; Oliveira, D. V.; Silva, R. A.; Müller, U.; Schueremans, L.: *Static behaviour of rammed earth: experimental testing and finite element modelling*. *Materials and Structures* 48 (2015), S. 3443–3456
- [5.15] Miccoli, L.; Garofano, A.; Fontana, P.; Müller, U.: *Experimental testing and finite element modelling of earth block masonry*. *Engineering Structures* 104 (2015), S. 80–94
- [5.16] Miccoli, L.; Müller, U.; Fontana, P.: *Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob*. *Construction and Building Materials* 61 (2014), S. 327–339
- [5.17] Miccoli, L.; Drougkas, A.; Müller, U.: *In-plane behaviour of rammed earth under cyclic loading: Experimental testing and finite element modelling*. *Engineering Structures* 125 (2016), S. 144–152
- [5.18] Ziegert, C.: *Lehmwellerbau: Konstruktion, Schäden und Sanierung*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2003

- [5.19] Miccoli, L.; Silva Rui, A.; Oliveira Daniel, V.; Müller, U.: Static Behavior of Cob: Experimental Testing and Finite-Element Modeling. *Journal of Materials in Civil Engineering* 31 (2019), Nr.4
- [5.20] da Silva, N.; Mueller, U.; Malaga, K.; Hallingberg, P.; Cederquist, C.: Foam concrete-aerogel composite for thermal insulation in lightweight sandwich facade elements. In: *Concrete* 2015. S. 1 355–1 362

Kapitel 6

- [6.1] Piovesan, R.; Mazzoli, C.; Maritan, L.; Cornale, P.: Fresco and lime-paint: An experimental study and objective criteria for distinguishing between these painting techniques. *Archaeometry* 54 (2012), S. 723–736
- [6.2] Deuerlinger, J.: *Die Bindemittel des Malers*. München: Verlag Georg D.W. Callwey, 1951
- [6.3] Deuerlinger, J.: *Die Farben des Malers*. München: Verlag Georg D.W. Callwey, 1949
- [6.4] Scheppe, H.: *Handbuch der Naturfarbstoffe*, Hamburg: Nikol Verlagsgesellschaft, 1993
- [6.5] Noll, W.: Zur Kenntnis altägyptischer Pigmente und Bindemittel. *Neues Jahrbuch für Mineralogie* 1981, S.416–432
- [6.6] Müller, U.; Weise, F.: Condition assessment of ancient architectural monuments in the Pergamon Museum – Investigation of paint and stone substitute material by micro analytical methods. *Berliner Beiträge zur Archäometrie* 21 (2008), S.13–22
- [6.7] ACI Committee 616: Guide for Painting Concrete (For paints other than portland cement paint), *Journal Proceedings* 53 (1957), Nr. 3
- [6.8] Haller, W.: Silicate paints for exterior use. *Proceedings*. Athens: 14th international conference on organic coatings, 1988, S. 135–141
- [6.9] Müller, U.; Rünzler, H.; Weise, F.: Untersuchung von Farbfassungen an antiken Bauobjekten im Pergamonmuseum in Berlin. In: Grasseger-Schön, G.; Patitz, G. (Hrsg.): *Natursteinsanierung Stuttgart 2004 – Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse und messtechnische Erfassung*. Stuttgart: Siegl Verlag, 2004
- [6.10] O'Brien, W.J.: A Study of Lithopone. *The Journal of Physical Chemistry*. 19 (1915), Nr.2, S. 113–144
- [6.11] Lindenau, J.: Konzentration ist gefragt: Lack und Dispersionsfarbe sind unterschiedliche Beschichtungen. *Farbe und Lack* 7 (2010), S. 1–2
- [6.12] Waite, D.S.: Some Perspectives on Falun Red Paint and the Red Cottage, Sweden's »National Building.« *APT Bulletin: The Journal of Preservation Technology* 32 (2001), Nr.2/3, S.67
- [6.13] Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat BMI, WECOBIS (Hrsg.): Produktgruppeninformation. URL: <http://www.wecobis.de/bauproduktgruppen/oberflaechenbehandlungen/farben-lacke-lasuren.html> [Stand: 19.08.2020]
- [6.14] Bianchetti, P.; Talarico, F.; Vigliano, M.G.; Ali, M.F.: Production and characterization of Egyptian blue and Egyptian green frit. *Journal of Cultural Heritage* 1 (2000), Nr. 2, S. 179–188
- [6.15] Aliatis, I.; Bersani, D.; Campani, E.; Casoli, A.; Lottici, P.P.; Mantovan, S.; Marino, I.-G.: Pigments used in Roman wall paintings in the Vesuvian area. *Journal of Raman Spectroscopy* 41 (2010), Nr. 11, S. 1 537–1 542

- [6.16] Polette-Niewold, L.A.; Manciu, F.S.; Torres, B.; Alvarado, M.; Chianelli, R.R.: Organic/inorganic complex pigments: Ancient colors Maya Blue. *Journal of inorganic Biochemistry* 101 (2007), Nr. 11/12, S. 1958–1973
- [6.17] Schramm, H.-P.: *Historische Malmaterialien und ihre Identifizierung*. Graz: Akademische Druck- u. Verlagsanstalt, 1988

Kapitel 7

- [7.1] Frank, A.L.; Joshi, T.K.: The Global Spread of Asbestos. *Annals of Global Health* 80 (2018), Nr. 4, S. 257–262
- [7.2] Klos, H.: *Asbestzement*. Wien: Springer Verlag, 1967
- [7.3] Hendry, N.W.: The geology, occurrences, and major uses of asbestos. *Annals of the New York Academy of Sciences* 132 (1965), Nr. 1, S. 12–21
- [7.4] Hünnerberg, K.: Asbestzement-Druckrohre. In: *AZ, Handbuch Für Asbestzementrohre*. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag, 1968, S. 14–82
- [7.5] World Health Organization WHO: Asbestos in drinking-water. Bericht der World Health Organization. URL: https://www.who.int/water_sanitation_health/water-quality/guidelines/chemicals/asbestos.pdf [Stand: 19.08.2020]
- [7.6] Sporn, T.A.: Mineralogy of Abestos. In: Tannapfel, A. (Hrsg.); *Malignant Mesothelioma*. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag, 2011, S. 1–11
- [7.7] Cavallo, A.; Rimoldi, B.: Chrysotile asbestos in serpentinite quarries: A case study in Valmalenco, Central Alps, Northern Italy. *Environmental Science: Processes and Impacts* 15 (2013), Nr. 7, S. 1341

Kapitel 8

- [8.1] Brill, R.: The Structure of Ice. *Angewandte Chemie International Edition in English* 1 (1962), Nr. 11, S. 563–567
- [8.2] Strunz, H.: *Mineralogische Tabellen*. 7. Aufl. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, 1978
- [8.3] Gopi, S.P.; Subramanian, V.K.: Polymorphism in CaCO₃ – Effect of temperature under the influence of EDTA (di sodium salt). *Desalination* 297 (1978), S. 38–47
- [8.4] Stepkowska, E.T.; Pérez-Rodríguez, J.L.; Sayagués, M.J.; Martínez-Blanes, J.M.: Calcite, vaterite and aragonite forming on cement hydration from liquid and gaseous phase. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 73 (2003), S. 247–269
- [8.5] Poole, A.; Sims, I. (Hrsg.): *Concrete Petrography*. 2. Aufl. Boca Raton: CRC Press, 2016
- [8.6] Spektrum.de: Stereomikroskopie. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/optik/stereomikroskopie/3205>. [Stand: 03.11.2020]
- [8.7] Nesse, W.: *Introduction to Optical Mineralogy*. 4. Aufl. Oxford: Oxford University Press, 2012
- [8.8] Träger, W.E.: *Optische Bestimmung der gesteinsbildenden Minerale*, 4. Aufl. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1971
- [8.9] Elsen, J.: Microscopy of historic mortars – a review. *Cement and Concrete Research* 36 (2006), Nr. 8, S. 1416–1424
- [8.10] Larbi, J.A.; Van Hees, R.P.J.: Quantitative microscopical procedure for characterising mortars in historical buildings. Weimar: Ibausil, 14. Internationale Baustofftagung Weimar, 2000
- [8.11] Lindqvist, J.E.; Sandström, M.: Quantitative analysis of historical mortars using optical microscopy. *Materials and Structures* 33 (2000), S. 612–617

- [8.12] Nordtest (Hrsg.): NT BUILD 361, 1999-11. Concrete, hardened: Water-cement ratio. November 1999
- [8.13] DIN EN 12407:2019-12. Prüfverfahren für Naturstein – Petrographische Prüfung; Deutsche Fassung EN 12407:2019
- [8.14] Fernandes, I.; Anjos Ribeiro, M.; Broekmans, M. a. T. M.; Sims, I: Petrographic Atlas: Characterisation of Aggregates Regarding Potential Reactivity to Alkalis. Dordrecht: Springer Verlag, 2016
- [8.15] Müller, U.; Bürgisser, P.; Weise, F.; Meng, B.: The natural pozzolana 'Rhenish trass' and its effect on ASR in concrete. Mérida: Sixth International Conference Concrete under Severe Conditions Environment & Loading – CONSEC10, 2010, S. 313–320
- [8.16] Heilbronner, R.; Barrett, S.: Image Analysis in Earth Sciences. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag, 2014
- [8.17] Russ, J. C.: The Image Processing Handbook. 6. Aufl. Boca Raton: CRC Press, 2016
- [8.18] DIN EN 480-11:2005-12. Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel – Prüfverfahren – Teil 11: Bestimmung von Luftporenkennwerten in Festbeton
- [8.19] Jakobsen, U. H.; Pade, C.; Thaulow, N.; Brown, D.; Sahu, S.; Magnusson, O.; De Buck, S.; De Schutter, G.: Automated air void analysis of hardened concrete – a Round Robin study. Cement and Concrete Research 36 (2006), S. 1 444–1 452
- [8.20] Goldstein, J. I.; Newbury, D. E.; Michael, J. R.; Ritchie, N. W. M.; Scott, J. H. J.; Joy, D. C.: Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis. 4. Aufl. New York City: Springer US, 2017
- [8.21] Scrivener, K. L.; Bazzoni, A.; Mota, B.; Rossen, J. E.: Electron microscopy. In: Scrivener, K.; Snellings, R.; Lothenbach, B. (Hrsg.): A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials. Boca Raton: CRC Press, 2016, S. 351–418
- [8.22] Scrivener, K. L.: Backscattered electron imaging of cementitious microstructures: Understanding and quantification. Cement and Concrete Research 23 (2004), S. 935–945
- [8.23] Rübner, K.; Hoffmann, D.: Characterization of Mineral Building Materials by Mercury-Intrusion Porosimetry. Particle & Particle Systems Characterization 23 (2006), Nr. 1, S. 20–28
- [8.24] Berodier, E.; Bizzozero, J.; Muller, A. C. A.: Mercury intrusion porosimetry. In: Scrivener, K.; Snellings, R.; Lothenbach, B. (Hrsg.): A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials. Boca Raton: CRC Press, 2016, S. 419–444
- [8.25] Winnefeld, F.; Schöler, A.; Lothenbach, B.: Sample preparation. In: Scrivener, K.; Snellings, R.; Lothenbach, B. (Hrsg.): A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials. Boca Raton: CRC Press, 2016, S. 177–212
- [8.26] Heimann, R.: X-Ray Powder Diffraction (XRPD). In: Hunt, A. (Hrsg.): The Oxford Handbook of Archaeological Ceramic Analysis. Oxford: Oxford University Press, 2016, S. 326–341
- [8.27] Dorset, D. L.: X-ray Diffraction: A Practical Approach. Microscopy and Microanalysis 4 (1998), Nr. 5, S. 513–515
- [8.28] Snellings, R.: X-ray powder diffraction applied to cement. In: Scrivener, K.; Snellings, R.; Lothenbach, B. (Hrsg.): A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials. Boca Raton: CRC Press, 2016, S. 177–212
- [8.29] Smykatz-Kloss, W.: Differential Thermal Analysis. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag, 1974

- [8.30] Lothenbach, B.; Durdzinski, P.; Weerdt, K.: Thermogravimetric analysis. In: Scrivener, K.; Snellings, R.; Lothenbach, B. (Hrsg.): *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*. Boca Raton: CRC Press, 2016, S. 177–212
- [8.31] Kafle, B.P.: Infrared (IR) spectroscopy. In: *Chemical Analysis and Material Characterization by Spectrophotometry*. Amsterdam: Elsevier, 2020, S. 199–243
- [8.32] Margenot, A. J.; Calderón, F. J.; Goyne, K. W.; Mukome, F. N.; Parikh, S. J.: IR Spectroscopy, Soil Analysis Applications. In: *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry*. Amsterdam: Elsevier, 2017, S. 448–454
- [8.33] Fringeli, U.P.: ATR and Reflectance IR Spectroscopy, Applications. In: *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry*. Amsterdam: Elsevier, 2017, S. 115–129
- [8.34] Vahur, S.; Teearu, A.; Leito, I.: ATR-FT-IR spectroscopy in the region of 550–230 cm^{-1} for identification of inorganic pigments. *Spectrochimica Acta Part A, Molecular and biomolecular spectroscopy* 75 (2010), Nr. 3, S. 1 061–1 072
- [8.35] John, N.; George, S.: Raman Spectroscopy. In: *Spectroscopic Methods for Nanomaterials Characterization*. Amsterdam: Elsevier, 2017, S. 95–127
- [8.36] Bersani, D.; Lottici, P.P.: Raman spectroscopy of minerals and mineral pigments in archaeometry. *Journal of Raman Spectroscopy* 47 (2016), Nr. 5, S. 47, 499–530
- [8.37] Beckhoff, B.; Kanngießler, B.; Langhoff, N.; Wedell, R.; Wolff, H. (Hrsg.): *Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis*. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag, 2006
- [8.38] Kramar, U.: X-Ray Fluorescence Spectrometers. In: *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry*. Amsterdam: Elsevier, 2017, S. 695–706
- [8.39] Haschke, M.: *Laboratory Micro-X-Ray Fluorescence Spectroscopy. Instrumentation and Applications*. Basel: Springer International Publishing, 2014
- [8.40] Müller, U.; Kanan, M. I.: The micro structure of traditional Brazilian lime plasters – The Custom House of Florianopolis. In: Cincotto, M. A.; da Silva, D. A.; de Oliveira, J.; Roman, H. R. (Hrsg.): *VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas – I International Symposium on Mortar Technology*. Florianopolis: UFSC-Universidade Federal de Santa Catarina, 2005, S. 736–745
- [8.41] Franken, S.; Müller, H. S.: *Historische Mörtel und Reparaturmörtel*. Karlsruhe: Universität Karlsruhe, 2001
- [8.42] Wisser, S.; Knöfel, D.: Untersuchung an historischen Putz- und Mauermörtel: Teil 1, Analysengang, Bautenschutz und Bausanierung 10 (1987), S. 124–126
- [8.43] Boynton, R. S.: *Chemistry and technology of lime and limestone*. 2. Aufl. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 1980
- [8.44] Knöfel, D.; Schubert, P.: *Handbuch: Mörtel und Steinerfüllstoffe in der Denkmalpflege*. Berlin: Ernst & Sohn, 1993
- [8.45] Blaeuer, C.: Assessment of quantitative salt analysis by the water extraction method on lime mortars. Berlin: 8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, 1996, S. 1 505-1 519
- [8.46] WTA (Hrsg.): *Merkblatt Zerstörungsfreies Entsalzen von Naturstein und anderen porösen Baustoffen mittels Kompressen*. München: Februar 2003 (3-12-01/D)
- [8.47] Leschnik, W.: *Feuchtemessung an Baustoffen. Feuchtetag '99*. Berlin:– BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 1999
- [8.48] WTA (Hrsg.): *Merkblatt. Messung der Feuchte von mineralischen Baustoffen*. München: Oktober 2003 (4-11-02/D)

Kapitel 9

- [9.1] Vilches, A.; Garcia-Martinez, A.; Sanchez-Montañes, B.: Life cycle assessment (LCA) of building refurbishment: A literature review. *Energy and Buildings* 135 (2016), S. 286–301
- [9.2] Torraca, G.: *Lectures on Materials Science for Architectural Conservation*. Los Angeles: The Getty Conservation Institute, 2009
- [9.3] Viitanen, H.; Vinha, J.; Salminen, K.; Ojanen, T.; Peuhkuri, R.; Paajanen, L.; Lähdesmäki, K.: Moisture and Bio-deterioration Risk of Building Materials and Structures. *Journal of Building Physics* 33 (2010), Nr. 3, S. 201–224
- [9.4] Scherer, G. W.: Stress from crystallization of salt in pores. In: *Proceedings of the 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*. Amsterdam: Elsevier, 2000, S. 187–194
- [9.5] Hörenbaum, W.: *Verwitterungsmechanismen und Dauerhaftigkeit von Sandsteinsichtmauerwerk*. Karlsruhe: Universität Fridericiana zu Karlsruhe, 2005
- [9.6] Rübner, K.; Hoffmann, D.: Characterization of Mineral Building Materials by Mercury-Intrusion Porosimetry. *Particle and Particle System Characterization* 23 (2006), Nr. 1, S. 20–28
- [9.7] Rübner, K.; Meng, B.; Müller, U.: Investigation of the original water content. In: Maierhofer, C.; Reinhardt, H. W.; Dobmann, G. (Hrsg.): *Non-Destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2010
- [9.8] Klopfer, H.: Feuchte. In: *Lehrbuch Der Bauphysik: Schall – Wärme – Feuchte – Licht – Brand – Klima*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2002, S. 329–472
- [9.9] Ricken, T.: Transport of fluids in capillary porous solids. *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics* 2 (2003), Nr. 1, S. 384–385
- [9.10] Butt, H.-J.; Graf, K.; Kappl, M.: *Liquid Surfaces*. In: *Physics and Chemistry of Interfaces*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2004, S. 4–25
- [9.11] Hörenbaum, W.: *Verwitterungsmechanismen und Dauerhaftigkeit von Sandsteinsichtmauerwerk*. Karlsruhe: Universität Fridericiana zu Karlsruhe, 2005
- [9.12] Krischer, O.: Die Vorgänge bei der Trocknung fester Stoffe. In: Krischer, O.; Kröll, K. (Hrsg.): *Die Wissenschaftlichen Grundlagen Der Trocknungstechnik*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 1956, S. 233–293
- [9.13] Karoglou, M.; Moropoulou, A.; Maroulis, Z. B.; Krokida, M. K.: Water Sorption Isotherms of Some Building Materials. *Drying Technology* 23 (2005), Nr. 1/2, S. 289–303
- [9.14] Mihalka, P.; Matiasovsky, P.: Water Vapour Sorption and Hysteresis Models Applicable for Silicate Building Materials. *Advanced Materials Research* 1126 (2015), S. 111–116
- [9.15] Aharoni, C.: Adsorption and Condensation in Pores. *Langmuir* 14 (1998), S. 3339–3342
- [9.16] Everett, D. H.: The thermodynamics of frost damage to porous solids. *Transactions of the Faraday Society* 57 (1961), S. 1541
- [9.17] Brady, J. B.: Magma in a beaker: analog experiments with water and various salts or sugar for teaching igneous petrology. *The Canadian Mineralogist* 47 (2009), Nr. 2, S. 457–471
- [9.18] Stark, J.; Wicht, B.: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton. In: *Dauerhaftigkeit von Beton*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2013, S. 399–471
- [9.19] Wessman, L.: *Studies on the frost resistance of natural stone*. Lund: Lund Institute of Technology, 1997

- [9.20] Setzer, M.: Frost-attack on concrete – modeling by the micro-ice-lens model – evaluating by RILEM CIF test. In: Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures. London: Taylor & Francis, 2008, S. 971–977
- [9.21] Powers, T. C.; Helmuth, R. A.: Theory of volume changes in hardened portland-cement paste during freezing In: Proceedings of the Thirty-Second Annual Meeting of the Highway Research Board. Washington D. C.: Highway Research Board, 1953, S. 285–297
- [9.22] Post, M.; Schmidt, P.: Feuchteschutz. In: Lohmeyer Praktische Bauphysik: Eine Einführung mit Berechnungsbeispielen. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2019, S. 353–478
- [9.23] Faller, A.; Karotke, E.: Die Rolle der Feuchte bei der Verwitterung von Baustoffen durch Salze. In: Wenzel, F. (Hrsg.): Sonderheft 1988: Feuchteschutz Bei Historischen Mauerwerksbauten. Karlsruhe: Universität Karlsruhe, 1988, S. 63–70
- [9.24] Müller, U.; Pliett, H.; Kuhlmann, K. P.; Wenzel, F.: Structural preservation of the temple of the oracle in Siwa Oasis, Egypt. Conservation and Management of Archaeological Sites 5 (2002), Nr. 4, S. 215–230
- [9.25] Pöhl, W.-H.; Köstner, E.: Widerstandsfähigkeit von Baustoffen gegen aggressive Schadstoffemission der Luft – Teil 1: Zementgebundene und andere mineralische Baustoffe. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 1989
- [9.26] Steiger, M.; Neumann, H.-H.; Grodten, T.; Wittenburg, C.; Dannecker, W.: Salze in Natursteinmauerwerk – Probenahme, Messung und Interpretation. In: Denkmalpflege und Naturwissenschaft – Natursteinkonservierung I. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 1998, S. 61–91
- [9.27] Espinosa-Marzal, R. M.; Scherer, G. W.: Advances in Understanding Damage by Salt Crystallization. Accounts of Chemical Research 43 (2010), Nr. 6, S. 897–905
- [9.28] Steiger, M.: Salts in Porous Materials: Thermodynamics of Phase Transitions, Modeling and Preventive Conservation. Restoration of Buildings and Monuments 11 (2005), Nr. 6
- [9.29] Garrecht, H.; Hilsdorf, H. K.; Kropp, J.: Einfluß von Salzen auf die hygrischen Eigenschaften mineralischer Baustoffe. In: Wenzel, F.; Schmidt, H. (Hrsg.): Untersuchungen an Material und Konstruktion Historischer Bauwerke, Arbeitshefte 10/1991. Karlsruhe: Universität Karlsruhe, S. 39–41
- [9.30] WTA Merkblatt 4-4-04/D: Mauerwerksinjektion gegen kapillare Feuchtigkeit. München: 2003
- [9.31] WTA Merkblatt 4-7-02/D: Nachträgliche mechanische Horizontalsperren. München: 2002
- [9.32] WTA Merkblatt 2-9-04/D: Sanierputzsysteme. München: 2005
- [9.33] WTA Merkblatt 2-10-06/D: Opferputze. München: 2006
- [9.34] WTA Merkblatt 3-13-01/D: Zerstörungsfreies Entsalzen von Naturstein und anderen porösen Baustoffen mittels Kompressen. München: 2003
- [9.35] Richardt, K.: Kompressenentsalzung – Mechanismen der Salzbindung an mineralische Zusätze. Hannover: Universität Hannover, 2002
- [9.36] Dannecker, W.; Steiger, M.: Der Einfluß von Luftschadstoffen auf die Verwitterung von Natursteinen. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Jahresberichte Steinzerfall – Stein-Konservierung. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, 1990, S. 115–129
- [9.37] Pöhl, W.-H.; Köstner, E.: Widerstandsfähigkeit von Baustoffen gegen aggressive Schadstoffemission der Luft – Teil 1: Zementgebundene und andere mineralische Baustoffe. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 1989

- [9.38] Johnson, J. B.; Haneef, S. J.; Dickinson, C.; Thompson, G. E.; Wood, G. C.: Laboratory exposure chamber studies: pollutant and acid rain presentation rates and stone degradation. In: Baer, N. S.; Sabbioni, C.; Sors, A. I. (Hrsg.): *Science, Technology and European Cultural Heritage*. Amsterdam: Elsevier, 1991, S. 474–477
- [9.39] Butlin, R. N.: Effects of air pollutants on buildings and materials. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh, Section B: Biological Sciences* 97 (1990), S. 255–272
- [9.40] Sand, W.; Ahlers, B.; Bock, E.: The impact of microorganisms – especially nitric acid producing bacteria – on the deterioration of natural stones. In: Baer, N. S.; Sabbioni, C.; Sors, A. I. (Hrsg.): *Science, Technology and European Cultural Heritage*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1991, S. 481–484
- [9.41] Müller, U.: The mineralogical composition of sandstone and its effect on sulphur dioxide deposition. *Materiales de Construcción* 58 (2008), S. 81–95
- [9.42] Müller, U.: *Sandsteinverwitterung an historischen Bauwerken unter dem Einfluss von Schwefeldioxid und Feuchte*. Karlsruhe: Universität Fridericiana Karlsruhe, 1999
- [9.43] Saiz-Jimenez, C.; Bernier, F.: Gypsum crusts on buildings stones: a scanning electron microscopy study. In: *ICOM Committee for Conservation 6th Triennial Meeting*. Ottawa: 1981
- [9.44] Siegesmund, S.; Ruedrich, J.; Koch, A.: Marble bowing: Comparative studies of three different public building facades. *Environmental Geology* 56 (2008), S. 473–494
- [9.45] Spagnoli, A.; Ferrero, A. M.; Migliazza, M.: A micromechanical model to describe thermal fatigue and bowing of marble. *International Journal of Solids and Structures* 48 (2011), Nr. 18, S. 2 557–2 564
- [9.46] Schouenborg, B.; Grelk, B.; Malaga, K.: Testing and Assessment of Marble and Limestone (TEAM)—Important Results from a Large European Research Project on Cladding Panels. In: Hoigard, K.; Scheffler, M. (Hrsg.): *Dimension Stone Use in Building Construction*. Consohocken: ASTM International, 2007
- [9.47] Stark, J.; Wicht, B.: Carbonatisierung von Beton. In: *Dauerhaftigkeit von Beton*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2014, S. 103–160
- [9.48] Stark, J.; Wicht, B.: Einwirkung von Chloriden auf Beton. In: *Dauerhaftigkeit von Beton*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2013, S. 263–298
- [9.49] Nürnberger, U.: Korrosion und Korrosionsschutz im Betonbau. In: *Korrosion Und Korrosionsschutz*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2001, S. 3 075–3 191
- [9.50] Rieche, G.; Wehrle, S.: Baupraktische Erfahrungen bei der Instandsetzung chloridbelasteter Parkhäuser aus Stahlbeton. *Schadensdiagnose, Instandsetzungsmaßnahmen, Erfahrungen*. *Materials and Corrosion* 53 (2002), Nr. 6, S. 401–407
- [9.51] Geiker, M.; Nielsen, E. P.; Herfort, D.: Prediction of chloride ingress and binding in cement paste. *Materials and Structures* 40 (2007), S. 405–417
- [9.52] Luping, T.; Utgenannt, P.; Fidjestøl, P.: Evaluation of Chloride-Induced Corrosion of Steel in Concrete after Long-Time Exposure in a Marine Environment. *SP Report* 54 (2005)
- [9.53] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) (Hrsg.): *Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen*. Berlin: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 2001
- [9.54] Raupach, M.; Orlowski, J.: *Schutz und Instandsetzung von Betontragwerken*. Düsseldorf: Verlag Bau+Technik, 2008

- [9.55] Stark, J.; Wicht, B.: Alkali-Kieselsäure-Reaktion. In: Dauerhaftigkeit von Beton. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2013, S. 299–398
- [9.56] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) (Hrsg.): Richtlinie Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie). Berlin: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 2013
- [9.57] Gao, X. X.; Multon, S.; Cyr, M.; Sellier, A.: Alkali-silica reaction (ASR) expansion: Pessimism effect versus scale effect. *Cement and Concrete Research* 44 (2013), S. 25–33
- [9.58] Müller, U.; Bürgisser, P.; Weise, F.; Meng, B.: The natural pozzolana 'Rhenish trass' and its effect on ASR in concrete. In: Sixth International Conference Concrete under Severe Conditions Environment & Loading – CONSEC10. Mérida: 2010, S. 313–320
- [9.59] Leroy, R.; Micoulet, G.; Tognola, F.: Rehabilitation of Serra dam (Switzerland) affected by ASR. In: Dam Maintenance and Rehabilitation II – Proceedings of the 2nd International Congress on Dam Maintenance and Rehabilitation. Zaragoza: 2010
- [9.60] Stark, J.; Wicht, B.: Schädigende Ettringitbildung im erhärteten Beton. In: Dauerhaftigkeit von Beton. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2013, S. 209–251
- [9.61] Chabreliè, A.; Gallucci, E.; Mueller, U.; Scrivener, K.: Durability of field concrete made of portland cement and supplementary cementitious materials under several European exposure conditions. In: 1st International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites. Nanjing: 2008, S. 421–427
- [9.62] Taylor, H. F.; Famy, C.; Scrivener, K.: Delayed ettringite formation. *Cement and Concrete Research* 31, S. 683–693
- [9.63] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) (Hrsg.): Richtlinie Wärmebehandlung von Beton. Berlin: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 2012

Kapitel 10

- [10.1] Committee for drafting the International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments: International charter for the conservation and restoration of monuments and sites (The Venice Charter 1964). Venedig: Second International Congress of Architects and Technicians of Historic Monuments, 1964
- [10.2] Wenzel, F. (Hrsg.): Historisches Mauerwerk – Untersuchen, Bewerten und Instandsetzen, Erhalten. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2021
- [10.3] Sneathlage, R.; Pfanner, M.: Leitfaden Steinkonservierung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2020
- [10.4] Doehne, E.; Price, C. A.: Stone Conservation – An Overview of Current Research. Los Angeles: The Getty Conservation Institute, 2010
- [10.5] Fidler, J.: Lime Treatments: Lime Watering and Shelter Coating of Friable Historic Masonry. *APT Bulletin* 26 (1995), Nr. 4, S. 50
- [10.6] Slížková, Z.; Drdáký, M.; Viani, A.: Consolidation of weak lime mortars by means of saturated solution of calcium hydroxide or barium hydroxide. *Journal of Cultural Heritage* 16 (2015), Nr. 4, S. 452–460
- [10.7] Lewin, S. Z.; Baer, N. S.: Rationale of the Barium Hydroxide-Urea Treatment of Decayed Stone. *Studies in Conservation* 19 (1974), Nr. 1, S. 24

- [10.8] Hansen, E.; Doehne, E.; Fidler, J.; Larson, J.; Martin, B.; Matteini, M.; Rodriguez-Navarro, C.; Pardo, E.S.; Price, C.; de Tagle, A.; Teutonico, J.M.; Weiss, N.: A review of selected inorganic consolidants and protective treatments for porous calcareous materials. *Studies in Conservation* 48 (2003), S. 13–25
- [10.9] Keeding, W.: Alkoholische Calciumhydroxid-Dispersionen Charakterisierung – Charakterisierung und Wirkungsweise sowie Prüfung der Anwendbarkeit als strukturelles Festigungsmittel für Kalkputze. Potsdam: Fachhochschule Potsdam, 2005
- [10.10] Daehne, A.; Herm, C.: Calcium hydroxide nanosols for the consolidation of porous building materials – results from EU-STONECORE. *Heritage Science* 1 (2013)
- [10.11] Snethlage, R.: Die Konservierung der Portale und Säulen aus Sandstein. *ICOMOS – Hefte des Deutschen Nationalkomitees* 5 (1992), S. 183–187
- [10.12] Arnold, A.: Moderne alkalische Baustoffe und die Probleme bei der Konservierung von Baudenkmälern. In: *Internationales Kolloquium Natursteinkonservierung*. München: Bayrisches Landesamt für Denkmalpflege, 1985, S. 152–161
- [10.13] Torraca, G.: *Lectures on Materials Science for Architectural Conservation*. Los Angeles: The Getty Conservation Institute, 2009
- [10.14] Ntelia, E.; Karapanagiotis, I.: Superhydrophobic Paraloid B72. *Progress in Organic Coatings* 139 (2020)
- [10.15] Domaslowski, W.; Strzelczyk, A.: Evaluation of applicability of epoxy resins to conservation of stone historic monuments. *Studies in Conservation* 31, S. 126–132
- [10.16] Selwitz, C.: *Epoxy resins in stone conservation*, *Research in Conservation* 7. Los Angeles: The Getty Conservation Institute, 1992
- [10.17] Hansen, E.; Agnew, N.: Consolidation with moisture-curable isocyanates: Polyureas and polyurethanes. In: *Proceedings of The 9th Triennial Meeting of the Committee for Conservation*. Dresden: The International Council of Museums, 1990, S. 557–562
- [10.18] Agnew, N.: The Getty adobe research project at Ford Seldon. Experimental design for a test wall project. In: Grimstad, K. (Hrsg.): *6th International Conference on the Conservation of Earthen Architecture*. Los Angeles: The Getty Conservation Institute, 1990, S. 243–249
- [10.19] Puterman, M.; Jansen, B.; Kober, H.: Development of organosilicone-polyurethanes as stone preservation and consolidation materials. *Journal of Applied Polymer Science* 59 (1996), Nr. 8, S. 1 237–1 242
- [10.20] Wheeler, G.: *Alkoxysilanes and the consolidation of stone*, *Research in Conservation*. Los Angeles: The Getty Conservation Institute, 2005
- [10.21] Chandra, S.; Liping, W.: *Colloidal Silica in Stone Conservation*. *Restoration of Buildings and Monuments* 5 (1999), Nr. 1, S. 15–28
- [10.22] Stepien, P.; Kozłowski, R.; Tokarz, M.: Gypstop – colloidal silica for protective coating of porous building materials: practical experience at the Wawel Castle, Cracow, Poland. *Transmission in the Built Environment* 4 (1993), S. 303–310
- [10.23] Malaga-Starzec, K.; Åkesson, U.; Lindqvist, J.E.; Schouenborg, B.: Microscopic and macroscopic characterization of the porosity of marble as a function of temperature and impregnation. *Construction and Building Materials* 20 (2006), S. 939–947
- [10.24] Vasanelli, E.; Calia, A.; Masieri, M.; Baldi, G.: Stone consolidation with SiO₂ nanoparticles: Effects on a high porosity limestone. *Construction and Building Materials* 219 (2019), S. 154–163

- [10.25] Gheno, G.; Badetti, E.; Brunelli, A.; Ganzerla, R.; Marcomini, A.: Consolidation of Vicenza, Arenaria and Istria stones: A comparison between nano-based products and acrylate derivatives. *Journal of Cultural Heritage* 32 (2018), S. 44–52
- [10.26] Anjos, R. D.; Salomão, R.; Pandolfelli, V.: Colloidal silica as a nanostructured binder for refractory castables. *Refractory Application and News* 11 (2015), S. 16–20
- [10.27] Arkles, B.: Hydrophobicity, Hydrophilicity and Silanes. *Paint and Coatings Industry* 22 (2006), Nr. 10, S. 114
- [10.28] Falchi, L.; Müller, U.; Fontana, P.; Izzo, F. C.; Zendri, E.: Influence and effectiveness of water-repellent admixtures on pozzolana–lime mortars for restoration application. *Construction and Building Materials* 49 (2013), S. 272–280
- [10.29] Weise, F.; Müller, U.: Baustoffliche Untersuchungen am Tuffstein des Charlottenburger Tors. In: Kraus, K. (Hrsg.): *Arkus-Tagung*. Koblenz: Institut für Steinkonservierung (IFS), 2006, S. 59–64
- [10.30] Sauder, M.: Damage caused by water repellent agents—reasons and counter-measures. *Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzung* 5 (1999), S. 311–321
- [10.31] Hilgers, H. A.: Graffiti. *Der aktuelle Begriff* 48 (2005), Nr. 18
- [10.32] Gomes, V.; Dionísio, A.; Pozo-Antonio, J. S.: Conservation strategies against graffiti vandalism on Cultural Heritage stones: Protective coatings and cleaning methods. *Progress in Organic Coatings* 113 (2017), S. 90–109
- [10.33] Urquhard, D.: *The treatment of graffiti on historic surfaces*, Technical Advice Note 18. Edinburgh: Historic Scotland, 1999
- [10.34] Carvalhão, M.; Dionísio, A.: Evaluation of mechanical soft-abrasive blasting and chemical cleaning methods on alkyd-paint graffiti made on calcareous stones. *Journal of Cultural Heritage* 16 (2015), S. 579–590
- [10.35] *Regelwerk für die Bewertung von Verfahren, Technologien und Materialien zur Graffitientfernung und Graffitiprophylaxe (ReGG)*. Berlin: Gütegemeinschaft Anti-Graffiti e. V., 2000
- [10.36] *Technische Lieferbedingungen für Anti-Graffiti-Systeme auf Beton*. Bergisch-Gladbach: Bundesanstalt für Strassenwesen, 2017
- [10.37] Müller, U.; von Weschpfennig, D.; Malaga, K.: Anti-Graffiti-Systeme auf Mauerwerk im Bereich der Bundesfernstraßen. *Bautechnik* 88 (2011), S. 443–450
- [10.38] Müller, U.: Verwendung von Anti-Graffiti-Systemen auf Mauerwerk. *Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen – Brücken- und Ingenieurbau B74* (2010)
- [10.39] *Technische Prüfvorschriften für Anti-Graffiti-Systeme auf Beton*. Bergisch-Gladbach: Bundesanstalt für Strassenwesen, 2012
- [10.40] Gagné, L.: *Evaluation of two sacrificial anti-graffiti polysaccharide coatings for the conservation of outdoor contemporary murals*. Kingston: Queen's University, 2014
- [10.41] Meng, B.; Müller, U.; Garcia, O.; Malaga, K.: Performance of a New Anti-Graffiti Agent Used for Immovable Cultural Heritage Objects. *International Journal of Architectural Heritage* 8 (2014), S. 820–834
- [10.42] Malaga, K.; Müller, U.: Relevance of hydrophobic and oleophobic properties of anti graffiti systems on their cleaning efficiency on concrete and stone surfaces. *Journal of Materials in Civil Engineering* 25 (2013), S. 755–762

STICHWORTVERZEICHNIS

A

Abbindebeschleuniger 90
 Abbindeverzögerer 90
 Absorptionsspektrum 204
 Acrylat 149
 Acrylharz 267
 ~Lack 153
 ~Volltränkung 267
 Adobe 60
 AGS, permanent 290
 AGS, temporär 288
 Ägyptisch Blau 158
 AKR-Gel 255
 al fresco 145
 Alit 98
 Alkalien 255
 Alkalifeldspat 33
 Alkali-Kieselsäurereaktion 254
 Alkali-Richtlinie 257
 Alkydharzlack 153
 al secco 146
 Aluminatzement 128
 amorph 170
 Amphibolschiefer 47
 Analysator 179
 Analyse, chemisch 169
 Analyse, mikrochemisch 14, 190
 Anhydrit 86
 anisotropisch 37
 Antigorit 166
 Anti-Graffiti-System 287
 Anwachssäume 37, 38
 Aragonit 41
 Areniten 39
 Arkosen 39
 Asbest 161
 Asche, vulkanisch 80
 Attenuated Total Reflection 205
 Auflichtmikroskop 186
 Ausgleichsfeuchte 229
 Außenputz 22

B

Backstein 48
 ~Architektur 48
 ~Gotik 48
 Bänderung 32
 Barytwasser 264
 Basalt 33
 Bassanit 90
 Baustellenlehm 107
 Baustoff 12
 ~kunde 11, 16
 ~mineralisch 11
 Belit 98
 Beschichtungssystem 270
 Beton 113
 ~Ware 121
 Beton, römisch 114
 Beton, selbstverdichtend 121
 Beugungsbild 195
 Bewehrung 117
 ~Korrosion 249
 Bewehrungskorrosion, chloridinduziert 252
 Bildanalyse, digital 185
 Bindemittel 73, 115, 147
 Bisphenol A 268
 Blaste 35
 Blauasbest 166
 Bohrkern 177
 Bologna Cocktail 268
 Brandprodukt 73
 Braunasbest 166
 Breccien 40
 Bremsstrahlung 210
 Bruchsteinmauerwerk 23
 B/Z-Verhältnis 217

C

Calcinator 95
 Calcit 41

Calcium

~Aluminat 83, 98
 ~Aluminatmonosulfat-hydrat 99
 ~Hydroxid 98
 ~Silikathydratphase 98
 ~Sulfat 85
 Carbonatgestein 41
 Carbonatisierung 82, 249
 ~Reaktion 82
 Casein 147
 Cementation Index (CI) 217
 Chloridtransport 252
 Chrysotilasbest 166
 CO₂-Emissionen 97
 Compressed Earth Block 62
 C-S-H-Phase 68, 98, 99

D

Dampfdiffusion 148
 ~Vermögen 154
 Darrverfahren 221
 Dazit 33
 Deliqueszenzfeuchte 240
 Detektor 196
 Diagenese 27
 Dicalciumsilikat 78, 83
 Differentialthermoanalyse 200
 Differenzkalorimetrie, dynamisch 200
 Diffraktogramm 196
 Diorit 33
 Dispersionsfarbe 151
 Dolomit 41
 ~Kalk 75
 Drehrohrofen 77, 87, 96
 Druckfestigkeit 63
 Druckfestigkeitsklasse 121
 Druck, osmotisch 236
 Dünnsformat 55
 Dünnschliff 176

Durchfeuchtungsgrad 14, 223
d-Wert 195

E

effektiver W/Z-Wert 120
Eigenschaft, rissüberbrückend 270
Einfluss, dauerhaftigkeitseinwirkend 294
Einflussfaktor 225
Einkomponenten-Silikatfarbe 149
Eisen
~hydroxid 59
~oxid 59
~sulfid 34
Eisenportlandzement 95, 127
Elektron, sekundär 188
Elementverteilung 214
energiedispersive RFA 211
Epoxidharz 268
Erdkruste 24
Erdmantel 24
Ergussgestein 26
Erhärtung 99
Erstarren 99
Erstarrungsbeschleuniger 117
Erstarrungsverzögerer 117
Estrich 85
Eternit 161
Ettringer 36
Ettringit 99
Ettringitbildung, verzögert 259
exotherm 100
exothermer Prozess 200
Expansionsdruck 233

F

Farb
~Mittel 146
~Schatten 292
~Stoff 146–147
Faserbewehrung 118
Faserzement 161

Feldbrandofen 52, 76
Feldspat 39
~Vertreter 33
Ferrit 98
Festigkeitsklasse 121
Festigung 262
Festigungsmittel 262
Feuchtegehalt 221
Feuchtepuffer 108
Feuchtespeicherung 240
Fingerprintanalyse 203
Fließmittel 117
Flugasche 80, 96, 116
Fluoreszenzstrahlung, charakteristisch 209
Fluten 281
Flutverfahren 272
Foidolit 33
Formbarkeit 51
Fourier-Transform-Infrarotspektrometer 204
Fresko 145, 148
Frostangriff 232
Füllstoff 146

G

Gabbro 33
Gefrierpunktserniedrigung 232
Gefüge 12
~Analyse 169, 176
Gelabscheidungsrate 272
Gelförmiges Produkt 281
Gestein
~Bruchstück 39
~Eigenschaft 29
~Gefüge 31
~Körnung 117
~magmatisch 26
~metamorph 28, 44
~pyroklastisch 33, 36
Gesteinskörnung, reaktiv 255
Gips 21, 85
~Bauplatte 85
~Krustenbildung 246
~Schnitzerei 93
~totgebrannt 89

Gneis 44, 47
Graben 25
~System 25
Graffiti 284
~Reinigung 286
Granit 33
Granulit 47
Grauwacken 39
Größenverteilung 186
Großkocher 87
Grünling 51
Grünschiefer 47

H

Haftzugfestigkeit 107
Halbhydrat 87
Halbleiterdetektor 197
Handstrichverfahren 51
Härter 268
Hartformgips 88
Hennebique-System 123
Hg-Porosimetrie 191
Hochbrandgips 87
Hochleistungsbeton 124
Hochlochziegel 57
Hochofenzement 95, 127
Hoffmannscher Ringofen 53
Holzkohle 84
Hot Spot 25
Huminsäure 59
Hüttensand 94, 96, 115
Hydratation 98
hydraulischer Druck 235
hydraulischer Index 217
hydraulischer Kalk 75
Hydrolyse 271, 280
hydrophil 277
hydrophob 277
Hydrophobierung 276
Hydrophobierungsmittel 277
hygrisch expansiv 36
hygroskopisch 240

I

Illit 59, 66
Impaktgestein 40

Imprägnierung 265, 279, 281
 Indikatorlösung 249
 Infrarotspektroskopie 204
 Instandsetzung 261
 Interferenzfarben 179
 Intraklasten 41
 Ionenchromatographie 219
 Ionenkonzentration 219

K

Kaliumwasserglas 149
 Kalk 21, 74
 ~ Bindemittel 75
 ~ Farbe 74, 147
 ~ formuliert 75
 ~ Kasein-Farbe 148
 ~ Kreislauf 76
 ~ Mergel 103
 ~ Mörtel 80
 ~ natürlich hydraulisch 75
 ~ Sandstein 39, 68
 ~ Spatzen 84
 ~ Stein 41
 ~ Wasser 264
 Kalkstein, klastisch 39
 Kaolinit 59, 65
 Kapillar
 ~ Kondensation 231
 ~ Pore 228
 ~ Transport 228
 Keimfarbe 149
 Kelle, »heiß« 78
 Kieselsäureester 270
 Kieselsole 273
 Klinker 96
 ~ Kühler 96
 ~ Phase 98
 Klosterformat 55
 Koagulieren 149
 Kollergang 50
 Kompaktor 138
 Kompressen 272
 ~ Entsalzung 243
 Kondensation 230, 271, 280
 Konglomerate 40

Konservierung 261
 Konsistenz 121
 ~ erdfeucht 121, 139
 Konsistenz, plastisch 121
 Kontaktwinkel 277
 Kontinentaldrift 25
 Konvektion 24
 Kornbestandteile 37
 Kornbindung, quarzitisches 38
 Kornbindung, tonmineralisch 38
 Kreislauf der Gesteine 29
 kristallin 170
 KSE 270
 Kunststoff, glasfaserverstärkt 118
 k-Wert 120

L

Langlochziegel 57
 Latentwärmespeicher 242
 Lehm 21, 50
 ~ Anstrichstoff 105
 ~ erdfeucht 62
 ~ Mörtel 105
 ~ Putzmörtel 105
 ~ Stein 48, 59
 ~ Steinfestigkeit 65
 Leimfarbe 153
 Leinölfarbe 152
 Lichtleiter 175
 Licht, planpolarisiert 179
 Lithiumwasserglas 265
 Löslichkeitsprodukt 239
 Luft
 ~ Kalk 75
 ~ Schadstoff 44, 244
 Luftfeuchte, relativ 229
 Luftpore 237, 242
 ~ Bildner 117, 237, 242
 ~ Gehalt 120

M

Magmatit 33
 Makropore 228
 Malmittel 147
 Markasit 34

Marmor 32, 46, 47
 Massenhydrophobierung 279
 Massivbau 21
 ~ Weise 17
 Material
 ~ Charakterisierung 181
 ~ Feuchte 63
 ~ Gefüge 169, 171
 ~ Wissenschaft 11
 Matrix 39
 Matrix, mikritisch 42
 Mauer
 ~ Mörtel 21
 ~ Werk 21
 Maya Blau 158
 Mehrkammerschachtofen 77
 Mehrphasenanhydrit 89
 Mergel 103
 Metakaolinit 80
 Migmatit 47
 Mikroislinnenpumpe 234
 Mikro-Röntgenfluoreszenz 14
 ~ Analyse 213
 Mikrosilika 80, 116
 Mineralfarbe 149
 Mineralogie 11
 Mischbett 95
 mittelozeanischen Rücken 25
 Molekül
 ~ hydrophob 276
 Monosulfat 99
 Montmorillonit 59, 65
 Monzonit 33
 Mörtel
 ~ Analyse 217
 ~ Fertigmischung 102

N

Nagelfluh 40
 Nanokalk 265
 Nasslöschen 78
 Natriumwasserglas 149
 Naturstein 23
 Netzebene 194

Niederbrandgips 87
Normalformat 55

O

Oberfläche
~ Abrieb 107
~ Schutz 262
~ Spannung 277
Octyltriethoxisilan 279
Ölfarbe 152
Ooide 41
Opferputz 242
Orthokieselsäuretetraethyl-
ester 270

P

Packungsdichte 65
Paraloid B72 267
Passivierung 98
Pellets 41
Permanentmarker 285
Phase 170
~ keramisch 54
Phasenanalyse 169, 194
Phasenbestandteil 171
Phenolphthalein 249
Phonolit 33
Pigment 146, 156
Plagioklas 33
Plaster of Paris 90
Plattentektonik 24
Plutonite 26
Polarisationsmikroskop
14, 176
Polarisator 179
~ gekreuzt 179
Polymer 266
Polymerfaser 161
Polymethyl-Methacrylat
267
Polymorphie 170
Polyurethan 269
Polyvinylalkohol 149
Porenbeton 69
Porengrößenverteilung
192, 227
Porenradius 192
Porenraum 37

Porenvolumen 227
Porosität 11, 227
Portlandit 98
Portlandzement 94, 95
Portlandzementklinker 94
Presstablette 212
Prozess, endotherm 200
Prozess, mineralogisch 14
Putz 23
~ Gips 88
~ Materialien 23
Puzzolan 40, 80
~ Erde 81
~ natürlich 116
Pyrit 34
Pyroklastite 36

Q

Quadermauerwerk 23
Quarz 33, 39
Quecksilberdruckporosi-
metrie 191
Quellminderer 274

R

Raman
~ Mikroskop 208
~ Spektroskopie 208
Rasterelektronen-
mikroskop 187
Rauchgasentschwefelungs-
anlage 87
REA 87
Reichsformat 55
~ neu 55
RFA, wellenlängendis-
persiv 210
Rhyolith 33
Rietveld-Methode 198
Ringlicht 175
Rohmehl 95
~ Mühle 95
Romanzement 94, 103

Röntgen
~ Fluoreszenzanalyse 209
~ Fluoreszenzdetektor 189
~ Pulverdiffraktometrie
194
~ Röhre 196
Röntgenstrahl,
charakteristisch 188
Röntgenstrahlung,
charakteristisch 189
Rostbrandofen 88
Rückstreuelektron 188
Rumfordofen 77
Rüttelflasche 121

S

Salzanalyse 219
Salzangriff 237
Sandstein 37
~ carbonatisch gebunden
38
Sanierputz 242
Sättigungsfeuchte 223
Schachtofen 76
Schadensanalyse 183
Schädigungsprozess 226
Scherbenrohrichte 56
Schichtung 32
Schiefer 45
Schieferung 32
Schmelztablette 211
Schutzmaßnahme 261
Schwindeigenschaft 65
Schwinden 248
Schwindneigung 107
Schwindreduzierer 117
Schwingungsenergie 206
Secco 146
Sediment
~ biogen 27, 41
~ chemisch 27
~ Gestein 27
~ klastisch 27, 37
segmentieren 185
Segmentierung 185
Semipermanente AGS 287
Silan 270, 278
Silanol 271

Silikatfarbe 149
 Silikonharz 278
 ~Farbe 152
 Sorptionsisotherme 230
 Sprayfarbe 285
 Sprühen 281
 Stahlbewehrung 118
 Stampfbauweise 123
 Stampfbeton 121
 Stampflehm 131, 133
 Stearat 280
 Steinkompaktierung 62
 Steinrohddichte 56, 64
 Stempelpresse 61
 Stereomikroskop 174
 Stoffrohddichte 56, 64
 Strangpresse 52
 Strohfaser 106
 Struktur 171
 Stuckgips 85
 Subduktionszone 25
 Suevit 40, 116
 Sulfatangriff 257
 Sulfatbinder 85
 Sulfation 257
 Sumpfen 50, 79
 Sumpfhaut 50
 Sumpfkalk 80
 superhydrophob 277
 Syenit 33
 Systemreiniger 290
 Szintillationsdetektor 197
 Szintillationszählrohr 211

T

Tagger 285
 Taupunkt 230
 TEOS 270
 Tephra 80
 Tephrit 33
 Tetraethoxysilan 270
 Tetraethylorthosilikat 270
 Textilbewehrung 118
 Textur 171
 Thermogravimetrie 200, 201
 Thermowaage 202
 Thymolblau 249

Tiefengestein 26
 Tiefenstufe 220
 Tobermorit 70
 Ton
 ~Gestein 39
 ~Mergel 103
 ~Mineral 36–37
 ~Schiefer 47
 Tonmineral, calciniert 80
 Trachyt 33
 Trägergasbrennanlage 87
 Transportbeton 123
 Trass 36, 80, 81, 116
 Travertin 43
 Tricalciumaluminat 78
 Trockenlöschen 78
 Tuff, vulkanisch 36
 Tunnelofen 52, 53

U

Überfestigung 263
 Übersättigung 239
 Ultramafite 33
 Umgebungsfeuchte 255

V

Vandalismus 285
 Verblendmauerwerk 22
 Verdunstungsfront 229, 240
 Vollziegel 56
 Vorsatzmauerwerk 22
 Voruntersuchung 282
 Vulkanite 26

W

Wachs
 ~Farbe 154
 ~mikrokristallin 288
 Wärme
 ~Behandlung 259
 ~Speicher 242
 Washburn-Gleichung 191

Wasser
 ~Abweisung 276
 ~Dampfdiffusion 229
 ~Dampfdiffusionsfähigkeit 107
 ~Dampfsorption 108
 ~Glas 73, 149, 265
 ~unterkühlt 232
 W/B-Wert 80
 Weibener Tuff 36
 Weichsegment 271
 Weiß
 ~Kalk 75
 ~Zement 149
 Wellenzahl 206
 Wellerlehm 132, 141
 W/Z-Wert 80

Y

Young-Laplace-Gleichung 228

Z

Zement 94
 ~Chemie 97
 ~Farbe 149
 ~Mühle 96
 ~sparitsch-calcitisch 42
 Zeolithen 36
 Ziegel 48
 ~Mehl 80
 Zugabewasser 115
 Zumahlstoff 96–97, 97
 Zusammensetzung, chemisch 170
 Zusatz
 ~Mittel 116
 ~Stoff 115–116
 Zuschlag 117
 Zweikomponenten-Silikatfarbe 149
 Zwillinglamelle 46
 Zyklonvorwärmer 95
 Zyklopenmauerwerk 23

Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke

Diese Buchreihe behandelt Untersuchungsmethoden und Reparaturmöglichkeiten erhaltungswürdiger Bauwerke. Die Autoren sind erfahrene Ingenieure, Architekten, Naturwissenschaftler und Denkmalpfleger, die sich einem behutsamen Umgang mit historischer Bausubstanz verpflichtet sehen.

Urs Müller

Mineralische Baustoffe

Untersuchen, Bewerten und Konservieren

Bei Schäden an historischem Mauerwerk, wertvollen Putzflächen oder auch Betonoberflächen sind handwerkliche Reparaturen mit traditionellen Baustoffen oft die erste Wahl, doch auch moderne Werkstoffe leisten dabei wirkungsvolle Dienste. Sie alle können Schäden allerdings auch vergrößern oder neu hervorrufen.

Wie Reparaturmaterialien richtig ausgewählt und auf den Bestand abgestimmt werden müssen, erklärt Urs Müller in diesem Buch. Dazu beschreibt er zunächst die bautechnikgeschichtliche Entwicklung von Lehm, Kalk, Gips, Naturstein und Ziegel bis hin zu den zeitgenössischen Bauprodukten Zementmörtel, Beton, Farben und Pigmente sowie Asbest. Anschaulich erläutert er physikalische Kenngrößen und chemische Vorgänge, die Einfluss auf die Dauerhaftigkeit der Baustoffe haben, sowie Verfahren zur Festigung und zum Oberflächenschutz. Auch die mineralogischen Analyseverfahren werden ausführlich erklärt. Mit ihnen lassen sich auch weitere denkmalrelevante Fragen untersuchen, wie Herkunft, Alter und Verträglichkeit von Materialien.

Architekten, Bauingenieure, Denkmalpfleger und -eigentümer müssen keine materialwissenschaftlichen Details beherrschen. Sie sollten aber ausreichend sachkundig sein, um mit Baustoffexperten klar kommunizieren zu können. Nur dann können sie die richtigen Fragen stellen. Dieses Buch vermittelt die wesentlichen Grundlagen dafür. Es ist als Lehrbuch ebenso geeignet wie als Nachschlagewerk bei Materialschäden an historischen Bauwerken.



Fraunhofer IRB  Verlag