

Herausgegeben von Ralf Ruhnau  
Begründet von Günter Zimmermann

Martin Sauder, Renate Schloenbach

# Schäden an Außenmauerwerk aus Naturstein

2., überarbeitete und erweiterte Auflage

Fraunhofer IRB  Verlag

Martin Sauder, Renate Schloenbach

## Schäden an Außenmauerwerk aus Naturstein



# Schadenfreies Bauen

Herausgegeben von Dr.-Ing. Ralf Ruhnau

Begründet von Professor Günter Zimmermann

Band 11

## Schäden an Außenmauerwerk aus Naturstein

Von

Dipl. Geol. Martin Sauder

Dr. Renate Schloenbach

2., überarbeitete und erweiterte Auflage

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](http://www.dnb.de) abrufbar.

ISBN (Print): 978-3-8167-8809-6

ISBN (E-Book): 978-3-8167-8810-2

Redaktion: Manuela Walliöser

Layout, Umschlaggestaltung: Martin Kjer

Herstellung: Tim Oliver Pohl

Satz: Manuela Gantner – Punkt, STRICH.

Druck: Ungeheuer + Ulmer KG GmbH + Co., Ludwigsburg

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 Verlages 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-Gesetz-  
gebung 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 Richtig-  
keit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen  
Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuzie-  
hen.

© by Fraunhofer IRB Verlag, 2013

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Telefon +49 7 11 970-25 00

Telefax +49 7 11 970-25 08

[irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

# Fachbuchreihe Schadenfreies Bauen

Bücher über Bauschäden erfordern anders als klassische Baufachbücher eine spezielle Darstellung der Konstruktionen unter dem Gesichtspunkt der Bauschäden und ihrer Vermeidung. Solche Darstellungen sind für den Planer wichtige Hinweise, etwa vergleichbar mit Verkehrsschildern, die den Autofahrer vor Gefahrstellen im Straßenverkehr warnen.

Die Fachbuchreihe **SCHADENFREIES BAUEN** stellt in vielen Einzelbänden zu bestimmten Bauteilen oder Problemstellungen das gesamte Gebiet der Bauschäden dar. Erfahrene Bausachverständige beschreiben den Stand der Technik zum jeweiligen Thema, zeigen anhand von Schadensfällen typische Fehler auf, die bei der Planung und Ausführung auftreten können, und geben abschließend Hinweise zu deren Sanierung und Vermeidung.

Für die tägliche Arbeit bietet darüber hinaus die Volltextdatenbank **SCHADIS** die Möglichkeit, die gesamte Fachbuchreihe als elektronische Bibliothek auf DVD oder online zu nutzen. Die Suchfunktionen der Datenbank ermöglichen den raschen Zugriff auf relevante Buchkapitel und Abbildungen zu jeder Fragestellung ([www.irb.fraunhofer.de/schadis](http://www.irb.fraunhofer.de/schadis)).

## Der Herausgeber der Reihe:

Dr.-Ing. Ralf Ruhnau ist ö. b. u. v. Sachverständiger für Betontechnologie, insbesondere für Feuchteschäden und Korrosionsschutz. Als Partner der Ingenieurgemeinschaft CRP GmbH Berlin und in Fachvorträgen befasst er sich neben der Bauphysik und der Fassadenplanung vor allem mit Bausubstanzbeurteilungen. Er war mehrere Jahre als Mitherausgeber der Reihe aktiv und betreut sie seit 2008 alleinverantwortlich.

## Der Begründer der Reihe:

Professor Günter Zimmermann war von 1968 bis 1997 ö. b. u. v. Sachverständiger für Baumängel und Bauschäden im Hochbau. Er zeichnete 33 Jahre für die **BAUSCHÄDEN-SAMMLUNG** im Deutschen Architektenblatt verantwortlich. 1992 rief er mit dem Fraunhofer IRB Verlag die Reihe **SCHADENFREIES BAUEN** ins Leben, die er anschließend mehr als 15 Jahre als Herausgeber betreute. Er ist der Fachwelt durch seine Gutachten, Vortrags- und Seminaraktivitäten und durch viele Veröffentlichungen bekannt.

## Vorwort des Herausgebers zur zweiten Auflage

Seit dem Erscheinen der ersten Auflage dieses Bandes in der Reihe SCHADENFREIES BAUEN im Jahr 1995 sind 18 Jahre vergangen, in denen nicht nur das Bauen im Bestand und damit die notwendige Auseinandersetzung mit Naturstein als Baumaterial drastisch zugenommen haben, sondern vor allem auch im Zuge der Europäisierung des öffentlichen Baurechts maßgebliche deutsche Normen und Richtlinien durch EN- und ISO-Normen ersetzt und ergänzt worden sind.

Sowohl im Umgang mit vorhandener zu sanierender Bausubstanz als auch beim Neubau mit Natursteinmaterialien ist eine fundierte Kenntnis physikalischer Eigenschaften und möglicher Schadensmechanismen von Naturstein unerlässlich. Fehler bei früheren Sanierungsarbeiten – insbesondere durch nicht auf den jeweiligen Naturstein abgestimmte Reparaturmaterialien – haben häufig die Steinschäden noch vergrößert. Unzureichende Kenntnisse hinsichtlich der Materialsteifigkeiten und damit des Verformungsverhaltens sind hier oftmals die Ursache für tiefgreifende Schäden am Naturstein.

Hier hilft die vorliegende zweite Auflage des Buches SCHÄDEN AN AUSSENMAUERWERK AUS NATURSTEIN von Frau Dr. Renate Schloenbach und Herrn Martin Sauer den Überblick über den Umgang mit den verschiedenen Natursteinen zu erlangen und damit Schäden zu vermeiden. Gutachtern wie Planern ist dieses Buch eine wertvolle Hilfe und Leitfaden für die Planung und Ausführung, ob Instandsetzung oder Neubau. Hierfür gilt mein Dank den beiden Autoren, die ihr Wissen und ihre reiche Erfahrung in diese Neuauflage eingebracht haben.

Berlin, im Januar 2013  
Ralf Ruhnau

# Vorwort der Autoren zur zweiten Auflage

Schäden an Natursteinmauerwerk werden oft im Rahmen anderer Bau- und Sanierungsmaßnahmen mitbearbeitet, ohne auf möglich Konsequenzen falscher Methoden und Materialien zu achten, da das spezifische Fachwissen fehlt. In der Folge treten neue Schäden auf, die durch sorgfältige Planung und Überwachung hätten vermieden werden können.

Bei Natursteinmauerwerk treten ganz spezielle Probleme und physiko-chemische Zusammenhänge auf, die im ›normalen‹ Baugeschehen nicht zu erwarten sind. Umso wichtiger ist also die Auseinandersetzung mit dem Material, seinen Eigenschaften und den umfangreichen Instandsetzungs- und Restaurierungsmöglichkeiten.

In diesem Buch werden zunächst die unterschiedlichen Eigenschaften des Natursteins und die vielfältigen Schadensmechanismen erläutert. Danach wird auf die notwendige intensive Vorarbeit bei der Schadensvermeidung und -beseitigung eingegangen. Nicht zu vergessen die Probleme, die bei chemischer oder physikalischer Unverträglichkeit zwischen einzelnen Stoffen auftreten.

Seit der Erstauflage des Buches aus dem Jahr 1995 hat sich die Normenlage auch im Bauwesen durch Anpassung an EU-Recht wesentlich geändert. Die neu geschaffenen EN- und ISO-Normen unterscheiden sich zum Teil deutlich von den bisherigen DIN-Normen, zudem sind für die Durchführung von Maßnahmen teilweise deutsche DIN-Normen anzuwenden.

Für die vorliegende Zweitaufgabe wurde der neue Normenstand eingearbeitet. Durch den ständigen Entwicklungsprozess auf diesem Gebiet, auch während der Bearbeitung des Buches, kann jedoch nur ein Zwischenstand angegeben werden.

Die aufgeführten Schadensfälle stammen aus der langjährigen Tätigkeit der Autoren in der Begutachtung von Natursteinschäden und in der Fachplanung von Instandsetzungsmaßnahmen.

Das vorliegende Buch soll als Hilfestellung und Nachschlagewerk dienen, aber auch einen Leitfaden darstellen für den gesamten Ablauf einer Instandsetzung von Natursteinmauerwerk an Außenwänden.

Saarbrücken, im Januar 2013

Dr. Renate Schloenbach

Martin Sauder



# Inhaltsverzeichnis

	Einleitung	15
1	Grundlagen	17
1.1	Naturstein	17
1.2	Übersicht über Außenmauerwerk	18
1.2.1	Aufbau von Außenmauerwerk	18
1.2.2	Steinbearbeitung	23
1.3	Untersuchungen	24
1.3.1	Schadensaufnahme	24
1.3.1.1	Quellenstudium	25
1.3.1.2	Kartierung	26
1.3.1.3	Zerstörungsfreie Erkundung	30
1.3.1.4	Schurfaufnahme	34
1.3.1.5	Erkundung des Mauerwerksaufbaus	35
1.3.1.6	Begleitende Untersuchung	37
1.3.1.7	Fotografische, zeichnerische und textliche Aufnahme	37
1.3.2	Probenahme	37
1.3.2.1	Bohrungen	37
1.3.2.2	Weitere Materialproben	38
1.3.3	Untersuchungsverfahren	39
1.3.3.1	Allgemeine Gesteinskenndaten zur Klassifikation	41
1.3.3.2	Allgemeine physikalische Eigenschaften	43
1.3.3.2.1	Druckfestigkeit	43
1.3.3.2.2	Haftzugfestigkeit	44
1.3.3.2.3	Biegezugfestigkeit	45
1.3.3.2.4	Abriebfestigkeit	46
1.3.3.2.5	Elastizitätsmodul	47
1.3.3.2.6	Ausbruchlast am Ankerdornloch	48
1.3.3.2.7	Thermische und hygrische Längenänderung	48
1.3.3.2.8	Frost-Tau-Wechsel	50
1.3.3.2.9	Kristallisationsversuche	51
1.3.3.2.10	Verwitterungsbeständigkeit	52
1.3.3.2.11	Bestimmung der Dichte	53
1.3.3.3	Feuchtigkeitsbestimmung	55

1.3.3.3.1	Feuchtigkeitsgehalt	56
1.3.3.3.2	Maximale Wasseraufnahme	61
1.3.3.3.3	Durchfeuchtungsgrad	62
1.3.3.3.4	Kapillare Wasseraufnahme	63
1.3.3.3.5	Hygroskopische Wasseraufnahme	65
1.3.3.3.6	Kondenswasser	66
1.3.3.3.7	Wärmeschutzberechnung	72
1.3.3.3.8	Wasserdampfdiffusion	75
1.3.3.4	Salzanalysen	76
1.3.3.4.1	Qualitative Salzbestimmung	77
1.3.3.4.2	Quantitative Salzbestimmung	79
1.3.3.5	Mikrobiologische Untersuchungen	80
1.3.3.6	Konservierungsversuche	81
1.3.3.6.1	Festigung	81
1.3.3.6.2	Hydrophobierung	82
1.3.3.7	Mörteluntersuchungen	83
1.3.3.7.1	Bindemittel	85
1.3.3.7.2	Zuschlag	88
1.3.3.7.3	Bindemittel-Zuschlag-Verhältnis	89
1.3.3.7.4	Sonstige Untersuchungen	89
1.3.3.8	Anstrichuntersuchungen	90
1.4	<b>Sanierungsmethoden</b>	<b>91</b>
1.4.1	Reinigung	91
1.4.2	Beseitigung von und Schutz vor Bewuchs	95
1.4.3	Farbentfernung	97
1.4.4	Steinaustausch	99
1.4.4.1	Ganze Quader oder Werkstücke	100
1.4.4.2	Platten	100
1.4.4.3	Vierungen	101
1.4.5	Steinergänzung	102
1.4.5.1	Restauriermörtel	102
1.4.5.2	Abformen	104
1.4.6	Verfugung	104
1.4.7	Verankerung	111
1.4.8	Trockenlegung	114
1.4.8.1	Horizontalabdichtung	114
1.4.8.2	Vertikalabdichtung	121
1.4.8.3	Innenabdichtung	128
1.4.8.4	Dränung	128
1.4.9	Entsalzung	130
1.4.10	Festigung	134

1.4.11	Hydrophobierung	137
1.4.12	Putz und Schlämme	140
1.4.12.1	Verarbeitung	140
1.4.12.2	Sanierputz nach WTA	144
1.4.12.3	Andere Putzsysteme	147
1.4.12.4	Festigung	148
1.4.12.5	Fixieren gelöster Putzflächen	148
1.4.13	Anstrich	149
1.4.14	Korrosionsschutz	151
1.4.15	Rissbehandlung	153
1.4.16	Statische Sicherung des Mauerwerks	156
1.4.16.1	Verpressen	156
1.4.16.2	Vernadelung	157
1.4.16.3	Verankerung	158
1.4.17	Metallabdeckung	158
1.4.18	Wärmedämmung	162
1.4.18.1	Außendämmung	162
1.4.18.2	Kerndämmung	166
1.4.18.3	Innendämmung	166

## 2 Schadensarten 169

2.1	Schäden an Naturstein	169
2.1.1	Bewuchs	169
2.1.2	Ablagerung von Taubenkot	173
2.1.3	Krustenbildung	177
2.1.4	Salzbildung	180
2.1.4.1	Schadensursache: aufsteigende Feuchtigkeit	183
2.1.4.2	Schadensursache: seitlich eindringende Feuchtigkeit	187
2.1.4.3	Schadensursache: Nutzung	189
2.1.4.4	Schadensursache: Tausalz	189
2.1.4.5	Schadensursache: Materialreaktion	190
2.1.5	Verfärbung	191
2.1.5.1	Schadensursache: handwerkliche Mängel beim Aufbringen von Konservierungsmitteln	191
2.1.5.2	Schadensursache: Durchfeuchtung	194
2.1.5.3	Schadensursache: Mobilisation von Mineralen	195
2.1.6	Schimmelbildung und/oder Feuchteflecken	197
2.1.6.1	Schadensursache: Kondensation	197
2.1.6.2	Schadensursache: konstruktiv	199
2.1.6.3	Schadensursache: hygroskopische Feuchtigkeit und Hydratation	199



2.1.7	Absanden	201
2.1.7.1	Schadensursache: Wasser	202
2.1.7.2	Schadensursache: Versalzung	203
2.1.7.3	Schadensursache: Behinderung der Wasserdampfdiffusion	204
2.1.7.4	Schadensursache: Winderosion	204
2.1.8	Reliefbildung	205
2.1.9	Schuppen	207
2.1.9.1	Schadensursache: Ablösung von Schalen	208
2.1.9.2	Schadensursache: Versalzung	208
2.1.10	Flächige Schalen	208
2.1.10.1	Schadensursache: salzinduzierte Volumenveränderung	209
2.1.10.2	Schadensursache: Frostsprengung	212
2.1.10.3	Schadensursache: Verdichtung der Oberfläche durch Festigung oder filmbildende Beschichtung	213
2.1.10.4	Schadensursache: Hinterwanderung von Hydrophobierungen mit Feuchtigkeit	214
2.1.10.5	Schadensursache: hygrische Dehnung	215
2.1.10.6	Schadensursache: thermische Dehnung	217
2.1.10.7	Schadensursache: Brand	217
2.1.10.8	Schadensursache: Steinbearbeitung	218
2.1.11	Kantenparallele Schalen	220
2.1.11.1	Schadensursache: hygrische und thermische Längenänderung	220
2.1.11.2	Schadensursache: Bauwerksbewegungen	221
2.1.12	Aufblättern	222
2.1.13	Bröckeln	222
2.1.13.1	Schadensursache: Überlagerung mehrerer Schalen- und/oder Rissysteme	223
2.1.13.2	Schadensursache: konstruktiv	224
2.1.14	Ausbruch	224
2.1.14.1	Schadensursache: mechanisch	225
2.1.14.2	Schadensursache: Kriegsschäden	225
2.1.15	Rostsprengung	226
2.1.16	Schichtparallele Risse	228
2.1.17	Steindurchschlagende Risse	229
2.1.17.1	Schadensursache: konstruktiv	229
2.1.17.2	Schadensursache: Treibmineralbildung	232
2.1.17.3	Schadensursache: Brand	233
2.1.18	Verformung von Mauerwerk	234
2.1.19	Hohlräume in Mauerwerk	235

2.1.20	Mangelhafter Austausch geschädigter Quader	236
2.1.21	Falsch eingesetzte Vierungen oder Platten	237
2.1.22	Fehlerhafte Restauriermörtelergänzungen	239
<b>2.2</b>	<b>Schäden an Fugen</b>	<b>242</b>
2.2.1	Mörtelrisse	242
2.2.1.1	Schadensursache: materialspezifisch	242
2.2.1.2	Schadensursache: handwerkliche Mängel	244
2.2.1.3	Schadensursache: konstruktiv	245
2.2.2	Absanden	246
2.2.2.1	Schadensursache: materialspezifisch	246
2.2.2.2	Schadensursache: handwerkliche Mängel	247
2.2.2.3	Schadensursache: Versalzung	247
2.2.2.4	Schadensursache: Feuchtigkeit	248
2.2.3	Rahmenartig vorstehender Fugenmörtel	248
2.2.4	Fehlstellen	249
<b>2.3</b>	<b>Schäden an Putz und Schlämme</b>	<b>250</b>
2.3.1	Ablösung	250
2.3.1.1	Schadensursache: handwerkliche Mängel	250
2.3.1.2	Schadensursache: materialspezifisch	251
2.3.1.3	Schadensursache: Feuchtigkeit	252
2.3.1.4	Schadensursache: Rostsprengung	254
2.3.2	Absanden	255
2.3.2.1	Schadensursache: Feuchtigkeit	255
2.3.2.2	Schadensursache: Salzbildung	256
2.3.2.3	Schadensursache: materialspezifisch	257
2.3.2.4	Schadensursache: Frost	258
2.3.3	Schwindrisse	258
2.3.4	Putzdurchschlagende Risse	260
2.3.4.1	Schadensursache: thermische Spannung	260
2.3.4.2	Schadensursache: mangelhafter Untergrund	261
2.3.4.3	Schadensursache: konstruktiv	262
2.3.5	Verfärbung	263
2.3.5.1	Schadensursache: Durchfeuchtung	263
2.3.5.2	Schadensursache: materialspezifisch	264
2.3.5.3	Schadensursache: Verunreinigung	265
<b>2.4</b>	<b>Schäden an Anstrichen</b>	<b>266</b>
2.4.1	Ablösung	266
2.4.1.1	Schadensursache: materialspezifisch	266
2.4.1.2	Schadensursache: handwerkliche Mängel	267
2.4.1.3	Schadensursache: Feuchtigkeit	268

2.4.1.4	Schadensursache: schadhafter Untergrund	269
2.4.1.5	Schadensursache: Salzbildung	269
2.4.2	Risse	270
2.4.2.1	Schadensursache: Risse im Untergrund	270
2.4.2.2	Schadensursache: thermische Längenänderung	271
2.4.2.3	Schadensursache: hygri-sche Längenänderung	271
2.4.3	Verfärbung	272
2.4.3.1	Schadensursache: Mobilisation von Mineralen	272
2.4.3.2	Schadensursache: handwerkliche Mängel	273
2.4.3.3	Schadensursache: materialspezifisch	274
2.4.3.4	Schadensursache: Feuchtigkeit	274
2.4.4	Abkreiden	274
2.4.5	Bewuchs	275
2.4.6	Salzausblühung	276
2.5	Schäden an Bauteilen	276
2.5.1	Sockel	276
2.5.2	Tür	278
2.5.3	Treppe	280
2.5.4	Fenster	282
2.5.5	Balkon	286
2.5.6	Dach	290
2.5.7	Vorgehängte Fassade bzw. Schale	292
2.5.8	Brückenbauwerke	295
2.5.9	Tunnel	297
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>299</b>
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>311</b>

# Einleitung

Im Folgenden werden neben den eigentlichen Schäden an Außenmauerwerk aus Naturstein auch die Untersuchungsmethoden zur Erkennung der Schadensursache und die verschiedenen infrage kommenden Instandsetzungsmöglichkeiten behandelt. Dabei ist es nicht möglich, sich nur auf die Natursteine selbst zu beschränken, die fast immer in direktem Kontakt mit Mörtel, Putz, Anstrich etc. stehen. Diese Baustoffe und ihre typischen Schäden sowie die Möglichkeiten der Schadensbeseitigung werden ebenfalls besprochen.

An wen wendet sich der vorliegende Band? Er versteht sich als Nachschlagewerk für alle, die bei der Instandsetzung und beim Umbau älterer Bauwerke mit Schäden an Naturwerkstein in Berührung kommen. Das Buch soll eine Hilfe sein beim Erkennen und Unterscheiden verschiedener Schäden und kann damit wesentlich dazu beitragen, die Schadensursachen zu beseitigen und den Baumaßnahmen zu einem langfristigen Erfolg zu verhelfen.

Aber auch bei Verarbeitung von Naturstein im Neubau hilft die Kenntnis der möglichen Schäden, sowohl Planungs- als auch Ausführungsfehler zu vermeiden. Es wendet sich daher vor allem an Architekten und Ingenieure, aber auch an Denkmalpfleger, Bauleiter und alle, die speziell in der Bauwerkserhaltung tätig sind.

Zahlreiche Schadensfälle aus der Baupraxis vor allem der letzten zehn Jahre sind unter Berücksichtigung der verschiedenen möglichen Ursachen besprochen, die Instandsetzungsmöglichkeiten geben den neuesten Stand der Technik im Jahre 2012 wieder – wobei vieles an altüberlieferten bewährten Handwerkstechniken orientiert ist.

Zur Abrundung sind auch die notwendigen Verfahren und Techniken aufgeführt und im Einzelnen beschrieben, die zur Schadensbegutachtung angewandt werden. Auch Normen und Richtlinien zur Untersuchung von Naturstein hinsichtlich seiner Eignung als Werkstein an Fassaden werden besprochen, sodass der Leser die Möglichkeit erhält, sich eine ausreichende Vorinformation zu beschaffen, die ihm bei weiteren Planungsschritten, aber auch bei der Diskussion mit Fachingenieuren etc. sehr hilfreich ist.

Sofern mehrere Lösungsansätze für einen Schadensfall vorliegen, wird zwar eine erste Wertung gegeben, es ist jedoch in vielen Einzelfällen nicht möglich, pauschale Vorgaben zu machen. Daher stehen oft einige Instandsetzungsmöglichkeiten gleichberechtigt nebeneinander, da es vom Einzelfall abhängt, wie man vorzugehen hat.



# 1 Grundlagen

## 1.1 Naturstein

Da die verschiedenen petrografischen, mineralogischen und strukturellen Eigenarten in dieser Fachbuchreihe nicht im Einzelnen beschrieben werden können, muss eine sehr knappe Zusammenfassung genügen. Das Spektrum der als Werksteine verwendeten Natursteine, ihrer Zusammensetzung und ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften ist so groß, dass es den Rahmen dieses Buches sprengen würde, sie im Detail zu beschreiben.

Von wesentlich größerer Bedeutung sind dagegen Einflüsse, die am Bauwerk bestehen und z. B. aus der Lage eines Werksteins im Bauwerk, der Steinbearbeitung, aller äußeren Faktoren etc. herrühren. Diese wirken bei verschiedenen Werksteinarten in ähnlicher Weise, haben jedoch vielfach sehr unterschiedliche Schadensbilder zur Folge, je nach Zusammensetzung, Porosität und chemischen Eigenschaften der Einzelkomponenten des Steins.

Natursteine werden gemäß ihrer Entstehung in sedimentäre, magmatische und metamorphe Gesteine unterschieden. Als Werksteine werden in der Bundesrepublik vor allem Sedimentgesteine, insbesondere klastische wie Sandstein verwendet. Chemische und organogene Sedimentgesteine wie Kalkstein dienen entsprechend ihrer Vorkommen regional als Baustein. Magmatite (z. B. Porphyr, Granit) und Metamorphite (z. B. Marmor, Gneis) werden untergeordnet z. B. als vorgehängte oder angemörtelte Fassadenplatten sowie für die Bekleidung von Sockeln verarbeitet. Als Werkstein werden Vulkanite u. a. in der Eifel verbaut.

### Schadenverursachende Eigenschaften

- Inhomogenität durch Lagerung und Schichtung eines Gesteins  
Lagen aus quellfähigen Tonmineralen unterliegen bei Feuchteeinwirkung der Hydratation mit hygrischer Dehnung und Frostsprengung → Aufblättern, Schalen, schichtparallele Risse
- Kalkhaltige Mineralien können von  $\text{CO}_2$  und sauren Agenzien gelöst werden → Gipskrusten, Anlösungen, Mineralneubildungen
- Porosität, Porenradius und Porengeometrie ermöglichen die Teilnahme am Feuchtehaushalt des Baukörpers (kapillare, hygroskopische Wasseraufnahme) → Salzbelastung, hygrische Dehnung, Minerallösung und -neubildung, Frostanfälligkeit

- Löslichkeit von Mineralbestandteilen wie z. B. Eisen- oder Manganoxiden führt zur Mobilisierung durch Medien mit niedrigem pH-Wert und Ausfällung im alkalischen Milieu (z. B. Vermörtelung) → Verfärbung, Krustenbildung
- Einsprenglinge, wie z. B. Tongallen, können ausgewittert werden.
- Werksteine geringer Festigkeit neigen eher zu Auflockerung und Stabilitätsverlust als solche mit besserem Kornverband.
- Bei Einbau neuer Steine in bestehendes Mauerwerk führen unterschiedliche physikalische Eigenschaften (Druckfestigkeit, E-Modul, max. Wasseraufnahme) zu Rissen, Frostsprengung.

## 1.2 Übersicht über Außenmauerwerk

### Definition

Unter Außenmauerwerk werden im Folgenden handwerklich gemauerte Baukonstruktionen verstanden, die zumindest mit einer Oberfläche in Kontakt mit der Außenluft stehen.

Es handelt sich um Außenwände von Gebäuden, wie

- erdberührendes Mauerwerk (Keller),
- aufgehendes Mauerwerk (Wände), auch mit vorgehängter Fassade (Schale),
- Dachbereich.

Zugehörige Bauteile sind: Treppen, Balkone, Bauzier.

Außerdem sind dem Begriff ›Außenmauerwerk‹ hier auch freistehendes Mauerwerk sowie Ingenieurbauwerke aus Naturstein zugeordnet, wie

- Tunnelbauwerke,
- Brückenbauwerke,
- Umfassungsmauern,
- Stützmauern.

### 1.2.1 Aufbau von Außenmauerwerk

#### Verband von Außenmauerwerk

Für das Versetzen von Natursteinen gilt [1], [2, S. 3 ff.]:

- lagergerechter Einbau, d. h. Schichtung senkrecht zum Kraftangriff, mit Ausnahme schlanker Bauteile (Fenstergewände, Säulen),
- Steinlänge  $\leq$  4- bis 5-fache Steinhöhe, Mindestlänge = Steinhöhe,

- Binderschichten abwechselnd mit Läufer-schichten oder je nach Festigkeit des Mauerwerks Verwendung von 1 bis 4 Läufern (nach DIN 1053-1 [1] max. 2 Läufer) zwischen 2 Bindern, die jeweils mittig auf Läufern bzw. mit einem in DIN 1053 festgelegten Überbindemaß versetzt werden, Binder = Stein, dessen lange Seite senkrecht zur Mauerfront liegt, Läufer = Stein, dessen lange Seite parallel zur Mauerfront liegt, Regelung der Seitenverhältnisse der Quader in DIN 1053,
- keine durchgehenden Stoßfugen durch mehr als 2 Schichten.

### Trockenmauerwerk (Bild 1)

Verwendung: Schwergewichtsmauern (Stützmauern)

Aufbau: Bruchsteine, die ohne Verwendung von Mörtel versetzt werden

- Ausfüllung von evtl. Hohlräumen mit Zwickelsteinen
- Benutzung von Bindersteinen bei dickerem Mauerwerk
- ggf. lagenweises Auffüllen und/oder Hinterfüllen von Boden
- Versetzen der 1. Lage im Beton- oder Mörtelbett

### Bruchsteinmauerwerk (Bilder 2 und 4a)

Grob bearbeitete Natursteine, die in Mörtel versetzt werden.

Verwendung von dickeren, meist etwas besser bearbeiteten Quadern an den Ecken, in die die angrenzenden Wände abwechselnd lagenweise einbinden.

Unterschiedliche Schichtdicken, aber lagenweises Abgleichen in 60 bis 90 cm Höhe auf +/- waagrecht verlaufende Lagerfugen nach alt überlieferten Bautechniken, nach DIN 1053-1 [1] in max. 1,50 m Höhe.



**Bild 1** ■ Beispiel eines  
Trockenmauerwerks





**Bild 2** ■ Beispiel eines Bruchsteinmauerwerks

### **Zyklopenmauerwerk (Bilder 3 und 4b)**

Form des Bruchsteinmauerwerks mit großen, unbearbeiteten, vielkantigen Quadern.

Verwendung z.B. für Stützmauern.

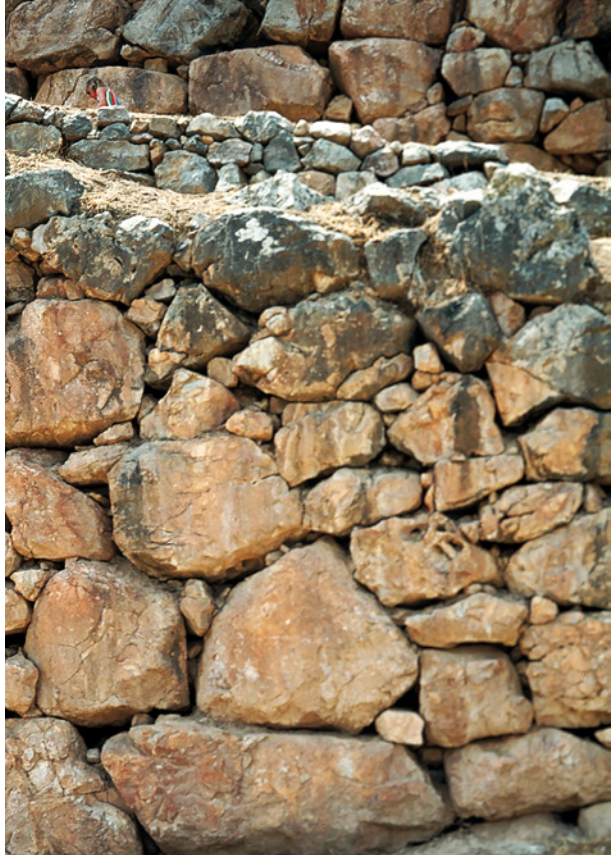
### **Schichtenmauerwerk (Bild 4c) [3, S. 388]**

Mauerwerk mit je nach Ausführungstyp unterschiedlicher Bearbeitung der Fugenflächen und variierenden Schichthöhen:

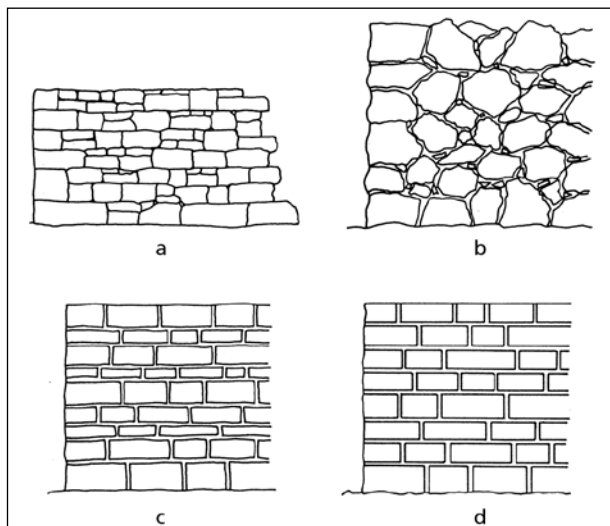
- hammerrechtes Schichtenmauerwerk: Bearbeitung der Stoß- und Lagerfugen der Sichtfläche auf min. 120 mm Tiefe, unterschiedlich hohe Lagen, aber Ausgleichen auf +/- waagrecht verlaufende Lagerfugen in Abständen von max. 1,50 m,
- unregelmäßiges Schichtenmauerwerk: Bearbeitung der Stoß- und Lagerfugen der Sichtfläche auf min. 150 mm Tiefe, unterschiedlich hohe Lagen in mäßigen Grenzen, aber Ausgleichen auf +/- waagrecht verlaufende Lagerfugen in Abständen von max. 1,50 m,
- regelmäßiges Schichtenmauerwerk: Bearbeitung der Stoßfugen der Sichtfläche auf min. 150 mm Tiefe und vollständige Bearbeitung der Lagerfugen, gleichmäßige Steinhöhe pro Schicht.

### **Quadermauerwerk (Bild 4d)**

Mauerwerk aus allseitig bearbeiteten, in Mörtel versetzten Steinen mit durchgehenden Lager- und versetzten Stoßfugen.



**Bild 3** ■ Beispiel eines  
Zyklopenmauerwerks



**Bild 4** ■ a) Prinzip eines  
Bruchsteinmauerwerks  
[2, S. 38]  
b) Prinzip eines Zyklopen-  
mauerwerks [1]  
c) Prinzip eines regel-  
mäßigen Schichtenmauer-  
werks [1]  
d) Prinzip eines Quader-  
mauerwerks [1]

## Mischmauerwerk [3, S. 389]

Mauerwerk aus verschiedenen Materialien in unterschiedlicher Anordnung, z. B. als

- einschaliges Verblendmauerwerk mit mittragender Natursteinverblendung, bei der min. 30 % der Außenschale als Bindersteine in die Hintermauerung eingreifen,
- lagenweise Abwechslung unterschiedlicher Steinsorten.

## Steinfachwerk

Mauerwerk mit horizontaler und vertikaler, fachwerkartiger Gliederung durch Elemente mit andersartigem Steinmaterial [4, S. 18].

## Mauerwerkskonstruktionen

### Vollmauerwerk

Einschaliges Mauerwerk, das im tragenden Verband durchgehend aus Steinquadern zusammengesetzt ist, auch als einschaliges Verblendmauerwerk. Je nach Ausbildung der Sichtmauerfläche wird unterschieden in

- steinsichtiges Mauerwerk, ggf. mit Anstrich,
- mit Außenputz,
- mit Wärmedämmverbundsystem (Kapitel 1.4.18),
- mit angemörtelten Bekleidungen nach DIN 18515-1 [5].

### Zweischaliges Mauerwerk

Historische Konstruktion: Füllung der Zwischenschicht zwischen gemauerter Außen- und Innenschale mit einem Gemisch aus Bruchstein und Mörtel, z. T. auch gestampft oder gegossen.

Nach DIN 1053-1 [1] wird zudem unterschieden in zweischalige Außenwände mit einer Zwischenschicht als

- Luftschicht,
- Luftschicht und Wärmedämmung,
- Kerndämmung,
- Putzschicht.

Verbindung von nichttragender Außenschale mit tragender Innenschale durch Drahtanker aus nichtrostendem Stahl, Werkstoffnr. 1.4401 oder 1.4571 nach DIN 1053-1 [1] oder mit bauaufsichtlich zugelassenen Ankern.

### Vorgehängte Fassade oder Schale (Kapitel 1.4.18 und 2.5.7)

Als vorgehängte Fassade oder Schale werden angemörtelte, angemauerte oder hinterlüftete Außenwandbekleidungen nach DIN 18515 [5] bzw. 18516 [6] bezeichnet.

Angemörtelte Fliesen oder Platten dürfen eine Fläche von  $0,12 \text{ m}^2$  bei max. Seitenlänge von  $0,4 \text{ m}$  und  $0,015 \text{ m}$  Dicke nicht überschreiten. Die Ansetzfläche muss ausreichend tragfähig sein. Für die Anbringung auf Wärmedämmschichten ist ein bewehrter Unterputz erforderlich, wobei die Bewehrung über Anker aus nichtrostendem Stahl zu befestigen ist. Angemauerte Verblender ( $\geq 55$  und  $< 90 \text{ mm}$  Dicke) werden auf Aufstandsflächen wie z. B. Fundamentvorsprüngen oder nichtrostenden Stahlkonsolen zur Aufnahme der Eigenlast angebracht. Die Befestigung der Anmauerung erfolgt über nichtrostende eingemauerte, eingedübelte oder nachträglich eingemörtelte Drahtanker [7].

Hinterlüftete Außenwandbekleidungen werden mit Trag- und Halteankern, ggf. mithilfe von Unterkonstruktionen, an der Fassade befestigt. Zwischen Außenwandbekleidung und Wärmedämmung bzw. Wandoberfläche ist eine Luftschicht von min.  $20 \text{ mm}$  einzuhalten.

Je  $1 \text{ m}$  Wandlänge sind Be- und Entlüftungsöffnungen mit min.  $50 \text{ cm}^2 \varnothing$  vorzusehen [8].

## 1.2.2 Steinbearbeitung

Oberflächenbearbeitung des Steines:

### Handwerklich [9, S. 184 ff.]

Vorteil:

Anpassung an historische Fassadenoberfläche, erforderlich bei denkmalwerten Fassaden

Häufig angewandte Bearbeitungstechniken sind:

- gebost,
- gespitzt,
- geflächt (gebeilt): glatt- und zahngeflächt,
- gepillt: Werkzeug ähnlich wie Glattfläche, aber schmaler,
- scharriert,
- gekrönel,
- gestockt,
- geschliffen,
- poliert.

Die Steinbearbeitung erfolgt mit Schlageisen unterschiedlicher Abmessungen, die mit dem Klöpfel oder Schlägel eingetrieben werden.

Fläche, Zweispitz und Krönel sind hammerartige Werkzeuge mit Schneiden, Spitzen oder mehreren zugespitzten Stahlstäben, die eine zum Stiel parallele

Bearbeitungsspur erzeugen. Der Stockhammer, ebenfalls beidhändig geführt, wirkt dagegen flächig mit einer rechteckigen Bearbeitungsfläche.

## Maschinell

Nach DIN 18332 NATURWERKSTEINARBEITEN [10] werden zusätzlich zu den handwerklichen Steinbearbeitungsverfahren folgende maschinelle Techniken angewendet:

- gesägt: diamant- und stahlsandgesägt,
- gesandelt,
- abgerieben,
- geschurt,
- sandgestrahlt,
- jetgestrahlt,
- beflammt,
- geriffelt,
- geprellt,
- gezahnt.

Vorteil: Kostenersparnis

Nachteil: nicht anwendbar bei denkmalwerten Fassaden, bei deren Restaurierung die historischen Techniken verwendet werden müssen. Darüber hinaus fehlt bei maschineller Bearbeitung die typische ›Handschrift‹ des Arbeiters; die Flächen werden sehr einheitlich hergestellt.

## 1.3 Untersuchungen

### 1.3.1 Schadensaufnahme

Die Bestandsaufnahme im Rahmen einer Sanierungsplanung umfasst sowohl die Ermittlung von Schäden, d. h. Schadensart, -ausmaß und -intensität, als auch der Schadensursachen. Hierzu gehören Aspekte der Bauforschung, die z. B. Kenntnis der Konstruktion und bereits durchgeführter Baumaßnahmen ebenso betreffen wie über die Nutzung. Darüber hinausgehende Bereiche der Bauhistorie werden nicht berührt.

### 1.3.1.1 Quellenstudium

#### Art der Quellen

Zu Beginn der Erstellung eines Sanierungskonzeptes werden verfügbare Bauunterlagen ausgewertet. Dazu gehören:

- Baupläne aller Art, Ausführungsunterlagen
  - ➔ Information über Konstruktion, Statik, Material,
- Bautagebuch, Schriftwechsel, Rechnungen, Dokumentationen, Bauwerksbeschreibungen etc.
  - ➔ Information über nachträglich durchgeführte Maßnahmen.

#### Ziel des Quellenstudiums

- Hinweise auf Schadensursachen
- Verständnis über Auswirkung der Schäden
  - z. B. kann der Mauerwerksaufbau Einfluss auf Feuchtigkeitsschäden haben
  - bei Sanierungsmaßnahmen können Materialien eingebracht worden sein, die schädliche Reaktionen mit den Baustoffen des Mauerwerks hervorrufen
  - Wetterdaten aus dem Zeitraum der Baumaßnahmen geben Hinweise auf Schadensursachen, z. B. Farbablösungen

Mithilfe des Quellenstudiums kann das Untersuchungsprogramm optimiert werden.

Zum Beispiel sind bei Kenntnis des Mauerwerksaufbaus keine Bohrungen zur Erkundung von Material und Schichtdicke des Mauerwerks erforderlich  
➔ wichtig vor allem bei Baudenkmälern, da die Substanzzerstörung minimiert wird.

#### Aufbewahrung von Quellen

Baupläne können je nach Objekt, Standort und Besitzverhältnissen bei verschiedenen Behörden oder Ämtern eingesehen werden. Dazu gehören:

- untere Baubehörde,
- Hoch- bzw. Tiefbauamt,
- Deutsche Bahn AG, Post etc.,
- Kirchenbauamt,
- Architekt.

Objekte von privaten Eigentümern sind neben der unteren Baubehörde meist auch bei den Eigentümern selbst dokumentiert.

### 1.3.1.2 Kartierung

#### Sinn einer Kartierung

An der RWTH Aachen wurde die Methode und Bewertung einer Bauwerkskartierung entwickelt [11]. Mit einer Kartierung werden je nach Aufgabenstellung verschiedene Gesichtspunkte verfolgt:

- **Dokumentation**

Die Kartierung dient der möglichst steingenaue Erfassung von Bauschäden, des Stein- und Fugenmaterials etc. Die Kenntnis der Schadensverteilung ist eine wichtige Voraussetzung zur Abgrenzung von besonders gefährdeten Bereichen, die einer speziellen Behandlung bedürfen, sowie zur Anlage von repräsentativen Musterflächen.

Insbesondere für den Denkmalschutz sind die zeichnerischen Dokumentationen z. B. der Steinbearbeitung oder älterer Restaurierungsmaßnahmen eine wertvolle Hilfe.

- **Ursachenfindung**

Die Kombination mehrerer Kartierungen wie Schadensformen und Intensitäten kann der Schadensermittlung dienen.

- **zusätzliche Information**

Über die Kartierung von Material der verwendeten Baustoffe, Oberflächenbearbeitung und Materialverlust lassen sich nicht dokumentierte, vorangegangene Instandsetzungsphasen nachweisen.

Generell erlauben die Schadens- und Materialkataster einen schnellen Überblick über die Altersabfolge unterschiedlicher Materialien und Bereiche.

Damit wird es ermöglicht, im Zuge der Instandsetzung die unterschiedlich alten Bauwerksteile, insbesondere unter dem Aspekt des Denkmalschutzes, individuell zu behandeln.

- **Quantifizierung**

Bei größeren Objekten wird die Lage und Anzahl der Probestellen optimiert.

Im Hinblick auf die Erstellung des Leistungsverzeichnisses werden in Abhängigkeit vom Maßstab des Plans genaue Massenermittlungen für die durchzuführenden Maßnahmen ermöglicht.

#### Kartierungsarten

Insbesondere bei größeren Objekten können verschiedene Kartierungen erforderlich sein:

- **Materialkartierung**

Dokumentation der verbauten Materialien nach

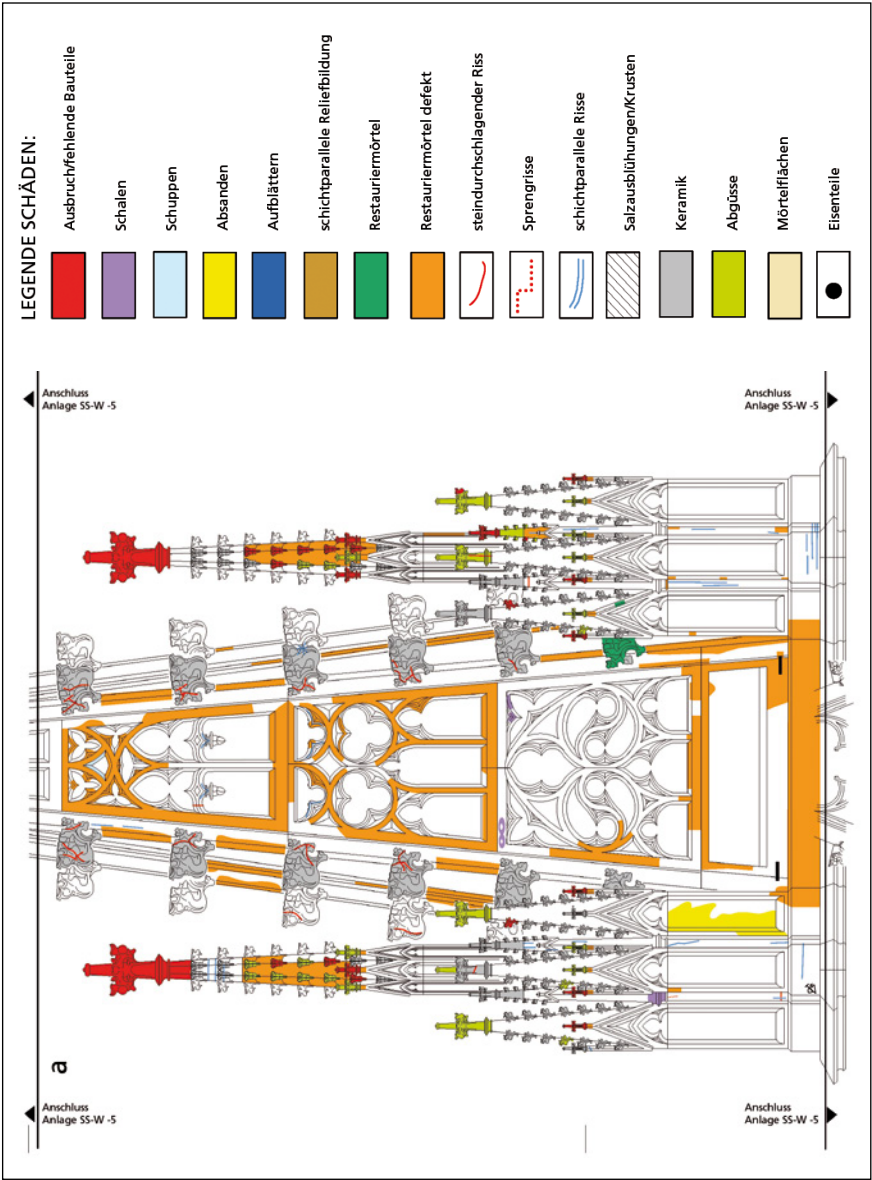
- Lithologie (verschiedene Steinsorten),
- ggf. Fugenmaterialien,

- sonstige Materialien wie Holz, Eisen,
- Steinerfüllungsmaterialien.

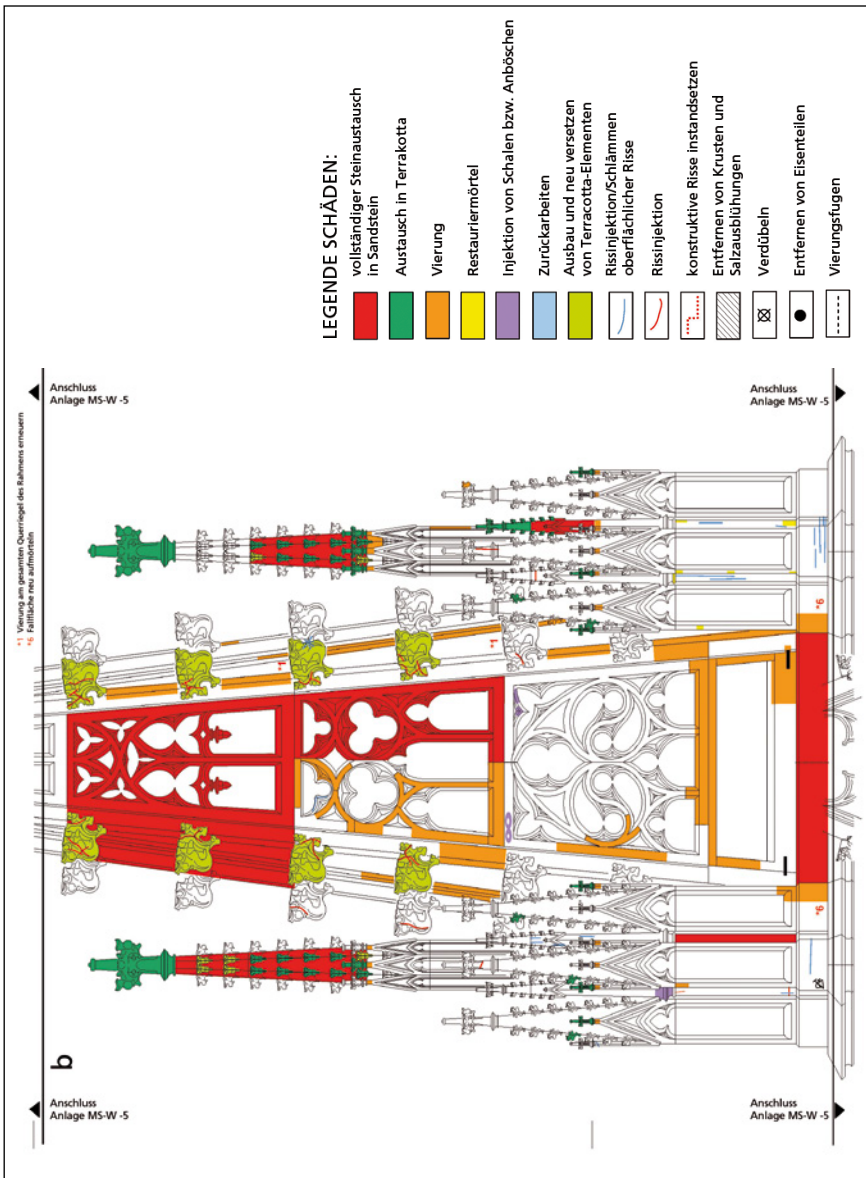
Die Materialkartierung gibt in Verbindung mit der Schadenskartierung Information über

- materialabhängige Schäden,
- erforderliche Steinaustauschmaterialien.
- **Kartierung der Schadensformen (Bild 5a)**  
Dokumentation von Art und Ausmaß der aufgetretenen Schäden
  - Information zur Festlegung der Sanierungsmaßnahmen
  - die Verteilung von Schäden lässt auf die Schadensursache schließen
- **Kartierung des Materialverlustes**
  - Dokumentation des Ist-Zustands
  - Information zur Festlegung der Sanierungsmaßnahmen
- **Kartierung von Oberflächenbildungen**  
Da Baustoffschäden nicht zusammen mit oberflächlichen Neubildungen bzw. anhaftendem Material wie
  - Bewuchs,
  - Kruste, ggf. verschiedene Krustenformen,
  - Verschmutzung, z. B. Taubenkot,
  - Salzausblühung,
 in einem Plan dargestellt werden können, ohne dass dieser an Übersichtlichkeit verliert, wird hierfür i. Allg. eine zusätzliche Kartierung benötigt.
  - Dokumentation des Ist-Zustandes
  - Information für Massenermittlung und Auswahl der Reinigungsverfahren
- **Fugenkartierung**  
Dokumentation des Fugenzustands und der Mörtelschäden, ggf. Dokumentation verschiedener Fugenmaterialien
- **Restauratorische Kartierung**  
Hierbei werden für Instandsetzung und historische Einstufung relevante Kriterien wie Steinbearbeitung und bautechnische Details aufgenommen. Verschiedene Bauabschnitte sind vielfach nicht direkt am Objekt ersichtlich, sondern müssen aus mehreren Plänen, z. B. aufgrund der Materialsorte, Steinbearbeitung, Verfugung etc. rekonstruiert werden.
  - Dokumentation unter kunsthistorischen Aspekten
  - Berücksichtigung denkmalpflegerischer Aspekte bei der Sanierung
- **Fotodokumentation**  
Lage der fotografischen Aufnahmepunkte, die die vorhandenen Schäden und Schadensursachen dokumentieren; von denkmalpflegerischer Bedeutung bei der Dokumentation von Inschriften, Steinmetzzeichen, Bearbeitungsformen
- **Maßnahmenkartierung (Bild 5b)**





**Bild 5 ■** Gegenüberstellung von Schadens- und Maßnahmenkartierung  
a: Schadenskartierung  
b: Maßnahmenkartierung



Information über Art und Menge der durchzuführenden Sanierungsmaßnahmen

- Steinaustausch, Einsetzen von Vierungen oder Platten,
- Zurückarbeiten,
- Festigung oder Hydrophobierung,
- Aufnehmen und Wiedereinsetzen von Bauteilen,
- sonstige Maßnahmen wie Verdübelung, Vernadelung, Rissverfüllung, Entfernen korrodierender Eisenteile.

→ genaue Massenermittlung für das Leistungsverzeichnis

→ wesentliche Ergänzung des Leistungsverzeichnisses als ›Positionsplan‹ während der Restaurierung

#### ■ Kartierung der durchgeführten Maßnahmen

Da aufgrund von unvorhergesehenen Schwierigkeiten oder veränderten Entscheidungen stets Korrekturen des ursprünglichen Maßnahmenkatalogs erfolgen, ist dies eine Dokumentation des Endzustandes insbesondere unter dem Aspekt des Denkmalschutzes.

### Durchführung der Kartierung

#### Grundlage

Eine Kartierung kann nur auf der Grundlage von Ansichtsplänen oder großformatigen entzerrten Fotos erfolgen. Die Genauigkeit und Aussagekraft ist dabei abhängig vom Maßstab des Planes. Geeignet sind möglichst steingenaue Pläne, etwa im Maßstab 1 : 20 oder 1 : 50.

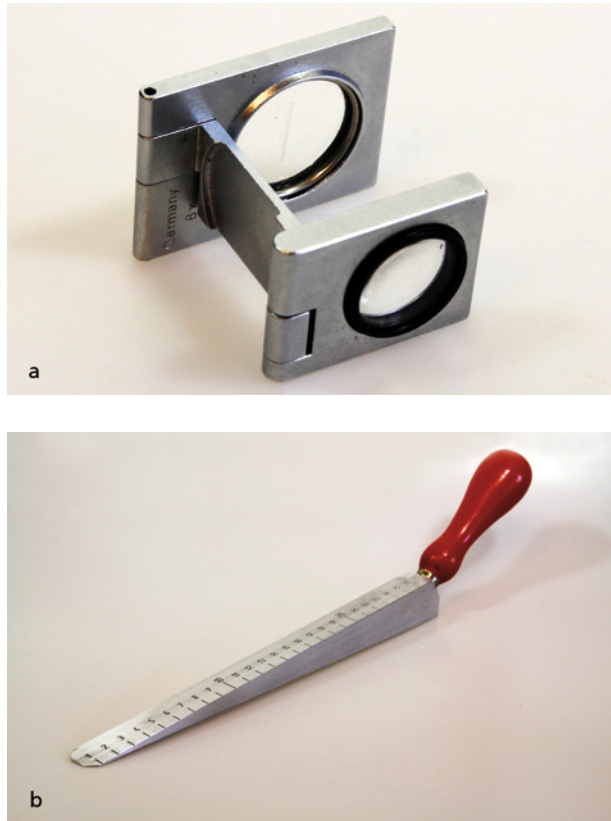
Die Erstellung der Pläne erfolgt vielfach über fotogrammetrische Verfahren, die von Spezialfirmen durchgeführt werden. Alternativ kann das Aufmaß, ggf. unter Zuhilfenahme fotografischer Aufnahmen, von Hand erfolgen. Nachteil ist ein hoher Zeit- und Kostenaufwand und eine verminderte Genauigkeit.

#### Arbeitsweise

Das Anlegen der Arbeitspläne erfolgt in jedem Falle am Objekt. Versuche, eine Kartierung von Werksteinschäden anhand von Fotos im Büro zu erstellen, erbrachten nicht den gewünschten Erfolg. Zum Erreichen höher gelegener Bauteile ist ein Arbeitsgerüst oder eine Hebebühne erforderlich.

### 1.3.1.3 Zerstörungsfreie Erkundung

Im Folgenden werden einige zerstörungsfreie Messverfahren vorgestellt, die zur Ermittlung von Bauschäden oder ihrer Einflussfaktoren in situ eingesetzt werden können (Bild 6). Zerstörungsarme und zerstörende Untersuchungen, insbesondere für Feuchtemessungen, die z. T. sowohl am Bauwerk als auch im Labor durchzuführen sind, werden in den Kapiteln 1.3.3.1 und 1.3.3.3 behandelt.



**Bild 6** ■ Werkzeug zur Rissbreitenbestimmung:  
a: Risslupe  
b: Risskeil

## Zerstörungsfreie Messverfahren

- **Riss-Boreskop** [12, S. 66 ff.]  
Gerät zur vergrößerten Beobachtung von Rissen in Bohrungen ab 0,3 mm Breite und in Spalten oder Rissen ab 0,2 mm Breite durch Bündelung und Umlenkung von Lichtstrahlen über einen Spiegel und Vorschaltung eines Linsenrades  
**Bewertung:** einfaches Gerät zur Übersichtsaufnahme
- **Rissmarke**  
Über dem Riss angebrachter Streifen aus Gips oder Mörtel zur Kontrolle von Rissuferbewegungen  
**Bewertung:** einfach, Registrierung von Rissuferbewegungen
- **Rissmonitor**  
Über dem Riss oder der Bewegungslinie angeklebte bzw. angeschraubte Kunststoffplatten, in deren Überlappungsbereich sich ein Messraster befindet

**Bewertung:** einfaches Gerät zur mehrfachen Registrierung von Ausmaß und Richtung von Bewegungen

- **Dehnungsmessstreifen**

Sehr genaues elektronisches Messverfahren der Längenänderung. Auf Kunststofffolien angebrachte Drähte geben unter Strom bei Längenänderung über Messverstärker eine Änderung des elektrischen Widerstandes an.

**Bewertung:** sehr genaues Verfahren, Einarbeitung erforderlich, Feuchtigkeitsempfindlich durch Diffusion

- **Setzdehnungsmesser**

Aufnahme von Längenänderungen mit einer Messuhr, die zwischen zwei Messspitzen geschaltet ist. Diese werden über aufgeklebte Metallplättchen mit dem Objekt verbunden.

**Bewertung:** sehr genaues Verfahren zur punktuellen Messung

- **Induktive Wegaufnehmer**

Über eine Führung am Bauwerk befestigtes Gerät zur elektronischen Messung von Längenänderungen, insbesondere für große Wege.

**Bewertung:** aufwendige Befestigung, sehr genaues Verfahren

- **Digitale Datenlogger** zur Messung von Rissbewegungen, auch kombiniert mit Klimamessung, Zeiterfassung, Datenübermittlung

**Bewertung:** sehr genaues Verfahren, für langfristiges Bauwerksmonitoring

- **Theodolit**

Winkelmessgerät zum Einmessen einzelner Punkte

**Bewertung:** zeitaufwendig, Methode aus dem Vermessungswesen, anwendbar zur Untersuchung von Deformationen

- **Nivelliergerät**

Messgerät, mit dem von einem feststehenden, eingemessenen Punkt die Höhenlage anderer Punkte festgestellt werden kann

**Bewertung:** anwendbar nur für Höhenänderungen

- **Ultraschallgerät** [13, S. 87 ff.], [14, S. 53]

Gerät zur Ortung von Hohlraum, Rissen, Mehrschaligkeit, Druckfestigkeit über die Ausbreitungsgeschwindigkeit elastischer Wellen, mit denen ein Bauteil durchschallt wird

**Bewertung:** schnelles Messverfahren, abhängig von Porosität, Gefüge, weitgehend feuchte- und salzunabhängig [13, S. 89]

- **Georadar** [13, S. 95 ff.], [14, S. 43 ff.]

Abfahren einer Fassade entlang Profilen mit Sende- und Empfangsantenne und Aufzeichnen der Empfangsamplitude in Abhängigkeit von der Zeit in Radargrammen. Durch die materialspezifische Reflexion von elektromagnetischen Wellen können das Vorhandensein und die Tiefenlage von Schallengrenzen, Hohlräumen und Materialeinlagerungen festgestellt werden.

**Einfluss:** steigender Feuchtegehalt verringert Wellengeschwindigkeit, Salze erhöhen Signalabsorption

**Bewertung:** vielseitiges und flexibel einsetzbares Verfahren, Datenaufnahme und -auswertung nur von qualifiziertem Fachpersonal. Gut geeignet für Strukturuntersuchung oder Ortung von Anomalien im Wandaufbau. Mit Transmissionsmessungen sind qualitative Feuchte- und Salzbestimmungen möglich. Schnelligkeit der Datenaufnahme abhängig von Zugänglichkeit des Objekts.

- **Mikroseismik** [14, S. 53 ff.]

Anregung mechanischer Wellen durch einen Impulshammer. Ausbreitung der Wellen ist von Materialeigenschaften des Bauteils wie Druckfestigkeit und Dichte abhängig. Die Wellen liegen mit 1 bis 10 kHz zwischen den tieffrequenten Signalen der normalen Seismik und den hochfrequenten des Ultraschalls. Mit Mikroseismik wird eine größere Reichweite als bei Ultraschallmessung erzielt.

Wellengeschwindigkeit korreliert mit Druckfestigkeit des durchschallten Materials. Kalibrierung von jedem Material über Druckfestigkeitsbestimmungen z. B. an Bohrkernen erforderlich.

**Bewertung:** Über verschiedene Messanordnungen sowie Kombination von Bohrloch- und Oberflächenseismik sind Aussagen zu Homogenität, Mehrschaligkeit und Füllmauerwerk möglich. Zerstörend durch Kalibrierbohrungen.

- **Infrarot-Thermografie** [15, S. 21], [16, S. 10 ff.]

Aufnahme der IR-Wärmestrahlung des Objektes, die sich aufgrund spezifischer Wärmeleitfähigkeiten und Wärmedurchlasswiderstände einstellt, mit spezieller Kamera und Wiedergabegerät.

**Anwendung:** Ortung von Wärmebrücken, Prüfung der Wirksamkeit von Wärmeschutzmaßnahmen, indirekte qualitative Messung der Feuchteverteilung aufgrund der Verdunstungswärme von Wasser, Ortung des Verlaufs von Leitungen oder von Leckstellen

**Bewertung:** teuer, sehr gut geeignet zur Untersuchung verdeckter Strukturen, Sachkenntnis erforderlich

- **Fotogrammetrie**

Mithilfe von Stereomessbildkameras und Auswertegerät maßliche Erfassung von Fassaden, mit der Risse, Deformationen und Durchfeuchtungen maßstabsgetreu dokumentiert werden können

**Bewertung:** teuer, Verfahren zum Herstellen verformungsgerechter Bestandspläne hoher Genauigkeit

- **Karsten'sches Prüfröhrchen**

Gerät zur Prüfung der Wasseraufnahmefähigkeit

**Funktion:** Ein mit Wasser gefülltes Röhrchen wird mit Dichtungsmasse an der Wand befestigt. Anhand der Messkala wird die Wasseraufnahme der Wand pro Zeit ermittelt.

**Bewertung:** einfache Messmethode, anwendbar für Vergleichsmessungen, z. B. zur Überprüfung von Hydrophobierungen, Abschätzung des Wasseraufnahmekoeffizienten möglich

- **Elektronische Feuchtemessgeräte** [15, S. 19 f.]

Qualitative Verfahren zur Messung der Feuchteverteilung und Feststellen des Durchfeuchtungsumfangs

**Funktion:** Messung der Änderung von elektrischer Leitfähigkeit bzw. Widerstand infolge unterschiedlicher Feuchtegehalte

**Anwendung:** Auffinden von Leckstellen, Bestimmung von Feuchtigkeit in Holz, Mörtel etc.

**Bewertung:** Verfälschung der Messwerte durch elektrisch leitende Metallteile und Salzgehalt, daher in historischem Mauerwerk zur Bewertung von Durchfeuchtung nicht anwendbar

- **Neutronensonde** [15, S. 20 f.]

Quantitatives radiometrisches Verfahren zur Messung der Feuchteverteilung. Handliches Messgerät, mit dem Neutronen hoher kinetischer Energie eingestrahlt werden. Sie werden an kleinen Atomkernen wie Wasserstoffkernen abgebremst. Durch Zählrohre wird die Neutronenkonzentration gemessen, die der Konzentration der Wasserstoffkerne und damit der Durchfeuchtung entspricht.

**Bewertung:** anerkanntes Verfahren zur relativen Feuchtemessung, teuer, Beeinflussung durch Salze und Metalle, Fachkenntnisse und Spezialausbildung sowie Sondergenehmigung/Strahlenschutz erforderlich

- **Raumklimamessung**

- **Thermohygrograf**

Gerät zur Messung und Aufzeichnung des Luftfeuchte- und Temperaturverlaufs innerhalb eines Zeitintervalls

**Anwendung:** Trocknung und Konservierung historischer Tapeten, Kontrolle des Raumklimas, veraltete Technik

**Bewertung:** leicht zu bedienen, in größeren Zeitabständen Kontrolle des Papiervorrats erforderlich

- **Digitale Datenlogger**

Überwachung und Registrierung des Raumklimas über Datenlogger mit Sensoren

**Anwendung:** Messung des Raumklimas bei Feuchteschäden

**Bewertung:** moderne Messtechnik, teuer, Messung über Fremdfirmen möglich

### 1.3.1.4 Schurfaufnahme

Zur Information über die Beschaffenheit des Fundamentes, den Zustand des Mauerwerks oder das Vorhandensein bzw. die Qualität von Abdichtungen



im erdberührten Bereich ist das Anlegen von Schürfen erforderlich. Ihre Begutachtung ermöglicht sowohl Aussagen über das Mauerwerk als auch über das Erdreich, z. B. zur Beurteilung von Feuchteschäden (Bild 7).



**Bild 7** ■ Schurf zur Erkundung von erdbe-rührtem Mauerwerk und Erdreich

### 1.3.1.5 Erkundung des Mauerwerksaufbaus

Zur Beurteilung von Schadensursachen sowie zur Wahl von Sanierungsverfahren und Vorgaben bei der Ausschreibung ist häufig die Kenntnis des Mauerwerksaufbaus erforderlich (Tabelle 1).



Tabelle 1 ■ Verfahren zur Erkundung des Mauerwerksaufbaus

Verfahren	Beschreibung	Anwendung	Wertung
<b>zerstörungsfrei:</b> Ultraschall	Messung der Schallgeschwindigkeit elastischer Wellen	Ortung von Hohlstellen, Mehrschaligkeit	abhängig von Porosität, Gefüge, Auswertung nur von Fachleuten
Georadar	Aussendung von Impulsen elektromagnetischer Wellen, die nach Reflexion an Grenzflächen von Empfangsantenne aufgenommen werden; laufzeitabhängige Darstellung der Signale in Radargrammen	flächenhafte Darstellung von Mauerwerksstrukturen, Hohlstellen, Materialeinlagerungen, Zerrüttungszonen	teuer, technisch und zeitlich aufwendig, Auswertung nur von Fachleuten
<b>zerstörend:</b> Kernbohrung	Gewinnung von Bohrkernen, meist im Nassbohrverfahren	eindeutige Ansprache des Mauerwerksaufbaus	aufwendig
Spiralbohrung	Gewinnung von Bohrklein	Ansprache von Material, Dicke der einzelnen Schichten, Hohlräumigkeit	geringere Zerstörung als Kernbohrung, da kleinerer Durchmesser, weniger aufwendig
Mikroseismik	Anregung elastischer Wellen durch Impulshammer; Analyse der Laufzeit der Wellen zur Strukturerkundung und von Materialeigenschaften	Erkundung von Mauerwerksstrukturen, Rissen	verschiedene Messanordnungen möglich, Auswertung nur von Fachleuten
Endoskopie	Aufnahme des Bohrlochs oder Hohlraums durch Spezialoptik eines Metallstabs (Durchmesser 4 bis 16 mm) oder flexibler Fiberstäbe (Kurvradius bis 25 mm) bzw. von Videoskopen (Durchmesser 10 bis 20 mm)	liefert in Ergänzung zu Bohrungen genaue Angaben zu Hohlräumen, Rissen; Sichtprüfung von schwer zugänglichen Stellen	meist Bohrloch erforderlich, handliches Verfahren, Erfahrung bei Interpretation erforderlich

### 1.3.1.6 Begleitende Untersuchung

#### Spezielle Probleme erfordern weitergehende Untersuchungen:

- **Statik**  
Bei Rissen oder Verformungen, aber auch zur Beurteilung der Tragfähigkeit beispielsweise von Brücken, muss ein Tragwerksplaner hinzugezogen werden. Um Aussagen über die Spannungsverhältnisse zu machen, sind Werte über die Druckfestigkeit des verbauten Materials erforderlich. Die Sanierungsmaßnahmen richten sich nach den statischen Gegebenheiten.
- **Bodenkundliche Untersuchung**  
Bei Setzungsschäden, Gründungsschäden, Hangschub etc. sind Baugrunduntersuchungen für die Wahl und Spezifizierung der Sanierungsverfahren erforderlich.
- **Bauphysikalische Untersuchung**  
Klimamessungen dienen zur Erfassung des Kleinklimas am Bauwerk mit Messungen von Luftfeuchte, Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit.

### 1.3.1.7 Fotografische, zeichnerische und textliche Aufnahme

Die textliche Form der Schadensaufnahme wird ergänzt durch die fotografische Darstellung typischer Schadensbilder. Zeichnerische Aufnahmen, z. B. der Profilierung auszutauschender Materialien, dienen als Vorgaben für das Leistungsverzeichnis.

## 1.3.2 Probenahme

### 1.3.2.1 Bohrungen

Bei der Entnahme von Probematerial durch Bohrungen werden unterschieden:

- **Bohrmehl**  
Verfahren: Herstellen von Bohrlöchern mittels Spiralbohrer, mit  $\varnothing < 10 \text{ mm}$   
Anwendung: Salzanalysen, Mauerwerkserkundung, endoskopische Aufnahme. Bedingt geeignet zur Bestimmung des Feuchtegehalts, falls Kernbohrungen schlecht gewinnbar sind, da die Vergrößerung der Oberfläche beim Bohrmehl einen höheren Messfehler nach sich zieht.  
Bewertung: geringer Zerstörungsgrad, weniger zeitaufwendig als Kernbohrungen
- **Kernbohrungen**
  1. **Trockenbohrung**  
Verfahren: Handbohrmaschinen mit speziell besetzten Diamantbohrkronen verschiedener Durchmesser, in Abhängigkeit von den verschiedenen

Prüfungen; z. B. sind für die Ermittlung der Druckfestigkeit nach DIN EN 1926 [17] Proben mit Durchmesser  $\geq 50$  mm erforderlich

**Anwendung:**

- ▣ optische Beurteilung des Kerns hinsichtlich Gefüge, Struktur, Verbund, z. B. Risse, Hohlräume etc.
- ▣ Durchführung von Laboruntersuchungen, bei denen keine Verfälschung der Werte durch Wasserspülung erfolgen darf: Bestimmung des Feuchtegehalts, Bestimmung der Ausgleichsfeuchte, Salzanalyse
- ▣ Durchführung weiterer Laboruntersuchungen

## 2. Nassbohrung

**Verfahren:** bei geringen Durchmessern Bohrkernentnahme mit Handbohrgerät, sonst fest angedübelte Maschine mit diamantbesetzter Krone

**Anwendung:** Entnahme von Bohrkernproben großer Durchmesser und aus größerer Mauerwerkstiefe, auch bei extremer Gesteinsfestigkeit

- ▣ optische Beurteilung des Kerns wie vor
- ▣ Durchführung von Laboruntersuchungen wie vor, mit Ausnahme von feuchteempfindlichen Untersuchungen

### 1.3.2.2 Weitere Materialproben

#### ■ Kratzproben

**Verfahren:** Abkratzen von oberflächlich anhaftendem Material wie z. B. Krusten oder Salzausblühungen, Abheben oder Abschaben von Anstrichen

**Anwendung:** qualitative Salzanalyse, quantitative Analyse von wasser- und säurelöslichen Bestandteilen von Krusten, qualitative Farbanalyse, Aussagen über Anstrichaufbau

**Bewertung:** nur an Oberfläche gering zerstörend, geringe Probemengen ausreichend (wenige Gramm je nach Analyse)

#### ■ Ausschneiden mit Trennscheibe o. Ä.

**Anwendung:** z. B. Gewinnung von zusammenhängenden Putzproben oder Werksteinstücken

**Bewertung:** größere Probenfläche als bei Kernbohrungen, Schnitttiefe bis max. 10 cm, starke Staubentwicklung

#### ■ Ausstemmen

**Verfahren:** Ausstemmen von Probematerial mit Stemmeisen o. Ä.

**Anwendung:** z. B. Gewinnung von Fugen- oder Mauermörtel für mörteltechnische Analysen wie Bindemittelbestimmung und Siebkornanalyse

#### ■ Probeentnahme zur Bestimmung von Mikroorganismen

**Verfahren:** Entnahme von repräsentativem Oberflächen- oder Querschnittsmaterial unter keimfreien Bedingungen, ggf. Gefriertrocknung in flüssigem Stickstoff (Kryotechnik)

**Anwendung:** Bestimmung von Mikroorganismen, z. B. zur Beurteilung des Anteils von Mikroorganismen an der Schadsalzbelastung von Steinoberflächen

- **Probenahme für Anstrichuntersuchungen**

**Verfahren:** Freilegung von Farbfassungen mit möglichst komplettem Schichtenaufbau mit feinen Messern und Nadeln aus der Dentaltechnik und chirurgischen Technik

**Anwendung:** für Pigment-, Farbstoff- und Bindemittelanalysen

### 1.3.3 Untersuchungsverfahren

Neben Untersuchungen, die vor Ort am Objekt durchgeführt werden können (Kapitel 1.3.1.3), gibt es eine Vielzahl von Laboranalysen und Berechnungsverfahren. Die Auswahl ist abhängig vom Einzelfall. Sie richtet sich nach dem jeweiligen Schadensausmaß, dem Wert des Bauwerks und dem unter wirtschaftlichen Aspekten zu betrachtenden Untersuchungsaufwand sowie nach bereits vorliegenden Daten. Die Auswertung ist von einem Fachmann durchzuführen, der auch Probenahme und Analyse mit verfolgen sollte.

#### **Untersuchungen zur Kennzeichnung des Gesteins in Zusammenhang mit einer Natursteinsanierung:**

1. Zur Kennzeichnung des Gesteins wird neben makroskopischen, mineralogisch-petrografischen Methoden vor allem die Mikroskopie herangezogen. Hierzu zählen u. a. Durchlicht- und Elektronenmikroskopie. Damit können der Mineralbestand und die Struktur, aber auch das Porenraumgefüge und die Porenraumausfüllung, z. B. zur Kennzeichnung der Verwitterungstiefe, bestimmt werden. Weitergehende Kenndaten liegen in vielen Veröffentlichungen vor (z. B. [18]).

**Ziel der Untersuchungen:**

- Überblick über mögliches Schädigungspotenzial und Beanspruchung des Gesteins,
  - Kenntnis über Zusammensetzung des Gesteins zur Bestimmung von vergleichbarem Steinaustauschmaterial.
2. Die physikalischen Eigenschaften können mit einer Reihe von Versuchen, die in DIN-Normen, DIN EN-Normen oder VDI-Richtlinien festgelegt sind, bestimmt werden. Mit diesen Versuchen wird unter Laborbedingungen versucht, der Situation am Bauwerk gerecht zu werden. Da aber am Bauwerk viele Einflussfaktoren auftreten, die im Labor nicht dargestellt werden können, werden hiermit nur Anhaltspunkte gewonnen, die im Gesamtrahmen zu werten sind.

#### Ziel der Untersuchungen:

- ▣ Auswahl von Steinaustauschmaterial, das dem verwendeten Material möglichst nahe kommen soll,
- ▣ Putzsanierung → Zusammensetzung des Mörtels richtet sich auch nach der Härte und ggf. Saugfähigkeit des Untergrundes,
- ▣ Aussage über Veränderungen des eingebauten Materials gegenüber bruchfrischem Material,
- ▣ Aussage über Widerstandsfähigkeit des Materials gegenüber atmosphärischen Einflüssen, Witterung, Feuchte, Druckbelastung,
- ▣ Angaben für statische Berechnungen.

Für das einzusetzende Austauschmaterial bestehen Prüfzeugnisse, die im Wesentlichen Daten über physikalische Eigenschaften wie kapillare Wasseraufnahme, Frostbeständigkeit, Druck- und Biegezugfestigkeit und Ausbruchfestigkeit am Ankerdornloch beinhalten. Diese müssen im Vergleich zum verbauten Material gewertet werden.

3. Die feuchtespezifischen Eigenschaften werden anhand von DIN-Normen, DIN EN-Normen, Verordnungen, WTA-Richtlinien festgestellt (Kapitel 1.3.3.3)

#### Ziel der Untersuchungen:

- ▣ Auswahl von Austauschmaterial,
- ▣ Bewertung von Feuchteschäden und Verhalten bei Feuchtebelastung,
- ▣ Kondenswasserberechnung,
- ▣ Wärmeschutzberechnung,
- ▣ Bestimmung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes → Feuchteschäden durch falschen Putzaufbau, Anstrich, feuchtesperrende Materialien.

4. Die Untersuchung von Schadstoffen erfolgt mit qualitativer und quantitativer chemischer Analytik und physikalischen Verfahren wie Röntgendiffraktometrie oder Elektronen-Mikrosonde.

#### Ziel der Untersuchungen:

- ▣ Aussage über Gehalt an mobilisierbaren Substanzen,
- ▣ Identifizierung gesteinschädlicher Mineralien.

5. Mikrobiologische Analysen sind für die Untersuchung des gesteinschädigenden Einflusses von Mikroorganismen relevant. Auch die Resistenz oder der Abbau von Steinschutzmitteln gegenüber Mikroorganismen kann hiermit untersucht werden.

#### Ziel der Untersuchungen:

- ▣ Information über Art und Anzahl von Mikroorganismen.

6. Mit Konservierungsversuchen wird die Auswirkung eines Festigungs- bzw. Hydrophobierungsmaterials auf ein bestimmtes Gesteins- oder Mörtelmaterial getestet.

**Ziel der Untersuchungen:**

- ▣ Bestimmung der Eindringtiefe des Mittels,
- ▣ Prüfung der Wirksamkeit des Mittels mithilfe gesteinsphysikalischer Untersuchungen,
- ▣ Bestimmung des Materialverbrauchs als Vorgabe der Sanierungsmaßnahmen.

7. Bei Mörtelanalysen werden Bindemittel und Zuschlag mit chemischer Analytik qualitativ und quantitativ festgestellt sowie daraus das Bindemittel-Zuschlag-Verhältnis errechnet. Die Sieblinie des Zuschlags wird nach einer DIN-Norm ermittelt. Für Zusatzuntersuchungen werden vor allem die Mikroskopie und Röntgendiffraktometrie eingesetzt, während Sekundärbildungen auch chemisch analysiert werden können.

**Ziel der Untersuchungen:**

- ▣ Aussage über Mörtelmaterial für Putz- und Fugensanierung,
- ▣ Bewertung von mörtelinduzierten Schäden.

8. Mit Anstrichuntersuchungen werden Aussagen über das Anstrichmaterial sowie den Anstrichaufbau gemacht. Hierfür können chemische und physikalische Verfahren zur Bindemittel- und Pigmentanalyse eingesetzt werden. Der Anstrichaufbau wird an Querschliffen mikroskopisch ermittelt.

**Ziel der Untersuchungen:**

- ▣ Aussage über Entfernung von Anstrichen,
- ▣ restauratorische Fragen, z. B. Ermittlung des originalen Anstrichs.

### 1.3.3.1 Allgemeine Gesteinskenndaten zur Klassifikation

Im günstigsten Fall sind zur Einstufung eines am Bauwerk verwendeten Gesteins Unterlagen vorhanden, die beispielsweise den Steinbruch oder die Bezugsfirma benennen. Muss das Gestein noch charakterisiert werden, bieten sich verschiedene mineralogisch-petrografische Methoden an [19, S. 12 ff.]:

- makroskopische Beurteilung mit bloßem Auge bzw. Lupe,
- mikroskopisch
  - ▣ Durchlichtmikroskopie,
  - ▣ Auflichtmikroskopie,
  - ▣ Elektronenmikroskopie,
- analytisch
  - ▣ Röntgenfluoreszenzspektroskopie,

- ▣ Mikrosonde,
- ▣ Röntgendiffraktometrie.

## 1. Lichtmikroskopie

Zur Durchlichtmikroskopie werden Dünnschliffe von 25 bis 30 µm Dicke hergestellt und im polarisierten Licht bei unterschiedlicher Vergrößerung betrachtet. Hier sind gesteinsbildende Minerale durch ihre Farbe, Lichtbrechung, kristallografische Ausbildung etc. zu unterscheiden.

Die Auflichtmikroskopie wird bei Anstrichuntersuchungen zur Beschreibung des Schichtenaufbaus angewendet. Dazu werden Probestücke in Kunstharz eingegossen, geschliffen und poliert. Für die Untersuchung von Naturstein ist sie i. Allg. nicht relevant.

**Ziel der Untersuchung:**

- Anhand der Gefüge- und Mineralbestimmung wird die Gesteinsart festgelegt. Daneben können Aussagen über Entstehung, Umwandlungsreaktionen und Beanspruchung eines Gesteins gemacht werden.

## 2. Rasterelektronenmikroskopie

- Kohlenstoff- oder Goldbedampfung der Probe zur besseren Leitfähigkeit
- Abtastung der Gesteinsprobe mit einem Elektronenstrahl. Die rückgestreuten Elektronen werden auf einem Bildschirm sichtbar gemacht. Durch die hohe Vergrößerung, bis zu ca. 100.000-fach, lassen sich Struktur, Porenräume und Porenraumeinlagerungen analysieren. Anhand von Kristallformen werden Minerale identifiziert.

**Ziel der Untersuchung:**

- Abschätzung der Porosität,
- Begutachtung von Porenfüllungen,
- Abschätzung der Festigkeit,
- qualitative Mineralbestimmung.

## 3. Röntgenfluoreszenzspektroskopie

- Bestrahlung einer Probe mit Röntgenstrahlen
- Emission der Röntgenstrahlen und Darstellung des Röntgenspektrums auf Bildschirm oder Schreiber
- Analyse der elementspezifischen Spektrallinien

**Ziel der Untersuchung:**

- qualitative Analyse der Probe,
- quantitative Analyse anhand der Intensität der Linien.

## 4. Elektronenstrahlmikrosonde

Kombination von Rasterelektronenmikroskop und Röntgenspektrometer:

- Bestrahlung einer geschliffenen und polierten Probe mit einem Elektronenstrahl,
- Emission der Röntgenstrahlung,
- Auswertung anhand von elementspezifischen Röntgenspektren, deren Peakhöhe die Häufigkeit des betreffenden Elementes angibt.

Ziel der Untersuchung:

- qualitative und halbquantitative Elementanalyse.

## 5. Röntgendiffraktometrie

- Bestrahlung einer pulverisierten Probe mit Röntgenstrahlen
- Beugung der Strahlen am Kristallgitter
- Auswertung des Beugungsspektrums anhand von spezifischen Peaks im Diffraktogramm.

Ziel der Untersuchung:

- qualitative und halbquantitative Analyse von Mineralen,
- Bestimmung von speziellen Mineralphasen der Gesteinsprobe.

### 1.3.3.2 Allgemeine physikalische Eigenschaften

#### 1.3.3.2.1 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit wird nach DIN EN 1926 [17] bestimmt. Die Messwerte sind für Steinaustauschmaßnahmen, zu verwendendem Mörtel und statische Berechnungen relevant.

#### Verfahren nach DIN EN 1926 [17]

- Würfelförmige Proben der Kantenlänge 70 oder 50 mm oder zylinderförmige Proben mit Ø 70 bzw. 50 mm und 70 bzw. 50 mm Höhe.
- Der Durchmesser des Probekörpers richtet sich nach dem größten Einzelkorn im Gestein im Verhältnis 10 : 1. Bei grobkörnigeren Proben (Größtkorn länger als 7 mm) wird eine größere Zahl an Probekörpern empfohlen.
- Abgleichen der Druckflächen
- Trocknen der Probekörper bei 70 °C bis zur Massenkonstanz, anschließende Lagerung bei 20 °C bis zur Temperaturkonstanz
- Messen des Probenquerschnitts A
- Einspannen der Probe in eine Druckprüfmaschine
- Gleichmäßige Steigerung der Belastung



- Messung der Höchstkraft  $F$ , bei der der Bruch eintritt
- Ermitteln der Druckfestigkeit  $R$  gemäß der Formel  $R = F / A$   
Dabei sind:  
 $R$  = Druckfestigkeit [MPa],  
 $F$  = Bruchlast [kN],  
 $A$  = Anfangsquerschnitt [mm<sup>2</sup>].
- Angabe der Druckfestigkeit in MPa auf min. 2 Dezimalstellen genau
- Angabe des Mittelwerts der Druckfestigkeit mit der Standardabweichung
- Angabe des Variationskoeffizienten

### 1.3.3.2.2 Haftzugfestigkeit

Durch Haftzugprüfungen wird die Kohäsion des Mineralverbandes gemessen. Im Natursteinbereich dienen sie zur Überprüfung der Wirksamkeit von Steinfestigern. Die Prüfungen erfolgen in Anlehnung an DIN EN 1542 [20].

#### Verfahren

- Aufkleben von Prüfstempeln, Ø 50 mm, mit Reaktionsharzkleber, Prüfstempel und Bohrkern sollten gleichen Durchmesser haben.
- Befestigen der Prüfstempel am Haftzuggerät. Kontinuierliche und gleichmäßige Steigerung der Zugkraft mit 0,05 MPa / s bis zum Eintreten des Bruchs. Beurteilung der Bruchfläche, wobei ein Bruch in der Klebefuge nicht zur Festigkeitsberechnung herangezogen werden sollte.

- Berechnung der Haftzugfestigkeit nach  $f_h = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot D^2}$

Dabei sind:

$f_h$  = Haftfestigkeit [MPa],

$F$  = Bruchlast [N],

$D$  = mittlerer Durchmesser des Prüfkörpers [mm].

Eine Möglichkeit zur Überprüfung der Wirksamkeit von Festigungsmitteln ist die Ermittlung der Haftzugfestigkeit im Tiefenprofil. Dies kann entweder an Bohrkernscheiben oder am vollständigen Bohrkern erfolgen, der nach jedem Abriss begradigt und wieder aufgeklebt wird. Die Haftzugfestigkeit des festigten Bohrkerns wird der der unbehandelten Probe gegenübergestellt, um die Verwitterungszone zu erfassen. Durch Auftragen von Haftzugfestigkeit und Tiefen des Abrisses in einem Koordinatensystem erhält man ein Festigkeitsprofil des Bohrkerns.

Snethlage [21, S. 106] benutzt dafür Bohrkernscheiben mit min. 30 mm Durchmesser und min. 5 mm Dicke.

### 1.3.3.2.3 Biegezugfestigkeit

Neben der Haftzugfestigkeit kann auch die Biegezugfestigkeit zur Ermittlung des Festigkeitsprofils nach Konservierungsmaßnahmen herangezogen werden. Zur Kontrolle von Festigungsmaßnahmen gibt es keine DIN-Normen. Nach Snethlage [21, S. 71, 106] werden min. 5 mm dicke Scheiben von Bohrkernen mit min. 50 mm Durchmesser zur Ermittlung des Festigkeitsprofils verwendet, wobei jede Scheibe einzeln bei Ringauflage bis zum Bruch belastet wird. Die Aneinanderreihung der einzelnen Messwerte ergibt das Festigkeitsprofil.

Für hinterlüftete Fassadenplatten ist nach DIN 18516-3 [6] ein Biegeversuch nach DIN EN 12372 [22] oder DIN EN 13161 [23] durchzuführen.

### Verfahren

Die Biegefestigkeit ist in DIN EN 12372 [22] genormt. In dieser Norm wird die Biegefestigkeit unter Mittellinienlast festgelegt. In DIN EN 13161 [23] erfolgt die Prüfung unter Dreipunktbelastung [24, S. 40].

Oberflächenbeschaffenheit der Probe gesägt, geschliffen oder poliert.

- Abmessung der Probe: 50 mm × 50 mm × 300 mm, wenn größtes Korn kleiner 25 mm ist. Für andere Maße gelten entsprechende Anforderungen.
- Trocknung bei 70 °C bis zur Massekonstanz, danach Lagerung bei 20 °C bis zum Wärmeausgleich
- Lagerung der rechteckigen Probe mittig auf 2 Biegeauflagern senkrecht zur Längsachse des Prismas mit definiertem Auflagerabstand  $l$
- Belastung der Probe über eine Biegeschneide, die mittig zu den Auflagerwalzen angeordnet ist. Gleichmäßige Erhöhung der Belastung bis zur Einstellung eines Bruchs. Die Belastung wirkt i. d. R. senkrecht zur Schichtfläche, bei ausgeprägter Schichtung oder Schieferung längs zu den Flächen.

- Berechnung der Biegefestigkeit nach  $R_{tf} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2}$

Dabei sind:

- $R_{tf}$  = Biegefestigkeit [MPa],
- $F$  = Bruchlast [N],
- $l$  = Stützweite, Abstand der Auflagerwalzen [mm],
- $b$  = Breite der Probe [mm],
- $h$  = Höhe der Probe [mm].

#### 1.3.3.2.4 Abriebfestigkeit

Der Abnutz widerstand eines Baustoffs wird nach DIN EN 14157 BESTIMMUNG DES WIDERSTANDES GEGEN VERSCHLEISS (Capon-Methode) [25] ermittelt. Im Vergleich zur bisherigen Prüfung nach DIN 52108 VERSCHLEISSPRÜFUNG MIT DER SCHLEIFSCHLEIBE NACH BÖHME [26] ist die EN-Norm deutlich ungenauer, bei allerdings geringerem Prüfaufwand [24, S. 40].

#### DIN EN 14157 [25]

##### Verfahren

Ein senkrecht stehender prismatischer Probekörper wird auf eine vertikal angeordnete Schleifscheibe gepresst. Die Länge der Schleifspur, die das Schleifmittel zwischen Probekörper und Schleifscheibe am Probekörper hinterlässt, wird nach einer bestimmten Anzahl von Umdrehungen gemessen.

##### Auswertung

Die Länge der Schleifspur ist ein Maß für den Abrieb.

Nach [24, S. 40] wird vom Deutschen Natursteinverband DNV und der Landesgewerbeanstalt Bayern LGA neben der Prüfung nach DIN EN 14157 [25] auch die Prüfung nach DIN 52108 [26] zugelassen.

#### DIN 52108 [26]

##### Verfahren

Ein Probekörper mit quadratischer Prüffläche von  $50\text{ cm}^2$  wird in eine Haltevorrichtung eingespannt und sitzt unter einer Belastung von  $294\text{ N}$  auf einer Schleifscheibe auf, die mit Schleifmittel bestreut ist. Die Schleifscheibe wird mit 30 Umdrehungen pro Minute bewegt.

- Durchführung von 16 Prüfperioden mit jeweils 22 Umdrehungen
- Wägung der Probe vor Durchführung des Versuches und nach je 4 Prüfungen

##### Auswertung

Ermittlung des Schleifverschleißes anhand des Dicken- oder Volumenverlustes der Probe.

- Dickenverlust: mittlere Längenänderung nach 16 Prüfperioden an 9 Messpunkten, ermittelt mit einer Messuhr
- Volumenverlust: Massenverlust nach 16 Prüfperioden im Verhältnis zur Rohdichte

### 1.3.3.2.5 Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul  $E$  gibt das Verhältnis der Spannung  $\sigma$  zur elastischen Verformung  $\varepsilon$  an und ist ein Maß für die Duktilität bzw. lastbezogene Verformbarkeit eines Materials. Er dient zur Beurteilung der Rissicherheit [3, S. 147].

$$E = \sigma / \varepsilon \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Entsprechend den Prüfverfahren wird nach statischem Druck- bzw. Zug-E-Modul und dynamischem E-Modul unterschieden.

#### Verfahren

Der statische E-Modul wird aus der Druck- bzw. Zugfestigkeit und der jeweiligen Dehnung ermittelt. Die grafische Darstellung ergibt eine durch den Ursprung gehende Kurve. Nach [3, S. 145] wird der E-Modul als Sekantenmodul dieser Kurve bei 1/3 der Höchstspannung definiert. Nach DIN EN 14580 PRÜFVERFAHREN FÜR NATURSTEIN – BESTIMMUNG DES STATISCHEN ELASTIZITÄTSMODULS [27] wird nach einachsialer Beanspruchung von Prüfkörpern unter Druck die Spannung (max. 1/3 der Druckfestigkeit des Gesteins) und Verformung des Prüfkörpers mit Dehnmessstreifen gemessen. Angabe in N/mm<sup>2</sup> oder MPa.

Der dynamische E-Modul wird zerstörungsfrei mithilfe wellenförmiger Vorgänge unterschiedlicher Frequenzen ermittelt, z. B. durch Ultraschall (Messung der Schalllaufzeit) oder nach DIN EN 14146 [28] durch Resonanzfrequenzmessung (Messung der Resonanzfrequenzen von Dehn- bzw. Biegeschwingungen).

Der Wert des dynamischen E-Moduls liegt nach Messungen von Alfes [29, S. 1761] höher als der des statischen E-Moduls. Je nach angewandtem Verfahren für die Messung des dynamischen E-Moduls werden unterschiedliche Werte erhalten.

#### Ziel der Untersuchung

Anforderungen hinsichtlich des dynamischen E-Moduls werden z. B. an den Mörtel bei Sanierungsmaßnahmen gestellt. Der E-Modul sollte hier möglichst klein und nicht größer als der des Steines und intakten Altmörtels sein [3, S. 648].

In der Fachliteratur finden sich Werte der E-Moduln für verschiedene Steinarten [3, S. 159], [30, S. 56, 58].

### 1.3.3.2.6 Ausbruchlast am Ankerdornloch

Die Ermittlung der Ausbruchlast am Ankerdornloch dient nach DIN EN 13364 [31] der statischen Berechnung für die Eignung von hinterlüfteten Fassadenplatten.

Der DNV Deutsche Naturwerksteinverband hat ein »*typengeprüftes Bemessungsverfahren für Fassadenplatten aus Naturwerkstein*« herausgegeben, das mit Hilfe von Computerprogrammen (DNV 1 und DNV 2) durchgeführt werden kann. Damit werden Untersuchungen der LGA Würzburg zum Tragverhalten von dornlagerten Fassadenplatten der Maße 1.200 mm × 500 mm × 30 (Biegefestigkeit und Ausbruchlast am Ankerdornloch) eindeutig bestätigt [32, S. 94].

### Verfahren nach DIN EN 13364 [31]

- quadratische Probekörper mit 200 mm Seitenlänge und 30 mm Dicke (Identitätsprüfung, höhere Werte bei Anwendungsprüfung)
- Einsetzen der Prüfdorne in die vorgebohrten Ankerdornlöcher unter Beachtung der Anisotropieebenen
- Trocknung der Probekörper bei 70 °C bis Massenkonstanz
- Messung der Dicke  $d$  des Probekörpers und des Abstands  $d_1$  von Lochkante bis Unterseite Platte
- Einspannen der Dorne in die Prüfmaschine und Steigerung der Belastung mit 50 N/s bis zum Bruch
- Ermittlung der Bruchlast  $F$  in N unter Angabe des Abstands  $d_1$  des Ankerdornlochs zur Sichtfläche in Kraftrichtung und Angabe des max. Abstands  $b_A$  der Lochmitte zur Bruchkante sowie der jeweiligen Mittelwerte

### 1.3.3.2.7 Thermische und hygrische Längenänderung

#### 1. Thermische Längenänderung

Mineralische Baustoffe reagieren auf Abkühlung bzw. Erwärmung mit Volumenänderung und dem Auftreten von Spannungen zwischen der oberen Gesteinszone und dem unbelasteten Kern (Kapitel 2.1.10.6 und 2.4.2.2). Zudem wird das Gefüge durch das vielfach anisotrope Ausdehnungsverhalten von Kristallen sowie der verschiedenen Minerale belastet.

Die Wärmedehnung  $\varepsilon_T$  wird durch den Wärmedehnungskoeffizienten  $\alpha_T$  [mm/(m · K)] für einen bestimmten Temperaturbereich angegeben.  $\alpha_T$  beschreibt die Längenänderung gegenüber der Ausgangslänge und pro Temperaturintervall.

$$\varepsilon_T = \alpha_T \cdot \Delta_T$$

Dabei sind:

$\varepsilon_T$  = Wärmedehnung [mm/m],

$\alpha_T$  = Wärmedehnungskoeffizient [mm/(m · K)],

$\Delta_T$  = Temperaturänderung [K].

### Verfahren

Die Messung erfolgt nach DIN EN 14581 BESTIMMUNG DES LINEAREN THERMISCHEN AUSDEHNUNGSKOEFFIZIENTEN  $\alpha$  [33].

- Messung der jeweiligen linearen Ausdehnung bezogen auf die Länge L des Prüfkörpers bei 20 °C mit Dilatometer oder Dehnungsmessstreifen

$$\alpha = (L_T - L_{20^\circ\text{C}}) / L_{20^\circ\text{C}} \cdot \Delta T$$

- Angabe in mm/(m · K)

## 2. Hygrische Längenänderung

Hygrische Längenänderung entsteht durch Anlagerung von Wasser in den Gesteinsverband, was zu einer Volumenänderung führt.

Einflussfaktoren:

- Schichtflächengefüge,
- innere Oberfläche,
- Feuchtegehalt.

Die hygrische Dehnung wird beschrieben durch den hygrischen Dehnungskoeffizienten im jeweiligen Feuchteintervall.

$$\varepsilon_F = \alpha_F \cdot \Delta_F$$

Dabei sind:

$\varepsilon_F$  = hygrische Dehnung [mm/m],

$\alpha_F$  = hygrischer Dehnungskoeffizient [mm/m % r. F.],

$\Delta_F$  = Feuchteintervall [% r. F.].

### Verfahren

Die Messung erfolgt nach DIN EN 13009 WÄRME- UND FEUCHTTECHNISCHES VERHALTEN VON BAUSTOFFEN UND BAUPRODUKTEN – BESTIMMUNG DES HYGRISCHEN DEHNKOEFFIZIENTEN [34].

Weitere Messverfahren:

- Dehnungsmessstreifen mit Kompensationsmessstab aus Duranglas,
- Differenzdilatometer mit induktiven Dehnungssensoren.

### 1.3.3.2.8 Frost-Tau-Wechsel

Durch zyklische Frost-Tau-Wechsel tritt eine Schädigung poröser mineralischer Baustoffe ein, deren Ursache in komplexen physiko-chemischen Vorgängen liegt [35, S. 1533 ff.]. Reines Wasser dehnt sich beim Gefrieren um 9 % seines Volumens aus, da am Nullpunkt die Dichte von Eis niedriger ist als die von flüssigem Wasser.

Im Porenraum sind jedoch auch stets Salze vorhanden, die sich auf den Gefrier- und Auftauvorgang auswirken. Salzlösungen haben eine niedrigere Gefriertemperatur als reines Wasser und weisen bei niedrigeren Temperaturen ihre größte Dichte auf. Insbesondere bei Salzlösungen geringer Konzentration kann die Temperatur der größten Dichte mit der Gefriertemperatur identisch sein. Diese kritische Konzentration liegt z. B. bei NaCl bei 2,4 %. Beim Auftauen dehnt sich die Salzlösung aus und übt z. T. beträchtliche Drucke auf die Porenwandungen auf.

### Untersuchungsziele

- Beurteilung eines Baustoffs bei Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung nach DIN EN 12371 PRÜFVERFAHREN FÜR NATURSTEIN – BESTIMMUNG DES FROST-WIDERSTANDES [36]
- Beurteilung der Verwitterungsbeständigkeit nach DIN 52008 [37]

### Durchführung nach DIN EN 12371, Verfahren B [36]

- Trocknung der Proben bei  $70 \pm 5^\circ\text{C}$  bis zur Massenkonstanz, Anordnung der Proben in einem Behälter
- Zugabe von Wasser bis zur halben Probenhöhe, Auffüllung bis zur Bedeckung der Proben in bestimmten Zeitabständen
- Messung der Masse in Wasser  $m_{h0}$  und der Masse in Luft  $m_{s0}$
- Lagerung bis zur Sättigung in Wasser, anschließend Durchführen von Frost-Tau-Zyklen: Einfrieren im Kälteschrank bei Luft für 6 h bei  $-12^\circ\text{C}$ , danach 6 h Auftauen in  $20^\circ\text{C}$  warmem Wasser
- Messung der Masse  $m_{hn}$  und  $m_{sn}$  nach jedem Zyklus  $n$
- Auswertung:  
Durchführung der Zyklen, bis folgende Schäden auftauchen:
  - mehrere Risse oder größere Materialabsonderung nach Sichtprüfung,
  - Masseverlust von 1 % oder,
  - dynamischer E-Modul nach DIN EN 14146 [28] nur noch 30 % des Ausgangswerts vom Gestein.
 Auswertung nach der Anzahl der bis dahin erreichten Frost-Tau-Wechsel.

Gemäß DIN 52008 [37] wird für Bauteile mit geringer Wasserbeanspruchung die Prüfung des Frostwiderstandes mit 12 Frost-Tau-Wechseln empfohlen, für Bauteile mit hoher Wasserbeanspruchung mit 48 Frost-Tau-Wechseln.

## Beurteilung

Diese Norm dient zur vergleichenden Beurteilung von Gesteinen bei Frostbeanspruchung. Eine Verwitterungsbeständigkeit kann aufgrund mangelnder Erfahrungswerte damit nicht festgestellt werden. Hierfür sind nationale Prüfverfahren wie DIN 52008 Verfahren C (Frost-Tau-Wechsel mit Frostbeanspruchung an Luft) und Verfahren D (Frost-Tau-Wechsel mit Frostbeanspruchung unter Wasser) sowie Beurteilungen von Fachleuten zur Feststellung von Veränderungen des Prüfkörpers wie Absanden, Abbröckeln, Rissbildung nach Augenschein heranzuziehen [37], [38], [39 S. 40]. Dieser Versuch stellt einen Laborversuch unter verschärften Bedingungen dar und kann z. B. aufgrund der Wassersättigung und des Diffusionsverhaltens nicht unbedingt mit den Prozessen am Bauwerk verglichen werden. Er gibt aber Anhaltspunkte, die zusammen mit anderen physikalischen Prüfverfahren zu werten sind.

### 1.3.3.2.9 Kristallisationsversuche

#### 1. Kristallisationsversuch mit Natriumsulfat

DIN EN 12370 [40] beschreibt einen Kristallisationsversuch mit Natriumsulfat. Er dient der Beurteilung der Salzbeständigkeit und ggf. der Verwitterungsbeständigkeit von Naturstein nach DIN 52008 [37] speziell unter Zugrundelegung des Kristallisationsdrucks.

#### Untersuchungsziel

Das Verfahren beruht auf der Umkristallisation von wasserfreiem Natriumsulfat  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  zu Glaubersalz  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$  unterhalb von  $32,4^\circ\text{C}$  unter beträchtlicher Volumenzunahme. Durch die Prüfung wird die Gefügezerstörung durch Salzbelastung basierend auf dem Hydratationsdruck festgestellt.

#### Durchführung

- Maße der Prüfkörper: Würfel mit 4 cm Kantenlänge
- Trocknung bis Massenkonstanz
- Durchführung von 16 Kristallisationszyklen:
  - ▢ Tränkung für 2 h mit 14 %iger Natriumsulfatlösung
  - ▢ Trocknung für 16 h bei  $105^\circ\text{C}$
  - ▢ Abkühlung auf Raumtemperatur
- Ermittlung des Masseverlustes der Prüfkörper in %



## Auswertung

- Feststellung von Veränderungen nach Augenschein
- Feststellung des Gewichtsverlusts
- Das Prüfverfahren ist für Naturstein als wenig aussagekräftig zu beurteilen [24].

## 2. Salzsprengetest

Der Salzsprengetest nach VDI-Richtlinie 3797 [41] beruht, ähnlich wie der Kristallisationsversuch nach DIN EN 12370 [40], auf der Umkristallisation von Natriumsulfat. Er dient der Beurteilung der Salzbeständigkeit von Probekörpern, die mit Konservierungsmitteln behandelt worden sind.

### Durchführung

- Trocknung der Prüfkörper mit 40 cm Kantenlänge 16h bei 60 °C und Wägung nach Abkühlung auf Raumtemperatur, anschließend Behandlung mit Konservierungsmittel
- ausreichende Lagerung, Wiederholung der Trocknung und Wägung zur Feststellung der aufgenommenen Menge des Konservierungsmittels
- Tränkung 4h lang in 10 %iger Natriumlösung von 20 °C
- Trocknung 16h bei 60 °C, Abkühlung innerhalb von 2h auf Raumtemperatur und Wägung

Durchführung von 100 Tränkung-/Trocknung-Prüfzyklen oder so lange, bis ein 10 %iger Gewichtsverlust erreicht ist

### Beurteilung

Die Beurteilung erfolgt aufgrund der Angabe, nach wie vielen Prüfzyklen ein 10 %iger Gewichtsverlust erfolgt. Andernfalls ist der Gewichtsverlust nach Durchlaufen von 100 Prüfzyklen anzugeben.

### 1.3.3.2.10 Verwitterungsbeständigkeit

DIN 52008 [37] legt die wichtigsten Verfahren zur Beurteilung der Verwitterungsbeständigkeit fest. Da die Auswahl der durchzuführenden Untersuchungen und ihre Bewertung nur vom Fachmann durchzuführen sind, werden in DIN 52008 [37] keine Schwellenwerte festgelegt.

Zur Beurteilung der Verwitterungsbeständigkeit von Mauersteinen werden folgende Prüfungen empfohlen:

- eine Prüfung der Wasseraufnahme nach DIN EN 13755 [42],
- je nach Wasserbeanspruchung eine Frostprüfung nach DIN 52008 Anhang C oder D oder
- eine Frost-Tau-Wechsel-Prüfung nach DIN EN 12371 [36].

## Verfahren

Gemäß DIN 52008 [37] sind in Zusammenhang mit der Beurteilung der Verwitterungsbeständigkeit gesteinskundliche Untersuchungen sowie physikalische und chemische Prüfungen auf Tonanteile, Rissbildung durch Sonnenbrand und verfärbende Mineralien durchzuführen. Zur weiteren Klassifizierung dienen Prüfungen der Wasseraufnahme, des Sättigungswertes, Frost-Tau-Wechsel- bzw. Kristallisationsversuche (Kapitel 1.3.3.2 und 1.3.3.3). Die Einstufung in verwendbare oder nicht verwendbare Gesteine ist durch weitere Versuche wie Biegeversuch, Ausbruchlast am Ankerdornloch, Druckversuch und dynamischer E-Modul (Kapitel 1.3.3.2) zu ergänzen.

Einen Hinweis auf den Entfestigungsgrad von Naturstein gibt die Ultraschallanalytik. Die Abnahme der Kompressionswellengeschwindigkeit geht mit einer Zunahme der Porosität einher, was als Hinweis auf erhöhte Verwitterung gelten kann. Da sich Ultraschallwellen nicht über Hohlräume ausbreiten, sondern diese umgehen, können durch Erhöhung der Scheingeschwindigkeit Risse und Inhomogenitäten festgestellt werden [14, S. 54].

Für Marmor wurden anhand der Ultraschall-Laufzeiten Schadensklassifikationen durch Verwitterung aufgestellt [43, S. 95].

Der Verwitterungszustand von Naturstein kann anhand eines Bohrwiderstandsprofils abgebildet werden. Dies erhält man durch Aufzeichnung der Eindringgeschwindigkeit eines 3 mm großen Bohrers im Verhältnis zur jeweiligen Bohrtiefe bei konstanten Bohrbedingungen. Ein geringer Bohrwiderstand beschreibt eine Gefügauflockerung bzw. Entfestigung des Materials. Damit dient das Bohrwiderstandsverfahren auch als Entscheidungshilfe für Konservierungsmaßnahmen [44].

### 1.3.3.2.11 Bestimmung der Dichte

DIN EN 1936 [45] dient zur Bestimmung von Rohdichte, Reindichte, offener Porosität und Gesamtporosität. Die Dichtebestimmung wird u. a. als Kennwert für vergleichbares Steinaustauschmaterial herangezogen. Die Rohdichte wirkt sich auch auf die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen aus und ist für den sommerlichen Wärmeschutz relevant. Im Unterschied zur **Reindichte** wird bei der **Rohdichte** eines Gesteins auch der Porenraum berücksichtigt.

Rohdichte $\rho_b$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Verhältnis zwischen Masse des trockenen Probekörpers und seinem Rohvolumen
Rohvolumen $V_b$ [ml]	Volumen der Gesteinsprobe einschließlich Porenraum

Reindichte $\rho_r$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Verhältnis zwischen der Masse des trockenen Probekörpers und dem Volumen seiner festen Bestandteile
offene Porosität $p_o$ [%]	Verhältnis zwischen dem Volumen der offenen Poren und dem Rohvolumen des Probekörpers
Gesamtporosität $p$ [%]	Verhältnis zwischen dem Volumen der Poren (offene und eingeschlossene) und dem Rohvolumen des Probekörpers

## Verfahren

### 1. Bestimmung der Rohdichte

- Trocknung des Probekörpers bei 70 °C bis zur Massenkonstanz, Wägung  $m_d$
- in Vakuumkammer Absaugung von Luft aus offenen Poren bei 2 kPa während 2 h, danach Zugabe von Wasser bis zur Bedeckung der Proben bei konstantem Druck von 2 kPa
- Einstellung von Atmosphärendruck für 24 h
- Wägung des Probekörpers unter Wasser  $m_h$
- Wägung des rasch abgetrockneten gesättigten Körpers  $m_s$
- Angabe der Rohdichte als Verhältnis zwischen der Masse des getrockneten Probekörpers und seinem Rohvolumen sowie des Mittelwerts

$$\rho_b = \frac{m_d}{m_s - m_h} \rho_{rh} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Dabei ist:

$\rho_{rh}$  = Dichte des Wassers [kg/m<sup>3</sup>].

### 2. Bestimmung der Reindichte an der gemahlene Probe mittels Pyknometer

- Mahlung bis 0,063 mm Korngröße
- Trocknung bis zur Massenkonstanz, Wägung der Masse  $m_e$
- Füllung eines Pyknometers etwa halb voll mit entionisiertem Wasser
- Hinzufügen der Messprobe, Rühren zum Dispergieren
- Pyknometer zu einem Vakuum von 2 kPa evakuieren, bis keine Luftblasen mehr aufsteigen, Auffüllen fast bis zum Rand mit deionisiertem Wasser bis zum Absetzen der Feststoffe, danach mit entionisiertem Wasser, verschließen mit Stopfen, Wägung  $m_1$
- Entleerung des Pyknometers, Auffüllung mit entionisiertem Wasser, Wägung  $m_2$

### ■ Auswertung nach

$$\rho_r = \frac{m_e}{m_2 + m_e - m_1} \rho_{rh}$$

Dabei sind:

$m_e$  = Einwaage [g],

$\rho_{rh}$  = Dichte des Wassers [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],

$m_1$  = Masse des mit Wasser und dem zerkleinerten Probekörper gefüllten Pyknometers [g],

$m$  = Masse des mit Wasser gefüllten Pyknometers [g].

Die Porosität kann auch mithilfe der Quecksilberdruckporosimetrie festgestellt werden [18, S. 80]. Dabei kann die Porendurchmesser- und Porenverteilung in Abhängigkeit von dem Druck, mit dem das Quecksilber in die Poren gepresst wird, angegeben werden.

### 1.3.3.3 Feuchtigkeitsbestimmung

#### Mechanismen der Feuchteaufnahme

Wasser kann von einem mineralischen Baustoff durch mehrere Mechanismen aufgenommen und transportiert werden. Eine wichtige Rolle spielt dabei die Porengröße.

**Laminare Strömung oder Sickerströmung:** Steht ein Baustoff unter hydrostatischem Druck, wird Wasser durch Sickerströmung transportiert. Dieser Vorgang kann insbesondere in Rissen auch bei Schlagregen und Spritzwasser wirksam werden. Voraussetzung ist ein Druckunterschied sowie völlige Wassersättigung, was in der Praxis jedoch selten vorkommt.

**Kapillarität** bezeichnet die auch entgegen der Schwerkraft wirksame Saugkraft, abhängig von der Grenzflächenspannung zwischen festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen. Sie ist wirksam bei Poren mit einem Porenradius von  $10^{-4}$  bis  $10^{-7}$  m [46, S. 29]. Beim kapillaren Transport von Wasser wird an der Kapillarwand eine diffuse elektrische Doppelschicht aufgebaut. Durch den Strömungstransport wird ein Teil der Ladungen fortgerissen und ein Strömungspotenzial gebildet. Die Potenzialdifferenz zwischen fest haftendem und beweglichem Teil der Doppelschicht wird elektrokinetisches Potenzial oder Zeta-Potenzial genannt.

Bei Einwirkung von drucklosem Wasser steigt der Wassergehalt von kapillaren Baustoffen langsam an, bis der freiwillige Wassergehalt  $u_F$  (auch Wasserkapazität) erreicht ist. Die vollständige Füllung aller wasserzugänglichen

Porenräume erfolgt meist unter Druck und wird als Sättigungsfeuchte  $u_{\max}$  bezeichnet [47].

**Kapillarkondensation:** Gelporen  $< 10^{-7}$  m füllen sich durch Kapillarkondensation mit Wasser, d. h. der Wasserdampf kondensiert bereits unterhalb 100 % rel. Feuchte. Nach Kelvin [48, S. 220] lässt sich berechnen, bei welcher Luftfeuchtigkeit sich in Gelporen mit definiertem Radius Wasser abscheidet.

**Kondensation:** Abscheidung von Wasser an einer kalten Bauteiloberfläche bei Unterschreitung des Taupunktes (Kapitel 1.3.3.3.6)

**Diffusion:** Als Wasserdampfdiffusion wird der gasförmige Transport von Wasser durch einen porösen Körper bezeichnet. Sie ist abhängig von der Diffusionswiderstandszahl  $\mu$ , Temperatur und rel. Luftfeuchte (Kapitel 1.3.3.3.8).

**Hygroskopische Wasseraufnahme:** Eigenschaft von insbesondere leicht löslichen Stoffen, Wasser anzuziehen (Kapitel 2.1.6.3)

In Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit, die einen Baustoff umgibt, stellt sich durch Diffusion eine hygroskopische Gleichgewichtsfeuchte – auch Ausgleichsfeuchte oder Sorptionsfeuchte genannt – als Wassergehalt des Baustoffs ein. Sie wird mit derjenigen Luftfeuchtigkeit indiziert, mit der der Baustoff im Gleichgewicht steht. Die Sorptionsfeuchte  $u_{80}$  eines Baustoffes bei 80 % rel. Luftfeuchte wird als bleibende Wandfeuchtigkeit in bewohnten Räumen bezeichnet, auf die die Wärmeleitfähigkeit des Stoffes zu beziehen ist (nach DIN EN ISO 12571 [49]) [50, S. 15]. Durch Salzbelastung erhöht sich die Sorptionsfeuchte eines Baustoffs [47].

### 1.3.3.3.1 Feuchtigkeitsgehalt

Der Feuchtigkeitsgehalt einer Probe oder die Baufeuchte kann mit unterschiedlichen Messverfahren bestimmt werden, die sich hinsichtlich des Messprinzips, ihres apparativen Aufwands und der Verwendbarkeit der Messergebnisse stark unterscheiden. Die nachfolgende Zusammenstellung gibt einen Überblick über die in der Praxis häufig verwendeten Verfahren, ohne Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben, da Methoden, die noch im Forschungsstadium sind, hier nicht aufgeführt werden.

## 1. Darr-Methode [47]

**Prinzip:** Ermittlung des Feuchtegehaltes durch Bestimmung der Gewichts-differenz zwischen baufeuchter und getrockneter Probe

- Einwaage der feuchten Bohrprobe  $m_w$
- Trocknung der Probe bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz
- Einwaage der trocknen Probe  $m_{tr}$

Berechnung der Baufeuchte aus der Differenz beider Einwaagen nach folgender Gleichung:

$$u = \frac{m_w - m_{tr}}{m_{tr}} \cdot 100 \text{ [Gew.-%]}$$

Dabei sind:

$u$  = Feuchtegehalt [Gew.-%],

$m_w$  = Gewicht der feuchten Probe [g],

$m_{tr}$  = Gewicht der trocknen Probe [g].

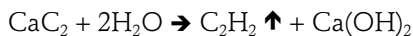
**Untersuchungsziel:** Die Baufeuchte gibt einen Absolutwert für die im Baustoff vorhandene Feuchtigkeit eines Baustoffs an. Jeder einzelne Baustoff besitzt jedoch eine eigene Gesamtporosität, die in eine Bewertung mit eingeht, sodass die Messergebnisse der reinen Feuchtigkeitsbestimmung verschiedener Materialien nicht direkt miteinander vergleichbar sind. Sie stellen nur die Ausgangsbasis für die Bestimmung des Durchfeuchtungsgrades dar (Kapitel 1.3.3.3.3).

**Einschränkung:** Gips und gipshaltige Baustoffe dürfen gemäß WTA-Merkblatt 4-11-02/D [47] nur bis 40 °C getrocknet werden, sonst erfolgt eine Verfälschung der Werte durch Freisetzung chemisch gebundenen Wassers.

**Bewertung:** Zerstörendes und aufwendiges, aber genaues Verfahren, dient zur Kalibrierung für andere Messverfahren.

## 2. Calciumcarbid-Methode (CM-Verfahren) [47]

**Prinzip:** Calciumcarbid reagiert mit Wasser zu Ethin (Acetylen). Der dabei entstehende Druck in einem abgeschlossenen Gefäß ist proportional zur vorhandenen Wassermenge.



**Bewertung:** Für Überprüfungen an der Baustelle als einfaches Verfahren gut geeignet, Fehlerquellen bei der Probeneinwaage, durch Temperatur und Messungenauigkeiten.

## 3. Karsten'sches Prüfröhrchen (Bild 8)

**Prinzip:** Aufkitten eines speziell geformten Glasröhrchens mit Messskala, mit dem das Wasseraufnahmevermögen von Baustoffoberflächen bewertet wird.

**Bewertung:** Am Bauwerk einfach anzuwendendes Verfahren zur Prüfung von Hydrophobierungen und zum Vergleich einzelner Bauwerksteile bzw. verschiedener Materialien miteinander



**Bild 8** ■ Karsten'sches Prüfröhrchen

#### 4. Messung der elektrischen Leitfähigkeit bzw. des Widerstands

**Prinzip:** Bestimmung von Widerstand bzw. Leitfähigkeit zwischen zwei Elektroden an der Baustoffoberfläche bzw. eingeschlagenen Elektroden im Baustoff. Messung des Stromflusses der im feuchten Material gelösten und zu den Elektroden wandernden Ionen.

**Bewertung:** Geeignetes Verfahren zur Ermittlung der Restfeuchte von Holz oder zur Prüfung von Estrich, Gips oder Beton. In Natursteinmauerwerk ist das Verfahren als Trendmessung von Feuchtegehalten zu verwenden [51, S. 57]. Lösliche Materialien verändern die Leitfähigkeit im Stein sehr stark und verfälschen damit die Werte. Hohe Anteile an neu gebildeten Salzen täuschen durch ihre Leitfähigkeitserhöhung hohe Durchfeuchtung vor.

## 5. Mikrowellenmesstechnik (Moist-Verfahren)

**Prinzip:** Bei diesem dielektrischen Verfahren wird der hohe Unterschied der Dielektrizitätskonstante  $\epsilon$  von Wasser und Baustoffen sowie der Energieverlust bei der Anregung von Stoffen durch Mikrowellen hoher Frequenzen ausgenutzt. Mit 2 Messaufsätzen eines transportablen Gerätes können bis 30 cm Tiefe durch Reflexion der elektromagnetischen Welle bereits geringe Wassergehalte gemessen werden.

Bei Frequenzen um 2 bis 3 GHz tritt so gut wie keine Beeinflussung durch Salze auf.

**Bewertung:** Zerstörungsfreies, aber teures Verfahren mit enormer Zeitersparnis bei Datenaufnahme und -auswertung zur indirekten, qualitativen Feuchtemessung. Anwendung möglichst als Rastermessung, um Aussagefähigkeit zu erhöhen. Vernachlässigbare Beeinflussung der Ionenleitfähigkeit von Salzen. Verfälschung des Ergebnisses durch Metalle im Bauteil [52].

## 6. Infrarot-Thermografie

**Prinzip:** Eine Infrarot-Kamera misst die Wärmestrahlung eines Objekts, die in einem Thermogramm dargestellt wird.

**Bewertung:** Zerstörungsfreies Messverfahren mit flächigem Messergebnis. Fachwissen zur Interpretation der Messergebnisse erforderlich. Hohe Investitionskosten.

**Anwendungsbereich:** Lokalisierung von Feuchtequellen und Wärmebrücken [15], [16]

## 7. Luftfeuchte-Ausgleichsverfahren

**Prinzip:** Messung der Ausgleichsfeuchte eines Baustoffs über die rel. Luftfeuchte, die sich in einem geschlossenen Hohlraum – Bohrloch oder dicht angeschlossene Messkammer – mit installiertem Messfühler einstellt.

**Bewertung:** zerstörungsfreies bis -armes Verfahren, um Rückschlüsse auf hygroskopische Eigenschaften zu erhalten

**Einschränkung:** Beeinflussung durch Salze und zu großer Temperaturdifferenz zur umgebenden Luft [47]

## 8. Neutronensonde

**Prinzip:** Aus einer Neutronenquelle ausgesandte schnelle Neutronen werden an Wasserstoffatomen abgebremst. Die Menge dieser Neutronen ist also direkt proportional zu den vorhandenen Wassermolekülen.



**Bewertung:** Zerstörungsfreies, schnelles und exaktes Verfahren bis 30 cm Messtiefe zur relativen Feuchtemessung. Aufwendig durch teure Messgeräte und Umgang mit einer Strahlenquelle. Strahlenschutz erforderlich. Geeignet zur Ermittlung von Bereichen unterschiedlicher Feuchtigkeit, zur Lokalisierung von Feuchtequellen und zur Überprüfung von Wärmedämmungen [15].

## 9. Gamma-Durchstrahlung

**Prinzip:** Über 2 parallele Sonden in 22 mm großen Bohrungen wird über die Feuchteabhängigkeit der Absorption und Streuung von Gammastrahlung die Feuchteverteilung im Bauwerk bestimmt.

**Bewertung:** Zerstörungsarmes Messverfahren der Feuchteänderung bis 25 cm Messtiefe mit hoher Ortsauflösung.

Photonen der Gamma-Strahlung werden neben der Feuchte auch durch Salz abgeschwächt, daher kann durch Kombination von NMR und Gamma-Strahlung die Wasser- und Salzgehaltsverteilung gemessen werden. Strahlenschutz erforderlich [53], [54].

## 10. NMR-Verfahren (kernmagnetische Resonanz)

**Prinzip:** Das NMR-Gerät besteht aus einer elektronischen Steuereinheit und dem Permanentmagneten mit der Messspule. Durch Anlegen einer Resonanzfrequenz wird das Magnetfeld um den Wasserstoffkern verändert und eine Spannung erzeugt, die proportional zur Anzahl der Wasserstoffkerne ist. Durch die NMR-Aufsatztechnik kann die Apparatur einseitig an ein beliebig großes Prüfobjekt herangeführt werden.

**Bewertung:** Direktes Feuchtemessverfahren von Fassaden mit schneller und genauer Bestimmung der Verteilung des Wassergehalts. Auch zur Ermittlung des Eindringverhaltens von Konservierungsmitteln einsetzbar. Zerstörungsfreies aber aufwendiges Messverfahren, ohne schädliche biologische Wirkung [54], [55], [56, S. 97].

## 11. TDR (Time Domain Reflectometry)

**Prinzip:** Dielektrisches Messverfahren zur Bestimmung von Wasser- und/oder Salzgehalten: 2-Stabsonden von 100 mm Länge, 2 mm Durchmesser und mit 16 bis 20 mm Stababstand werden über Bohrungen in das Mauerwerk gesetzt, um aus der Laufzeit einer elektrischen Welle entlang der Stäbe auf die Dielektrizitätskonstante des Baustoffs zu schließen. Die Kalibrierung erfolgt über Kernbohrungen, an denen der Wassergehalt, die Porosität und Dielektrizitätskonstante und ggf. Salzgehalte des Baustoffs bestimmt werden. Die

Reflexionen der elektromagnetischen Welle am Sensor können am Monitor sichtbar gemacht werden.

**Bewertung:** Zerstörungsarme Messmethode, geeignet für Rasteraufnahmen zur flächenhaften Feuchte- bzw. Salzausbreitung. Eingeschränkt durch Hohlräume und Materialien mit hoher Leitfähigkeit [57].

## 12. Kontaktwinkelmessung

**Prinzip:** Der Kontaktwinkel  $\Theta$  zwischen einem Tropfen und der benetzten Baustoffoberfläche wird durch den Winkel zwischen einer Tangente an der Basis des Tropfenrands und der Baustoffoberfläche beschrieben. Er gibt eine Aussage über die Benetzungsfähigkeit des Baustoffs:

- $\Theta \geq 90^\circ$  nicht benetzend,
- $0 < \Theta < 90^\circ$  benetzend.

**Durchführung:** videotechnische Erfassung der Tropfenkontur mittels eines Tropfenkonturanalysesystems, Auswertung mithilfe mathematischer Modelle (z. B. Tangenten-Verfahren, Young-Laplace-Verfahren).

**Bewertung:** Schnelles Messverfahren. Fehlerquelle durch Oberflächenrauigkeit. Auch anwendbar zur Überprüfung von Konservierungsmaßnahmen [58].

### 1.3.3.3.2 Maximale Wasseraufnahme

Die maximale Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck wird nach DIN EN 13755 [42] bestimmt. Unter Druckbeanspruchung (in Anlehnung an DIN 52008 [37] bei 15 MPa) oder unter Vakuum können alle zugänglichen Poren mit Wasser gefüllt und die Sättigungsfeuchte  $u_{\max}$  eines Baustoffs bestimmt werden. Die Sättigungsfeuchte dient als Bezugsgröße für die Bestimmung des Durchfeuchtungsgrades [47], [59, S. 20].

## Verfahren

1. Bestimmung der Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck  $A_b$  nach DIN EN 13755 [42]:

- Nach dem Trocknen bei  $70^\circ\text{C}$  bis zur Massenkonstanz wird der Probekörper gewägt  $m_d$ .
- Lagerung des Probekörpers in einem Behälter, der in bestimmten Zeitabständen mit Wasser gefüllt wird, bis nach 2 h eine Überdeckung von 25 mm vorliegt.
- Nach 24 h Entnahme der Probekörper, Abwischen und Wägung, nachfolgend wieder Tauchen unter Wasser. Fortführen der Zyklen, bis Massenkonstanz und Sättigung der Probekörper  $m_s$  erreicht ist.

- Auswertung nach:

$$A_b = m_s - m_d / m_d \cdot 100 [\%]$$

Dieser Wasseraufnahmewert wird zur Charakterisierung der kapillaren Wasseraufnahme eines Baustoffs im Verhältnis zu seiner Trockenmasse herangezogen.

- Bestimmung der Wasseraufnahme unter Druck von 15 MPa ( $W_d$ ) in Anlehnung an DIN 52008 [37]:

- Entlüftung der im Glasgefäß wassergelagerten Probe im Vakuum von ca.  $3 \cdot 10^{-3}$  MPa, bis keine Luftblasen mehr aufsteigen,
- Lagerung 2 h in Wasser unter Atmosphärendruck,
- Lagerung anschließend 24 h lang in Wasser unter 15 MPa Überdruck, Beibehaltung des Drucks für 24 h,
- Entnahme der Probekörper aus dem Wasser, Abtupfen mit feuchtem Tuch und Wägung ( $m_{w,d}$ ),
- Auswertung nach

$$W_d = m_{w,d} - m_{tr} [g]$$

Dabei ist:

$m_{tr}$  = Masse des bei 70 °C getrockneten und auf 20 °C abgekühlten Probekörpers.

## Untersuchungsziel

Die max. Wasseraufnahme dient zum Vergleich der Saugfähigkeit verschiedener Baustoffe und zur Berechnung des Durchfeuchtungsgrades, wobei man davon ausgeht, dass die hier gemessene max. Wasseraufnahme den Bauwerksbedingungen weitestgehend entspricht. Bei Durchführung unter Druck kennzeichnet sie das Verhalten eines Baustoffs bei drückendem Wasser.

Sie gibt zudem Hinweise auf die Verwitterungsbeständigkeit eines Baustoffs nach DIN 52008 [37]. Danach gilt eine Wasseraufnahme  $< 0,5 \%$  als Richtzahl für die Verwendbarkeit eines Gesteins. Bei höheren Werten geben Frost-Tau-Wechsel-Versuche, der Sättigungswert  $S$ , das heißt das Verhältnis der Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck und unter Druck, sowie physikalische Versuche (Kapitel 1.3.3.2.10) weitere Angaben zur Verwitterungsbeständigkeit. Diese Werte können als Hinweise zur Einstufung eines Gesteins dienen.

### 1.3.3.3.3 Durchfeuchtungsgrad

Der Durchfeuchtungsgrad DFG beurteilt den wassergefüllten Porenraum eines Baustoffs und gibt den Feuchtegehalt im Verhältnis zur jeweiligen max.

Wasseraufnahmefähigkeit bzw. Sättigungsfeuchte  $u_{\max}$  an. Diese stellt einen Näherungswert zum effektiven Porenraum dar, der unter Bauwerksverhältnissen den maximal mit Wasser füllbaren Porenraum ausreichend kennzeichnet. Mithilfe dieses Wertes ist das Feuchteverhalten verschiedener Gesteinsvarietäten miteinander vergleichbar.

$$\text{Durchfeuchtungsgrad [\%]} = \frac{\text{Baufeuchte [M.\-%]}}{\text{max. Wasseraufnahmegrad [M.\-%]}} \cdot 100$$

### Ermittlung der Durchfeuchtungsgrade aus Messwerten

Nach der Ermittlung der Baufeuchte werden die Baustoffproben bei einer rel. Luftfeuchte von 80 % gelagert, um die vor allem durch Salze hervorgerufene hygroskopische Wasseraufnahme zu bestimmen [60, S. 37].

Hygroskopischer Durchfeuchtungsgrad in [%]  $\text{DFG}_{\text{hyg}} = u_{80} / u_{\max} \cdot 100$

Gesamt-Durchfeuchtungsgrad in [%]  $\text{DFG}_{\text{ges}} = u_m / u_{\max} \cdot 100$

Dabei sind:

$u_{80}$  = hygroskopische Wasseraufnahme in [M.\-%],

$u_{\max}$  = maximale Wasseraufnahme [M.\-%],

$u_m$  = Baufeuchte [M.\-%].

#### 1.3.3.3.4 Kapillare Wasseraufnahme

##### Untersuchungsziel

Die kapillare Wasseraufnahme nach DIN EN 1925 [61] dient zur Beurteilung vertikaler Bauteile bei Feuchtekontakt mit horizontalen, wasserführenden Flächen [24]. Sie wird außerdem angewendet zur Einstufung der Wirksamkeit von Hydrophobierungen. DIN EN 1925 [61] ist nicht geeignet für Naturstein mit einer offenen Porosität < 1 % nach DIN EN 1936 [45]. Die zeitabhängige Wasseraufnahme bezogen auf die Saugfläche wird durch den Wasseraufnahmekoeffizienten  $C$  angegeben ( $C_1$  = senkrecht,  $C_2$  = parallel zur natürlichen Anisotropie des Gesteins).

$$C = \frac{m_i - m_d}{A \cdot t_i^{0,5}}$$

Dabei sind:

$C$  = Wasseraufnahmekoeffizient durch Kapillarität senkrecht bzw. parallel zur natürlichen Anisotropie des Gesteins [ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0,5}$ ],

$m_d$  = Masse des getrockneten Probekörpers [g],

$m_i$  = nacheinander bestimmte Massen des Probekörpers nach dem Eintauchen während der Prüfung [g],

$A$  = Fläche der in Wasser getauchten Seite des Probekörpers [ $\text{m}^2$ ],  
 $t_i$  = Zeiten vom Beginn der Prüfung bis zu den Zeitpunkten, bei denen die Massen  $m_i$  gemessen werden [s].

## Verfahren

- Trocknen der Probekörper bei  $70^\circ\text{C}$  bis zur Massenkonzanz
- Lagerung im Exsikkator bis Raumtemperatur, Wägung  $m_d$  [g]
- Ermittlung der einzutauchenden Grundfläche  $A$  [ $\text{m}^2$ ]
- Eintauchen der Proben bis 3 mm Tiefe in Wasser
- Wägung in festgelegten Zeitabständen abhängig von der Saugkraft des Materials bis zur Massenkonzanz  $m_d$  [g]
- Wägung nach 24 h kennzeichnet den  $w_{24}$ -Wert

Für die Ermittlung der Wasseraufnahme gibt es verschiedene Normen, die sich in den Eintauchintervallen und ihrer Einheit unterscheiden [62]. In DIN EN ISO 15148 [63] werden die Proben in ein Wasserbad ca. 5 mm tief eingetaucht und nach 5 min., 20 min. sowie 1, 2, 4, 8 und 24 h gewogen.

In DIN EN 772-11 [64] wird Naturstein in regelmäßigen Zeitintervallen bis 24 oder 72 h gewogen. Der Wasseraufnahmekoeffizient kann aus der Steigung der Geraden ermittelt werden, die sich aus der flächenbezogenen Wasseraufnahme und der entsprechenden Wurzel der Zeit ergibt.

Die Einheit nach DIN EN ISO 15148 [63] wird in  $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ , nach DIN EN 772-11 [64] und DIN EN 1925 [61] in  $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$  angegeben.

Baustoffe werden nach ihrem Wasseraufnahmekoeffizienten eingeteilt in [65]:

$w \geq 2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-0,5}$	wassersaugend,
$0,5 < w < 2,0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-0,5}$	wasserhemmend,
$w \leq 0,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-0,5}$	wasserabweisend.

$$w = \frac{\Delta W}{\Delta \sqrt{t}}$$

Dabei sind:

$w$  = Wasseraufnahmekoeffizient,  
 $\Delta W$  = Gewichtszunahme pro Saugfläche,  
 $\Delta \sqrt{t}$  = Wurzel der Zeitintervalle.

1.3.3.3.5 Hygroskopische Wasseraufnahme

Untersuchungsziel

Da hygroskopische Stoffe den Feuchtehaushalt wesentlich beeinflussen (Kapitel 2.1.6), muss zur Beurteilung von Trockenlegungsmaßnahmen bei Vorhandensein von hygroskopischen Salzen die in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit erfolgende hygroskopische Wasseraufnahme bestimmt werden, auch als Ausgleichsfeuchte oder Gleichgewichtsfeuchte bezeichnet [47], (Tabelle 2). Diese wird in einer Sorptionsisotherme dargestellt. Der Durchfeuchtungsgrad (Kapitel 1.3.3.3.3) kann damit um den hygroskopischen Anteil bereinigt werden und beschreibt lediglich die sich durch aufsteigende oder seitlich eindringende Feuchtigkeit ergebenden Verhältnisse.

**Tabelle 2** ■ Hygroskopische Ausgleichsfeuchten unterschiedlicher Baustoffe nach WTA-Merkblatt 4-11-02/D [47]

Baustoff	hygroskopische Ausgleichsfeuchten in M-% (entsprechende rel. Luftfeuchte)	
historische Vollziegel	< 2 bis 3 (75 % rel. Feuchte)	
Kalkzementputz	< 1,5 (75 % rel. Feuchte)	
Kalksandstein	1,3 (80 % rel. Feuchte)	
rheinischer Tuff	< 2 (75 % rel. Feuchte)	< 4 (95 % rel. Feuchte)
quarzitischer Sandstein		< 0,2 (95 % rel. Feuchte)
karbonatischer Sandstein	< 0,8 (75 % rel. Feuchte)	< 1,3 (95 % rel. Feuchte)
Granit	< 0,1 (75 % rel. Feuchte)	< 0,2 (95 % rel. Feuchte)

Verfahren

- 1. Bestimmung der Sorptionsisotherme
  - ▢ Lagerung der Probe im Klimaschrank unter definierter Temperatur und Luftfeuchtigkeit bis zur Einstellung der Ausgleichsfeuchtigkeit
  - ▢ Wägung der Probe
  - ▢ wechselweise Steigerung der Luftfeuchtigkeit bis 100 % rel. Luftfeuchte
  - ▢ Wiederholung des Versuchs mit rückläufigen Luftfeuchtigkeiten
  - ▢ grafische Darstellung in einer Hystereseschleife
- 2. Zur Bestimmung der hygroskopischen Wasseraufnahme ist auch eine einmalige Wägung unter Bauwerksbedingungen, beispielsweise bei 85 % rel. Luftfeuchte und 20 °C [59], ausreichend.

Bei den Messverfahren wird sowohl die hygroskopische Wasseraufnahme als auch die Wasseraufnahme durch Kapillarkondensation mitberücksichtigt.

1.3.3.3.6 Kondenswasser

Durch Kondensation kann es sowohl auf der Oberfläche als auch innerhalb von Bauteilen zu Kondens- oder Tauwasserbildung kommen (Kapitel 2.1.6.1), (Tabelle 3).

**Tabelle 3** ■ Für den Kondenswasser- und Wärmeschutz relevante Kennwerte nach DIN EN ISO 6946 [66], DIN EN ISO 7345 [67], DIN EN ISO 9346 [68]

Formel, Zeichen	Einheit	Definition
$r, F = (\text{Feuchtegehalt der Luft/Sättigungsfeuchte}) \cdot 100 [\%] \text{ oder } \text{Wasserdampfdruck/Sättigungsdampfdruck} \cdot 100 [\%]$	%	relative Luftfeuchtigkeit
$\lambda$	$W/(m \cdot K)$	Wärmeleitfähigkeit
$\mu$		Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
$s_d = \mu \cdot d$	m	äquivalente Luftschichtdicke
$R = d/\lambda$	$(m^2 \cdot K)/W$	Wärmedurchlasswiderstand
$d$	m	Bauteilschichtdicke
$R_t = R_{si} + R + R_{se}$	$(m^2 \cdot K)/W$	Wärmedurchgangswiderstand
$R_{si} = 0,13 \text{ für Außenwände}$	$(m^2 \cdot K)/W$	Wärmeübergangswiderstand der Innenluft
$R_{se} = 0,04 \text{ für Außenwände}$	$(m^2 \cdot K)/W$	Wärmeübergangswiderstand der Außenluft
$R_{se} = 0,08 \text{ für Außenwände}$	$(m^2 \cdot K)/W$	Wärmeübergangswiderstand der Außenluft an hinterlüfteten Fassaden
$q = U (\theta_{ai} - \theta_{ae})$	$W/m^2$	Wärmestromdichte
$U$	$W/(m^2 \cdot K)$	Wärmedurchgangskoeffizient
$\theta_{ai}$	°C	Temperatur der Innenluft
$\theta_{ae}$	°C	Temperatur der Außenluft
Fortsetzung auf S. 67 ➔		

Tabelle 3 ■ Fortsetzung

Formel, Zeichen	Einheit	Definition
$\theta_{si} = \theta_{ai} - R_{si} \cdot q$	°C	innere Oberflächentemperatur oder Oberflächentemperatur der Innenseite des Bauteils
$\theta_{se} = \theta_{ae} - R_{se} \cdot q$	°C	Temperatur der Außenoberfläche eines Bauteils
$m_{w,T} = t_T (i_i - i_e)$	kg/m <sup>2</sup>	flächenbezogene Tauwassermasse
$t_T = 1440 \text{ h}$	h	Dauer der Tauperiode
$g_i = (p_i - p_{sw}) / (1/W_i)$	kg/(m <sup>2</sup> · h)	Diffusionsstromdichte vom Raum in das Bauteil bis zur Tauwasserebene
$g_e = (p_{sw} - p_e) / (1/W_e)$	kg/(m <sup>2</sup> · h)	Diffusionsstromdichte von der Tauwasserebene zum Freien
$p_i$	Pa	Wasserdampfteildruck der Innenluft
$p_e$	Pa	Wasserdampfteildruck der Außenluft
$p_{sw}$	Pa	Wasserdampfteildruck der Tauwasserebene
$1/W_i = Z$	(m <sup>2</sup> · h · Pa)/kg	Wasserdampf-Diffusionsdurchlasswiderstand zwischen der raumseitigen Bauteiloberfläche und der Tauwasserebene
$1/W_e = Z$	(m <sup>2</sup> · h · Pa)/kg	Wasserdampf-Diffusionsdurchlasswiderstand zwischen der Tauwasserebene und der außenseitigen Bauteiloberfläche
$m_{w,V} = t_V (g_i + g_e)$	kg/m <sup>2</sup>	Verdunstungsmenge
$t_V = 2.160 \text{ h}$	h	Dauer der Verdunstungsperiode
$g_i = (p_{sw} - p_i) / (1/W_i)$	kg/(m <sup>2</sup> · h)	Diffusionsstromdichte von der Tauwasserebene zum Raum
$g_e = (p_{sw} - p_e) / (1/W_e)$	kg/(m <sup>2</sup> · h)	Diffusionsstromdichte von der Tauwasserebene zum Freien

## Entstehung von Tauwasser

Luft hat je nach Temperatur unterschiedliche Wasserdampf-sättigungsdrücke und nimmt bei 100 %iger Sättigung unterschiedliche Wassermengen auf.

25 °C → 23,07 g/m<sup>3</sup> Sättigungsdampfmenge

10 °C → 9,41 g/m<sup>3</sup> Sättigungsdampfmenge

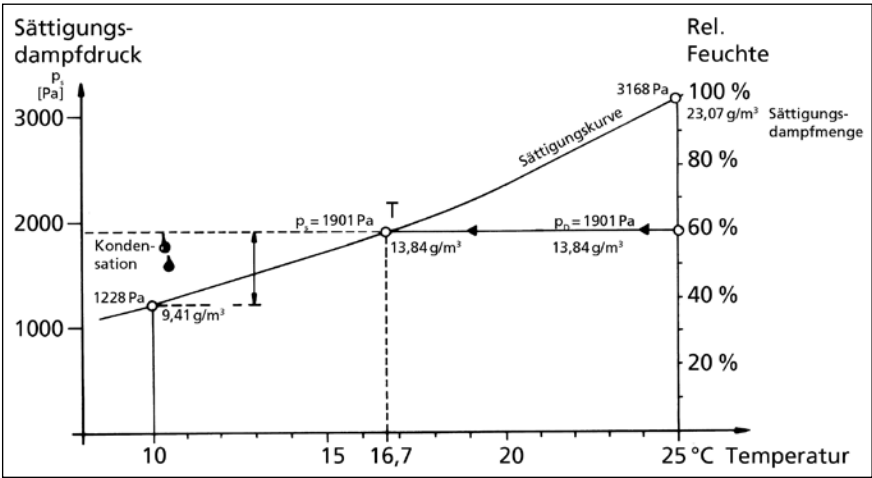


An der Bauteiloberfläche kommt es zu Tauwasserausfall, wenn durch Erhöhung der Luftfeuchte oder Erniedrigung der Temperatur die Sättigungskurve der Bauteiloberfläche erreicht wird (Bild 9).

Berechnung

Die Gefahr der Tauwasserbildung und die dabei entstehende Tauwassermenge können nach DIN 4108 WÄRMESCHUTZ UND ENERGIEEINSPARUNG IN GEBÄUDEN – TEIL 3: KLIMABEDINGTER FEUCHTESCHUTZ [69] ermittelt werden. Zusätzlich wird in dieser Norm der Schlagregenschutz von Wänden betrachtet. In DIN 4108-2 [70] werden Mindestanforderungen an den Wärmeschutz festgelegt, mit denen ein hygienisches Raumklima sichergestellt und Tauwasser- und Schimmelpilzfreiheit gewährleistet ist. Durch die Kombination von Schimmelpilzvermeidung zusätzlich zur Tauwasserfreiheit wird eine kritische Oberflächenfeuchte von 80 % angesetzt und ein Minstdurchlasswiderstand der Außenwände von  $1,20 \text{ (m}^2 \cdot \text{K) / W}$  [71].

Wärme- und feuchteschutztechnische Berechnungen werden in einer DIN behandelt, da die jeweiligen Parameter in Zusammenhang stehen. Hierbei wird ein Normklima mit ungünstigen Bedingungen zugrunde gelegt. Unterschieden wird die Tauperiode von der Verdunstungsperiode (Tabellen 4 und 5). Letztere ist allerdings nur für die Berechnung der Verdunstungsmasse relevant. Die



**Bild 9** ■ Raumluft von 25°C, 60% rel. Luftfeuchte wird auf 10°C abgekühlt; bei 16,7°C ist der Wasserdampfdruck = Sättigungsdampfdruck, d. h., die Taupunkttemperatur ist erreicht [48, S. 262]  
ausgeschiedene Wassermasse zwischen Taupunkt und Abkühlungstemperatur:  
 $13,84 \text{ g/m}^3 - 9,41 \text{ g/m}^3 = 4,43 \text{ g/m}^3$

**Tabelle 4** ■ Vorgegebene Kenngrößen nach DIN 4108- 3 [69] für die Tauperiode

feuchtetechnische Parameter	Raumklima	Außenklima
Lufttemperatur	20 °C	−10 °C
rel. Luftfeuchte	50 %	80 %
Wasserdampf sättigungsdruck	2.340 N/m <sup>2</sup>	260 N/m <sup>2</sup>
Wasserdampf teildruck	1.170 N/m <sup>2</sup>	208 N/m <sup>2</sup>

**Tabelle 5** ■ Vorgegebene Kenngrößen nach DIN 4108-3 [69] für die Verdunstungsperiode

feuchtetechnische Parameter	Raumklima	Außenklima
Lufttemperatur	12 °C	12 °C
rel. Luftfeuchte	70 %	70 %
Wasserdampf sättigungsdruck	1.403 N/m <sup>2</sup>	1.403 N/m <sup>2</sup>
Wasserdampf teildruck	982 N/m <sup>2</sup>	982 N/m <sup>2</sup>

verdunstende Wassermasse der Verdunstungsperiode soll nach DIN 4108-3 [69] größer als die Tauwassermasse der Tauperiode sein. Gemäß dieser DIN ist der »*Tauwasserausfall während der Verdunstungsperiode rechnerisch nicht zu berücksichtigen.*« Ein in der Verdunstungsperiode möglicherweise auftretender Tauwasserausfall wird in DIN EN ISO 13788 [72] behandelt.

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu$  ist dimensionslos und kennzeichnet den Widerstand eines Baustoffs gegenüber der Diffusion von Wasserdampf im Vergleich zu einer gleich dicken, ruhenden Luftschicht.

Beispielhafte  $\mu$ -Werte für Baustoffe sind

- Putzmörtel (Kalk, Kalkzement, hydraulischer Kalk):  $\mu = 15$  bis  $35$ ,
- Polyurethan(PUR)-Hartschaum:  $\mu = 30$  bis  $100$ .

Die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke  $s_d$  [m] gibt an, wie dick eine ruhende Luftschicht wäre, wenn sie den gleichen Diffusionswiderstand hätte wie ein Bauteil der Dicke  $d$ .

$$s_d = \mu d \text{ [m]}$$

Benötigt wird die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl zur Berechnung des Dampfdiffusionsstroms durch Bauteile. Die Dampfdiffusion ist abhängig von den Diffusionswiderständen der einzelnen Schichten.

Mithilfe der oben ermittelten Kennwerte kann nach DIN 4108-3 [69], Anhang A der Verlauf der Diffusion eines mehrschichtigen Bauteils berechnet und nach dem Diagramm von Glaser grafisch dargestellt werden.

Dabei werden auf der Abszisse die diffusionsäquivalenten Luftschichtdicken der einzelnen Bauteilschichten, auf der Ordinate die zugehörigen Wasserdampfdrücke dargestellt. Der Temperaturverlauf eines mehrschichtigen Bauteils berechnet sich nach (Bild 10):

$$\begin{aligned}\theta_{si} &= \theta_{ai} - R_{si} \cdot q, \\ \theta_1 &= \theta_{si} - R_1 \cdot q, \\ \theta_2 &= \theta_1 - R_2 \cdot q, \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ \theta_n &= \theta_{n-1} - R_n \cdot q, \\ \theta_{se} &= \theta_{ae} - R_{se} \cdot q.\end{aligned}$$

**Ermittlung des Diffusionsverlaufs während der Tauperiode:**

In dem Glaser-Diagramm werden die in Abhängigkeit von der Temperatur ermittelten Wasserdampfsättigungsdrücke, die der DIN 4108-3 [69], entnommen werden können, eingezeichnet (Bild 11). Der Teildruck ergibt sich aus der geradlinigen Verbindung zwischen innerem und äußerem Wasserdampfdruck ( $p_i$  und  $p_a$ ). An den Stellen, an denen sich die beiden Kurven berühren, sind die Tangenten  $p_{sw}$  der Wasserdampfdrücke an den Sättigungsdampfdruck zu zeichnen, da der Teildruck immer niedriger als der Sättigungsdampfdruck ist.

**Verdunstungsperiode:**

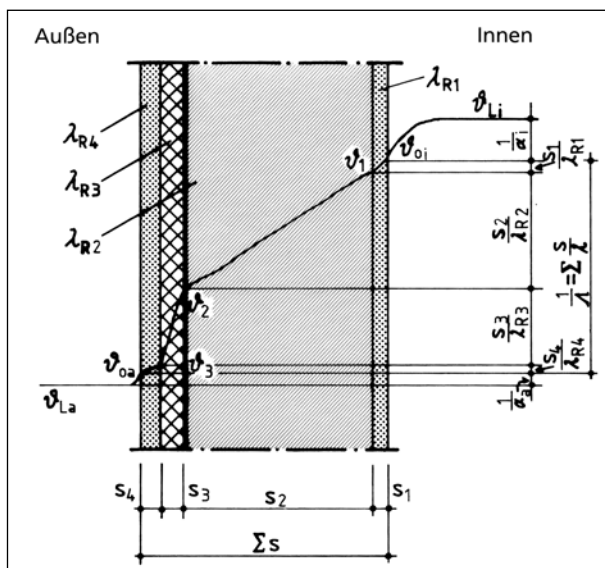
Für die Verdunstungsperiode wird nach o. a. Bedingungen ein konstanter Sättigungsdampfdruck über den gesamten Bauteilquerschnitt angenommen. Für diejenigen Bauteilebenen, in denen Tauwasser während der Tauwasserperiode angefallen ist, lässt sich die verdunstende Wassermasse  $m_{w,V}$  berechnen.

**Ziel der Berechnung**

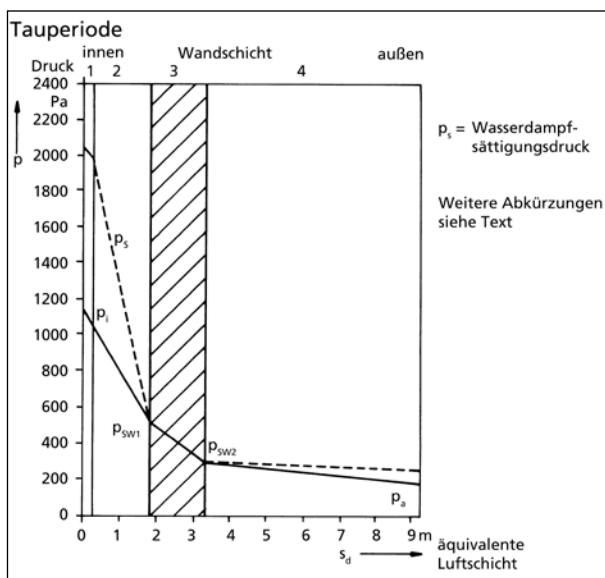
- Ermittlung, ob und an welchen Stellen des Bauteils Tauwasserausfall stattfinden kann
- flächenbezogene Tauwassermasse  $m_{w,T}$
- Verdunstungsmasse  $m_{w,V}$

zulässige Tauwassermasse nach DIN 4108-3 [69] für Dach- und Wandkonstruktionen:  $m_{w,T} = 0,5 \text{ kg/m}^2$

$$m_{w,T} \leq m_{w,V}$$



**Bild 11** ■ Grafische Darstellung (Glaser-Diagramm) zur Ermittlung von Tauwasserausfall [48, S. 347]; in dem Beispiel findet der Tauwasserausfall in der Wandschicht 3 statt.



Bei dem Glaser-Verfahren werden nur stationäre Verhältnisse berücksichtigt, nicht jedoch instationäre Bedingungen wie kapillarer Feuchtetransport oder Wasserdampfdiffusionsströme durch Fugen oder Fehlstellen. Daher werden

vermehrt Simulationsprogramme verwendet, die auch instationäre Verhältnisse abbilden können.

### Gefährdung durch Schimmelpilz

Als Voraussetzung zur Schimmelpilzbildung gilt nach DIN 4108-2 [70] eine kritische Luftfeuchte von 80 %. Diese kann sich durch Wärmebrücken (z. B. an Außenwänden vorgestellte Möbel) mit Erhöhung der Wärmeübergangswiderstände einstellen. Zur Beurteilung der Schimmelpilzbildung wird ein Temperaturfaktor  $f_{Rsi}$  zugrunde gelegt.

$$f_{Rsi} = \theta_{si} - \theta_e / \theta_i - \theta_e$$

Dabei sind:

$\theta_{si}$  = raumseitige Oberflächentemperatur,

$\theta_i$  = Innenlufttemperatur,

$\theta_e$  = Außenlufttemperatur.

Dieser Temperaturfaktor sollte nach DIN 4108-2 [70] min. 0,7 betragen. Bei Unterschreitung des Wertes sowie einer Wasseraktivität  $a_w$  bzw. rel. Luftfeuchtigkeit an der Bauteiloberfläche > 70 % besteht das Risiko der Schimmelpilzbildung.

Zur Vermeidung einer Gesundheitsgefährdung durch Schimmelpilz werden neben einer gleichmäßigen Raumtemperatur Stoßlüftungen empfohlen. Gefährdete Gebäudebereiche können nach [73] anhand von Prognosemodellen in Abhängigkeit von hygrothermischen Randbedingungen ermittelt werden.

#### 1.3.3.3.7 Wärmeschutzberechnung

Grundlage für Wärmeschutzberechnungen liefert die DIN 4108-2 [70]. Sie dient der Gewährleistung eines hygienischen Raumklimas, wobei ausreichendes Heizen und Lüften vorausgesetzt wird. Geltungsbereich dieser DIN sind Hochbauten mit einer Innentemperatur  $\geq 19^\circ\text{C}$ .

Für den Mindestwärmeschutz nach DIN 4108-2 [70] sind folgende Größen festgelegt:

- Wärmedurchlasswiderstand R von Außenwänden =  $1,20 \text{ (m}^2 \cdot \text{K) / W}$ ,
- erhöhter Wärmeschutz im Bereich von Wärmebrücken (zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung),
- Gesamtenergiedurchlassgrad von Fenster-Verglasungen,
- Größe und Orientierung der Fenster unter Berücksichtigung von Sonnenschutzvorrichtungen,
- Luftdichtheit von Bauteilen und Anschlüssen,
- Lüftung.

Kenngrößen und Rechenwerte sind in DIN 4108 angegeben (Kapitel 1.3.3.3.6, Tabelle 3).

Der Wärmedurchlasswiderstand  $R$  ist ein Maß für die Wärmedämmung. Er wird berechnet nach DIN EN ISO 6946 [66]. Nach der Formel  $R = d/\lambda$  wird er von der Schichtdicke  $d$  des Baustoffs sowie vom Rechenwert der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  bestimmt.

Für die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten  $U = 1/(R_{si} + d_1/\lambda_1 + \dots + d_n/\lambda_n + R_{se})$  [W/(m<sup>2</sup> · K)] gelten nach DIN 4108-3 [69] vereinfachend für Außenwände folgende Zahlenwerte:

$$\begin{aligned} R_{si} &= \text{Wärmeübergangswiderstand zur Außenluft} &&= 0,04 \text{ [(m}^2 \cdot \text{K)/W]} \\ &= \text{Wärmeübergangswiderstand zur Außenluft, wenn} \\ &\quad \text{Außenoberfläche an belüftete Luftschichten grenzt,} \\ &\quad \text{z. B. hinterlüftete Fassaden} &&= 0,08 \text{ [(m}^2 \cdot \text{K)/W]} \\ R_{se} &= \text{Wärmeübergangswiderstand zur Innenluft} &&= 0,13 \text{ [(m}^2 \cdot \text{K)/W]} \end{aligned}$$

Zusätzlich zum früher gültigen  $k$ -Wert sind beim  $U$ -Wert Wärmetransportvorgänge zu berücksichtigen, die durch Querleitung (z. B. durch Maueranker, Befestigungselemente) entstehen. Berechnung nach DIN EN ISO 6946 [66].

Zur Begrenzung der Tauwasserbildung (Kapitel 1.3.3.3.6) werden in DIN 4108-2 [70], Tabelle 3, Mindestwerte der Wärmedurchlasswiderstände  $R$  angegeben. Diese Werte müssen an jeder Stelle des Bauteils, also auch an Nischen, Rohrkanälen etc. erfüllt sein. Für Außenwände gilt

$$R \geq 1,20 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

Bei Nichterfüllung dieser Grenzwerte müssen Wärmedämmmaßnahmen vorgenommen werden (Kapitel 1.4.18).

## Energieeinsparverordnung EnEV 2009 [74]

Zusätzlich zur DIN-Norm 4108 gilt die jeweilige Energieeinsparverordnung (EnEV), die sich auf energiesparende Maßnahmen beim Heizen bzw. Kühlen eines Gebäudes bezieht. Ziel der Energieeinsparverordnung ist die Verringerung des Heiz- bzw. Kühlenergiebedarfs und damit eine Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes.

### Gültigkeitsbereiche

Die Energieeinsparverordnung ist gültig für neu zu errichtende Gebäude und für Änderungen bzw. Erneuerungen an bestehendem Außenmauerwerk. Hierfür gelten in folgenden Fällen Grenzwerte des max. Wärmedurchgangskoeffizienten (nach ENEV 2009, Anlage 3) (Tabelle 6):

**Tabelle 6 ■** Begrenzung des Wärmedurchgangs bei bestehenden Gebäuden, gültig für erstmaligen Einbau, Ersatz oder Erneuerung von Außenbauteilen nach ENEC 2009 [74], Anlage 3

Bauteil	max. U-Wert [W/(m² · K)] Innentemperaturen > 19 °C	max. U-Wert [W/(m² · K)] Innentemperaturen 12 bis < 19 °C
Außenwand	0,24	0,35
Decken und Wände gegen unbeheizte Räume oder Erdreich	0,3	
Außenfenster, Fenstertüren	1,3	1,9
Decken, Dächer, Dachschrägen	0,24	0,35
Decke, Wand gegen Erdreich	0,3	

Werden bei beheizten Räumen mit Innentemperaturen  $\geq 19\text{ °C}$  Außenwände

- ersetzt, erstmalig eingebaut oder
- erneuert durch Anbringen von Bekleidungen, Verschalungen oder Mauerwerks-Vorsatzschalen oder
- wird bei einer bestehenden Wand mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten größer  $0,9\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  der Außenputz erneuert oder
- werden Dämmschichten eingebaut

sind die jeweiligen Höchstwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten nach Tabelle 1, Zeile 1 einzuhalten.

Danach gilt für Außenwände ein Höchstwert von  $U = 0,24\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , für Vorhangfassaden von  $U = 1,40\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  und für Außenfenster von  $U = 1,30\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

Bei Einbau von innenraumseitigen Dämmschichten soll der Wärmedurchgangskoeffizient des entstehenden Wandaufbaus  $0,35\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  nicht überschreiten.

Für Nichtwohngebäude mit Innentemperaturen von 12 bis  $< 19\text{ °C}$  gelten höhere Werte.

Auch bei folgenden Änderungen gelten Grenzwerte des Wärmedurchgangskoeffizienten:

- Erweiterung und Ausbau (hinzukommende Nutzfläche  $> 15\text{ m}^2$ ),
- wesentliche Änderung (Fläche  $> 10\%$ ).

Änderungen sind so auszuführen, dass das geänderte Wohngebäude bzw. Nichtwohngebäude insgesamt den Jahres-Primärenergiebedarf des jeweiligen

Referenzgebäudes sowie den Höchstwert des Transmissionswärmeverlustes der Umfassungsfläche (Außenhülle) um nicht mehr als 40 % überschreitet.

Der Nachweis für eine bauliche Maßnahme gemäß EnEV 2009 kann erfolgen als

- Bauteil-Nachweis für den Wärmeschutz der geänderten Außenbauteile des Bestandsgebäudes oder
- Gebäude-Nachweis für die Energieeffizienz des gesamten, sanierten Bestandsgebäudes, wobei zwischen der Nutzung als Wohngebäude oder Nicht-Wohngebäude unterschieden wird.

### 1.3.3.3.8 Wasserdampfdiffusion

Die Versuchsdurchführung nach DIN EN ISO 12572 [75] basiert darauf, dass auf beiden Seiten einer Probe unterschiedliche Wasserdampfpartialdrucke herrschen, wodurch sich ein Diffusionsstrom durch den Probenkörper hindurch einstellt.

#### Untersuchungsziel

Als Kennwert dient die Diffusionswiderstandszahl  $\mu$ . Sie gibt an, um wie viel der Widerstand gegen Wasserdampfdiffusion in einer Schicht größer ist als in einer gleich dicken Luftschicht.  $\mu$  ist eine stoffspezifische, dimensionslose Größe.

Der Diffusionswiderstand ist abhängig von der Schichtdicke  $d$ . Bei der Berechnung der Diffusion in mehrschichtigen Bauteilen wird daher das Produkt

$$\mu d = s_d \text{ diffusionsäquivalente Luftschichtdicke [m]}$$

herangezogen. Diese gibt an, wie dick eine ruhende Luftschicht sein müsste, die den gleichen Diffusionswiderstand hat wie das untersuchte Baumaterial. Um eine ungehinderte Dampfdiffusion in Außenwänden zu gewährleisten, soll der  $s_d$ -Wert dabei nach außen abnehmen.

Die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke ist nach DIN 4108-3 [69] auch für die Wasserdampf-Diffusionseigenschaften von Dämmstoffen maßgebend.

$s_d \leq 0,5 \text{ m}$	diffusionsoffen
$0,5 \text{ m} < s_d < 1.500 \text{ m}$	diffusionshemmend
$s_d \geq 1.500 \text{ m}$	diffusionsdicht

Der  $s_d$ -Wert ist zudem für die Berechnung von Kondenswasserausfall relevant (Kapitel 1.3.3.3.6).



## Verfahren

Ein Gefäß wird durch den dampfdichten Einbau einer Probe abgeschlossen. Die Prüffläche muss mindestens  $50\text{ cm}^2$  betragen, die Probendicke muss repräsentativ unter Berücksichtigung von Inhomogenitäten gewählt werden. Innerhalb des Gefäßes befindet sich je nach gewähltem Verfahren ein bestimmtes Sorbens (Trockenmittel/gesättigte Salzlösung), über dem sich eine spezifische relative Luftfeuchte mit entsprechendem Dampfteildruck einstellt. Das Prüfgefäß wird in einem Klimaraum mit definiertem, vom Sorbens des Gefäßes unterschiedlichem Dampfteildruck gelagert.

- Prüfbedingung A:
  - rel. Luftfeuchte im Gefäß 0 %
  - rel. Luftfeuchte im Klimaraum 50 %
- Prüfbedingung B:
  - rel. Luftfeuchte im Gefäß 0 %
  - rel. Luftfeuchte im Klimaraum 85 %
- Prüfbedingung C:
  - rel. Luftfeuchte im Gefäß 93 %
  - rel. Luftfeuchte im Klimaraum 50 %
- Prüfbedingung D:
  - rel. Luftfeuchte im Gefäß 0 %
  - rel. Luftfeuchte im Klimaraum 93 %

Wägung des Prüfgefäßes mit Probekörper, bis die Abweichung vom Messwert von 5 Messungen  $< 5\%$  des arithmetischen Mittelwerts ist.

Im Feuchtebereichverfahren werden i. Allg. niedrigere Diffusionswiderstandszahlen erreicht als im Trockenbereich, da mit zunehmender Feuchte mehr Wasser adsorbiert wird. Um die Diffusionswerte bei hygroskopischen Stoffen nicht zu verfälschen, sollte hierbei nur im Trockenbereichverfahren (Prüfbedingung A) gearbeitet werden.

### 1.3.3.4 Salzanalysen

Das Spektrum chemischer, mineralogischer und physikalischer Verfahren zur Identifizierung von Salzen, Verwitterungsneubildungen und anderen Substanzen im Rahmen der Untersuchung von Naturwerkstein ist sehr groß. Dies gilt sowohl für die qualitativen als auch die quantitativen Untersuchungsmethoden.

Daher können hier nur die gängigsten und am häufigsten verwendeten Verfahren kurz beschrieben werden. Auf die in früherer Zeit vielfach verwen-

deten nasschemischen Verfahren wird in diesem Zusammenhang nicht mehr eingegangen, da sie nur noch in speziellen Einzelfällen von Bedeutung sind.

Da die Analysen oft hohen Geräteaufwand und in jedem Falle tiefreichende naturwissenschaftliche Kenntnisse voraussetzen, können sie nur von entsprechend ausgebildeten Fachleuten durchgeführt und interpretiert werden.

Im WTA-Merkblatt 4-5-99/D [76] wird eine Bewertung der schadenverursachenden Wirkung verschiedener Salzionen (Chloride, Nitrate und Sulfate) in Mauerwerk gegeben (Tabelle 7). Bei mittlerer und hoher Belastung sind weitere Untersuchungen zum Gesamtsalzgehalt und ggf. Maßnahmen erforderlich.

Einfache Rückschlüsse zum Gesamtsalzgehalt können aus der ermittelten Leitfähigkeit gezogen werden. Zusammen mit stichprobenartigen qualitativen Analysen kann eine Bewertung nach Tabelle 7 vorgenommen werden.

**Tabelle 7** ■ Bewertung der schadensverursachenden Wirkung verschiedener Salzionen in Mauer

Chloride	< 0,2	0,2–0,5	> 0,5
Nitrate	< 0,1	0,1–0,3	> 0,3
Sulfate	< 0,5	0,5–1,5	> 1,5
Bewertung	Belastung gering – Maßnahmen im Ausnahmefall erforderlich	Belastung mittel – weitergehende Untersuchungen zum Gesamtsalzgehalt (Salzverbindung, Kationenbest.) erforderlich  Maßnahmen im Einzelfall erforderlich	Belastung hoch – weitergehende Untersuchungen zum Gesamtsalzgehalt (Salzverbindung, Kationenbest.) erforderlich  Maßnahmen erforderlich

1.3.3.4.1 Qualitative Salzbestimmung

Teststäbchen

Prinzip: Am Bauwerk vorgefundene Salze werden in destilliertem Wasser gelöst. Mit speziellen Chemikalien beschichtete Teststäbchen verfärben sich beim Eintauchen in die z. T. auf einen bestimmten pH-Bereich eingestellte Lösung abhängig von der Konzentration des betreffenden Stoffes.

Teststreifen sind erhältlich u. a. für den Nachweis von Chlorid-, Nitrat- und Sulfationen.

Die Chemikalien reagieren nur auf ein bestimmtes Anion oder Kation. Die Intensität der Verfärbung gibt erste Hinweise auf die Konzentration des Salzes in der Lösung. Daher lassen sich damit auch halbquantitative Analysen durchführen.

**Einschränkung:** Störung durch Fremdstoffe, durch zu hohe Verdünnung

**Verwendung:** Einfache Prüfung am Bauwerk auf das Vorhandensein wasserlöslicher Salze. Entscheidungshilfe für die Durchführung weiterer quantitativer Analysen. Halbquantitative Aussagen sind nur möglich bei genauer Einwaage der Substanzen.

## **Röntgenografische Phasenanalyse**

**Prinzip:** Salzkristallaggregate oder Gesteinsproben werden pulverisiert und in einem Röntgendiffraktometer einer gerichteten Röntgenstrahlung ausgesetzt. In Abhängigkeit von der Kristallstruktur der untersuchten Stoffe werden die Röntgenstrahlen gebeugt und die Intensität der gebeugten Strahlen mit einem Detektor registriert. Die daraus resultierenden Diagramme ermöglichen eine Bestimmung der einzelnen Mineralphasen, die das Stoffgemisch zusammensetzen.

**Verwendung:** Analyse von Mineralgemischen, qualitativ und halbquantitativ, hoher apparativer Aufwand, mineralogische Fachkenntnisse erforderlich.

## **Rasterelektronenmikroskopie (REM)**

**Prinzip:** Untersuchung von Proben durch Abtasten mit einem Elektronenstrahl. Aus den rückgestreuten Elektronen lässt sich ein räumliches Bild der Substanz auf dem Bildschirm erzeugen.

**Verwendung:** Quasi-optische Untersuchung aller Substanzen und Identifizierung anhand von äußeren und kristallografischen Merkmalen. Am Gestein selbst können Verwitterungseffekte und sonstige Eigenschaften bei bis zu 100.000-facher Vergrößerung beobachtet werden.

**Mikrosonde:** Bei Verbindung der Rasterelektronenmikroskopie mit der sog. Mikrosonde, einer energiedispersiven Röntgenfluoreszenzanalyse, lassen sich einzelne Partikel quantitativ auf ihre elementare Zusammensetzung untersuchen.

## **Infrarotspektroskopie**

**Prinzip:** Infrarotstrahlung führt zur Anregung von Energiezuständen in Molekülen und Absorption charakteristischer Frequenzen, mit deren Hilfe organische Substanzen, aber auch mineralische Phasen analysiert werden können.

**Verwendung:** Qualitative Analyse, unter Verwendung von ATR-Technik (Abgeschwächte Totalreflexion) auch quantitative Analyse [19, S. 13].

### 1.3.3.4.2 Quantitative Salzbestimmung

#### Leitfähigkeitsmessung

**Prinzip:** Messung der elektrischen Leitfähigkeit an feuchtem Mauerwerk mit Handgerät oder am wässrigen Auszug eines Bohrkerns oder Bohrmehls zur Bestimmung des Gesamtgehaltes an leicht wasserlöslichen Bestandteilen.

An Repräsentativproben werden zusätzlich die Salzgehalte einzelner Kationen und Anionen über quantitative fotometrische bzw. ionenchromatografische Analysen bestimmt, um Referenzwerte zu erhalten. Danach ist allein über die Messung der Leitfähigkeit eine Abschätzung der Salzbelastung möglich.

**Einschränkung:** OH-Ionen haben bei pH-Werten über 11 einen erheblichen Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit.

**Verwendung:** Schnelles Verfahren zur flächenhaften Beurteilung des Salzgehaltes.

#### Fotometrie

**Prinzip:** Filtrieren der gelösten Probe und Versetzen des Filtrats mit Reagenzien, die sich bei Vorhandensein einzelner Anionen verfärben. Bestimmung der Intensität des Farbtönen mit dem Fotometer und Ermittlung der Konzentration der jeweiligen Anionen.

**Verwendung:** Quantitative Analyse von vorwiegend Chlorid-, Sulfat- und Nitrationen [46, S. 66 f.].

#### Ionenchromatografie

**Prinzip:** Physikalisch-chemisches Verfahren zur Trennung von Salzgemischen. Salzlösung durchläuft mit einem Eluenten (mobile Phase) eine Trennsäule mit Ionenaustauschern. Die Änderungen in der mobilen Phase werden von einem Detektor (z. B. Leitfähigkeitsdetektor) erfasst und aufgezeichnet.

**Verwendung:** Qualitative und quantitative Analyse von vorwiegend Chlorid-, Sulfat- und Nitrationen [76], auch Analyse von Kationen möglich.

## Atomabsorptionsspektroskopie (AAS)

**Prinzip:** Die aufgelöste Probe wird in einer Flamme atomisiert. Das durch die Flamme geleitete Licht des zu untersuchenden Elementes wird je nach Konzentration dieses Elementes absorbiert, sodass sich die Menge des Stoffes aus dem Grad der Absorption genau bestimmen lässt.

**Verwendung:** Sehr genaue Analyse auch kleinster Mengen von Kationen, die in Salzen und sonstigen anorganischen Substanzen enthalten sind.

## Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)

**Prinzip:** Bestrahlen von speziell vorbereiteten Proben mit Röntgenstrahlen; jedes Element der Probe sendet eine sekundäre Röntgenstrahlung aus, die in einem Analysator aufgrund ihrer Energie getrennt und entsprechend ihrer Intensität registriert wird. Daraus ist die qualitative und quantitative Analyse von Elementen möglich.

**Verwendung:** Apparativ aufwendige, aber schnell durchzuführende Untersuchung, mit der die Elemente einer Verbindung quantitativ zu bestimmen sind.

## ICP-Verfahren (Inductively Coupled Plasma)

**Prinzip:** Die gelöste Probe wird in ein ionisiertes Gas (Plasma) geleitet und dort ionisiert, sodass elementspezifische Spektren ausgesandt werden, die über Analysatoren qualitativ und quantitativ ausgewertet werden können.

**Verwendung:** Ähnlicher Anwendungsbereich wie AAS, aber höhere Empfindlichkeit bei einigen Elementen, sehr hoher und teurer apparativer Aufwand.

### 1.3.3.5 Mikrobiologische Untersuchungen

#### Probenahme

- Entnahme von Oberflächenmaterial unter keimfreien Bedingungen
- bei Anwendung der Kryotechnik Vereisen der Probe mit flüssigem Stickstoff

#### Untersuchung

Für die Untersuchung von Mikroorganismen gibt es vielfältige Methoden. Bei Baustoffuntersuchungen werden im Wesentlichen folgende Verfahren angewendet:

- Anreichern der Probe auf Nährboden, Kultivierung,

- Auszählen der Zellzahlen (MPN-Methode, Koch'sches Plattengussverfahren) → Bestimmung der Besiedlungsdichte,
- Nachweis von Protein, Säuren,
- Selektion von Mikroorganismen, z. B. unter anaeroben Bedingungen,
- Anreichern von isolierten Kulturen auf Spezialmedien → Aktivierung von speziellen, z. B. Mangan oxidierenden Mikroorganismen,
- Herstellen von Ultradünnschnitten, Dünnschliffen,
- Analyse (Lichtmikroskop, Rasterelektronenmikroskop, energiedispersive Röntgenanalyse).

## Ziel der Untersuchungen

- Nachweis von gesteinschädigenden Mikroorganismen bzw. des Gefährdungspotenzials von Mikroorganismen, z. B. in Krusten (Kapitel 2.1.1 und 2.1.3)
- Prüfung von Konservierungsmitteln auf die Besiedelung von Mikroorganismen

### 1.3.3.6 Konservierungsversuche

Für die Konservierung mit Festigungs- und Hydrophobierungsmitteln gibt es keine genormten Verfahren. Die Laborversuche können sowohl an einzelnen Gesteinsproben als auch im Verbund von Gesteinskörpern durch Simulation der Wandverhältnisse im Labormaßstab durchgeführt werden. Nachfolgend werden Versuche an Bohrkernproben beschrieben.

#### 1.3.3.6.1 Festigung

Durch eine Festigung soll dem verwitterten Gesteinsbereich mit verminderter Kohäsion der Mineralien wieder die Festigkeit des unverwitterten Gesteinsbereichs zugeführt werden. In den Festigungsversuchen werden das Festigkeitsprofil sowie die Aufnahmemenge und Eindringtiefe des Konservierungsmaterials ermittelt. Dabei kann sowohl das Material (Wirkstoffe, Wirkstoffkonzentration, Verdünnung) als auch Dauer, Abstand und Anzahl der Auftragszyklen variiert werden.

## Verfahren

- Tränkung der Proben durch kapillares Saugen, Zeitdauer z. B. 1 min., Abstand der Tränkungen z. B. 5 min. bei mehrfachen Tränkungszyklen.
- Die randlich abgedichteten Proben werden auf Abstandshalter in Becken mit Festigungsmittel gestellt, sodass die Oberfläche der Proben gerade benetzt ist.

- Wägung der Proben vor der Behandlung sowie nach jeder Tränkung zur Ermittlung der Aufnahmemenge bezogen auf die eingetauchte Fläche
- **Messung der Eindringtiefe:**
  1. visuell durch Ausmessen der Durchfeuchtungszone des frisch eingedrungenen Mittels → ungenau, da Eindringtiefe des Wirkstoffs nicht mit der des Lösemittels identisch sein muss
  2. Benetzen der ausreagierten Probe mit 1,5-Diphenylthiocarbazon bei Festigung mit Kieselsäureester → Rotfärbung im Bereich der Eindringtiefe durch Reaktion von zinnorganischen Katalysatoren des Festigungsmittels mit komplexbildender Lösung
- **Überprüfung des Festigkeitsprofils der Probe:**
  1. Haftzug- oder Biegezugmessungen (Kapitel 1.3.3.2) am vollständigen Bohrkern bzw. einzelnen Bohrkernscheiben im Tiefenprofil. Vergleich der Festigkeitsprofile von ungefestigten und gefestigten Proben zur Ermittlung der Verwitterungstiefe, die mit dem Festigungsmittel zu erfassen ist, bzw. zur Verdeutlichung der Festigkeitszunahme.
  2. Bestimmung der Bohrhärte [44, S. 37f]

**Prinzip:** Kleinbohrgerät mit Bohrer, 3 mm Ø, und integriertem Schreiber, der die Bohrereindringtiefe als Funktion der Zeit aufzeichnet. Die Steigung der Kurve gibt den Bohrwiderstand oder die Bohrhärte an. Über Vergleichsmessungen an unbehandelten und behandelten Steinen kann der Festigkeitszuwachs überprüft werden.

### 1.3.3.6.2 Hydrophobierung

Eine Hydrophobierung soll die Wasseraufnahmefähigkeit des Gesteins herabsetzen.

#### Verfahren

- Variation von Hydrophobierungsmittel, Lösemittel sowie Anzahl, Dauer und Abstand der Tränkungen
- Tränkung der Proben analog zum Festigungsversuch (Kapitel 1.3.3.6.1)
- Wägung der Proben vor der Behandlung sowie nach jeder Tränkung zur Ermittlung der Aufnahmemenge bezogen auf die eingetauchte Fläche
- Messung der Eindringtiefe des ausreagierten Hydrophobierungsmittels (nach min. 2 Wochen) durch Benetzen einer frischen Bruchfläche
- Überprüfung der Wirksamkeit der Hydrophobierung durch Messung an unbehandelten und behandelten Proben (Kapitel 1.3.3.3). Bei  $w$ -Werten  $< 0,1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$  gilt eine Hydrophobierung als wirksam [21, S. 257]:
  1. kapillare Wasseraufnahme nach DIN EN 1925 [61]

- 2. Messung der max. Wasseraufnahme durch Unterwasserlagerung unter Atmosphärendruck an allseitig imprägnierten Proben
- 3. Messung der Wasseraufnahme mit dem Karsten’schen Prüfröhrchen (Kapitel 1.3.3.3.1)
- 4. Tropfenkonturanalyse [58]: Die hydrophobe Wirkung von Baustoffen kann über den Kontaktwinkel von benetzenden Wassertropfen nachgewiesen werden, wenn er größer als 90° ist. Vergleichbare Werte für Kontaktwinkel auf Bohrmehl minimieren die Probemenge und damit den Zerstörungsgrad. Forschungen ergaben, dass aufgrund der Vielzahl von Einflussfaktoren das zeitliche Verhalten des Tropfens, d.h. die Veränderung des Kontaktwinkels über die Zeit, aussagekräftiger ist als der Grenzwert von 90°.

1.3.3.7 Mörteluntersuchungen

Kennzeichnungen für Mörtel sind vor allem in DIN EN 998-1 [77] PUTZMÖRTEL festgelegt, gültig für Werkmörtel aus anorganischen Bindemitteln. In dieser Norm werden die Festmörtel nach ihren Eigenschaften – Druckfestigkeit, kapillare Wasseraufnahme und Wärmeleitfähigkeit – unterschieden und in Kategorien unterteilt (Tabelle 8). Um DIN EN 998-1 [77] mit Ausführungs- und Anwendungshinweisen zu ergänzen, wurde DIN V 18550 [65], überarbeitet nach DIN 18550, eingeführt.

Die neuen Druckfestigkeitsklassen unterscheiden sich von den alten Mörtelgruppen in DIN 18550 [78].

Tabelle 8 ■ Mörtелеigenschaften nach DIN EN 998-1 [77]

Eigenschaft	DIN-EN 998-1	
	Kategorie	Wert
Druckfestigkeit nach 28 Tagen	CS I	0,4–2,5 N/mm <sup>2</sup>
	CS II	1,5–5,0 N/mm <sup>2</sup>
	CS III	3,5–7,5 N/mm <sup>2</sup>
	CS IV	≥ 6 N/mm <sup>2</sup>
Kap. Wasseraufnahme (außer Sanierputz)	W 0	nicht festgelegt
	W 1	c ≤ 0,4 kg/(m <sup>2</sup> · min <sup>0,5</sup> )
	W 2	c ≤ 0,2 kg/(m <sup>2</sup> · min <sup>0,5</sup> )
Wärmeleitfähigkeit	T 1	≤ 0,1 W/(m · K)
	T 2	≤ 0,2 W/(m · K)



In DIN EN 998-1 [77] wird festgelegt, dass die Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme von Putzen nach DIN EN 1015-18 [79] durchzuführen ist. Die kapillare Wasseraufnahme wird in Zeitintervallen von 10 und 90 Minuten gemessen und in  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$  angegeben. Nach DIN EN ISO 15148 [63] wird der w-Wert dagegen in  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$  angegeben. Der Umrechnungsfaktor zwischen den beiden unterschiedlich ermittelten Wasseraufnahmekoeffizienten beträgt  $\sqrt{60}$  [78].

Nach DIN V 18550 [65] erfolgt die Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten w in  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$  in Anlehnung an DIN EN ISO 15148 [63].

Für Sanierputze nach WTA wird in dem zugehörigen WTA-Merkblatt 2-9-04/D [80] eine kapillare Wasseraufnahme nach 24 h von  $A_b \geq 0,3 \text{ kg}/\text{m}^2$  festgelegt.

Eine Unterteilung der Putzmörtelgruppen erfolgt in DIN EN 998-1 [77] nach Art der Eigenschaften der Mörtel und/oder ihrem Verwendungszweck [81]:

- GP (General Purpose Mortar) Normalputzmörtel, ohne besondere Eigenschaften, CS I-IV,
- LW (Light Weight Mortar) Leichtputzmörtel, definierte Trockenrohdichte ( $\leq 1.300 \text{ kg}/\text{m}^3$ ), CS I-III,
- CR (Coloured Render) Edelputzmörtel, farbiger Putzmörtel, CS I-IV,
- OC (One Coat Mortar) Einlagenputzmörtel für außen; einlagig verarbeiteter Mörtel, der dieselben Funktionen wie mehrlagiger Außenputzmörtel erfüllen muss, CS I-IV,
- R (Renovation Mortar) Sanierputzmörtel, hohe Porosität und Wasserdampfdiffusion, verminderte kapillare Leitfähigkeit, geeignet für feuchtes und salzhaltiges Mauerwerk, CS II,
- T (Thermal Mortar) Wärmedämmputze, spezifische wärmedämmende Eigenschaften, CS I-II.

Je nach Zielsetzung und Fragestellung kommen unterschiedliche Analysemethoden in Betracht.

Zur Charakterisierung des Mörtels ist in erster Linie seine Gesamtzusammensetzung, hierbei insbesondere das Bindemittel-Zuschlag-Verhältnis von Bedeutung. Die Mörtelanalyse orientiert sich teilweise an DIN EN 196-2 [82] und DIN EN 459-2 BAUKALK: PRÜFVERFAHREN [83]. Die Analysemethoden sind bei Mehlmann BESTIMMUNG VON CHEMISCH-MINERALOGISCHEN KENNWERTEN SOWIE UNTERSUCHUNGSMETHODEN [84], aufgeführt.



Die wesentlichen Bestandteile einer Bindemittelanalyse sind die Bestimmung der säurelöslichen Anteile sowie des Glühverlustes. Die weiteren Analysen werden vor allem für bestimmte Fragestellungen angewendet. Durch Voranalysen, z. B. Mikroskopie und Röntgenbeugung, kann die Art des verwendeten Bindemittels und Zuschlags festgestellt werden. Im Folgenden wird der Analysengang für Mörtel mit hydraulischen Bindemitteln vorgestellt.

1. Bestimmung der säurelöslichen Anteile (Kapitel 1.3.3.4)

**Voraussetzung:** säureunlöslicher Zuschlag (Kontrolle durch Mikroskopie)

**Ziel:** Bestimmung des Bindemittelanteils

**Verfahren:**

Versetzen von 10 g der analysenfein aufgemahlene Probe mit 100 ml 1 + 4 verdünnter HCl. Je nach Bindemittelart oder Alter des Mörtels kann das Lösen mehrere Wochen dauern. Gegebenenfalls Erhitzen und 5 min. schwach kochen lassen.

→ Filtrat enthält gut säurelöslichen Teil des Bindemittels  
→ Rückstand enthält schwer löslichen Teil der Bindemittelkieselsäure → Versetzen mit Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> zum Lösen der Kieselsäure → Rückstand: Zuschlag  
Die Differenz des Zuschlags zu 100 % ergibt den Bindemittelanteil (ohne Berücksichtigung des Glühverlustes).

**Einschränkung:** Lösliche Kieselsäure aus Zusatzstoffen, z.B. Trass, erhöht den Anteil an hydraulischem Bindemittel.

2. Bestimmung des Glühverlustes

**Verfahren:** Glühen von 5 g Ausgangsprobe m<sub>1</sub> bei 1.000 °C, danach Abkühlung bis zur Gewichtskonstanz m<sub>2</sub>

**Auswertung:** Glühverlust =  $m_1 - m_2 / m_1 \cdot 100 \%$

**Ziel:** Ermittlung von anhaftender Feuchtigkeit, Hydratwasser, carbonatischen Bindemittelanteilen, organischen Anteilen, sodass die Bindemittelverhältnisse auf den Zustand vor Verarbeitung des Mörtels zurückgerechnet werden können.

**Einschränkung:** Verfälschung durch organische Zusatzstoffe  
Der prozentuale Anteil des Glühverlustes kann erste Hinweise auf die Bindemittelart geben (Tabelle 9):

**Tabelle 9** ■ Spezifischer Glühverlust verschiedener Bindemittelarten [84, S. 47]

Bindemittelart	Glühverlust [M.-%]
Zement	1–2 (< 5 nach DIN EN 197-1)
hochhydraulischer Kalk	13–20
hydraulischer Kalk	18–21

### 3. Bestimmung hydraulischer Anteile ( $\text{SiO}_2$ , Sesquioxide)

Verfahren zur Bestimmung von löslichem  $\text{SiO}_2$ :

1. Kochen des Rückstands des HCl-löslichen Aufschlusses mit  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow$  HCl-schwer löslicher Teil der Kieselsäure wird aufgeschlossen und geht in Lösung  $\rightarrow$  Filtrat mit 1 + 4 verdünnter HCl ansäuern, abrauchen und Rückstand mit 1 + 4 verdünnter HCl aufnehmen  $\rightarrow$  Rückstand: Kieselsäure  $\rightarrow$  Glühen des verunreinigten  $\text{SiO}_2$  bei  $1.000^\circ\text{C} \rightarrow$  gravimetrische Bestimmung des  $\text{SiO}_2$  nach Abrauchen mit  $\text{HF}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$
2. Versetzen des Filtrats des in HCl gelösten  $\text{SiO}_2$  mit  $\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow$  Abrauchen und Rückstand mit 1 + 4 verdünnter HCl aufnehmen  $\rightarrow$  Glühen und Bestimmung der  $\text{SiO}_2$  siehe 1.

Ziel: Bestimmung der Bindemittelart (Zement, hydraulischer Kalk)

Verfahren zur Bestimmung von Sesquioxiden ( $\text{R}_2\text{O}_3$ ):

3. Versetzen des Filtrats von 2. mit  $\text{NH}_4\text{OH}$  und  $\text{H}_2\text{O}_2$  und Glühen bei  $1.000^\circ\text{C}$
- Einschränkung: Analysengang gibt nur Hinweise auf hydraulische Anteile, da auch nicht hydraulische Anteile erfasst werden können.
4. fotometrisch (DIN EN 196-2 [82])
  5. titrimetrisch (DIN EN 196-2 [82])

Ziel: Bestimmung der Bindemittelart

### 4. Bestimmung des Sulfatgehalts (in Anlehnung an DIN EN 1744-1 [85])

Verfahren: Fällung von  $\text{SO}_4^{2-}$  aus HCl-saurer Probe mit  $\text{BaCl}_2$

Ziel: Mörtelklassifikation, Hinweise auf Sekundärbildungen

### 5. Bestimmung des Kohlendioxidgehalts (in Anlehnung an DIN EN 196-2 [82])

Verfahren:

- Referenzverfahren: Aufschluss des Karbonats mit Phosphorsäure, Leitung des freiwerdenden Kohlenstoffdioxids über Absorptionsrohre zur Aufnahme des bei der Absorption entstehenden Wassers, Bestimmung der Masse des freigesetzten Kohlenstoffdioxids über Differenzwägung.
- Alternativverfahren: Ursprungssubstanz wird mit Quecksilber(II)chlorid und  $\text{H}_2\text{SO}_4$  versetzt zum Freisetzen von  $\text{CO}_2$ , das von Natronasbest absorbiert wird.

Ziel: Ermittlung von  $\text{CaCO}_3$  unter der Annahme, dass carbonatisches Bindemittel und säureunlöslicher Zuschlag vorliegen

### 6. Bestimmung des CaO- und MgO-Gehaltes

Verfahren:

- titrimetrisch: Bestimmung von CaO und CaO + MgO durch komplexometrische Titration mit EDTA

Ermittlung des MgO-Gehaltes durch Differenzbildung

- mittels Atomabsorptionsspektralanalyse AAS

Ziel: Bestimmung der Bindemittelart

## 7. Weitere Untersuchungsmethoden

- Qualitative und quantitative Analyse organischer Zusätze: Prüfung mit 3 %iger Natronlauge
- Qualitative und quantitative Analyse von Sekundärbildungen (Kapitel 1.3.3.4)
- Proteinnachweis: Reaktion mit Ninhydrin, aber positive Reaktion ist nicht eindeutig als Nachweis anzusehen, da sie auch durch Mikroorganismen verursacht sein kann
- Quantitative Bestimmung des Hydratwassers: Differenz von  $\text{CO}_2$  zum Glühverlust abzüglich des Feuchtegehaltes (Kapitel 1.3.3.3.1)

### 1.3.3.7.2 Zuschlag

#### 1. Qualitative Analyse

Verfahren:

- Durchlicht- oder Auflichtmikroskopie (Kapitel 1.3.3.1)
- Röntgendiffraktometrie (Kapitel 1.3.3.1 und 1.3.3.7.4)

Ziel: Bestimmung der Zuschlagsarten

#### 2. Quantitative Analyse

Verfahren:

- Differenz zum säurelöslichen Anteil (Kapitel 1.3.3.7.1)  
Ziel: Bestimmung des Gesamtzuschlaganteils
- Auflichtmikroskopie des aufbereiteten Zuschlags (Auszählen oder Abschätzen) (Kapitel 1.3.3.1 und 1.3.3.7.4)  
Ziel: Bestimmung der mineralogischen Zusammensetzung des Zuschlags

#### 3. Siebanalyse

Verfahren:

- Siebung der Mörtelprobe auf Siebböden mit unterschiedlichen Lochweiten nach DIN EN 933-1 [86], [84]
- halblogarithmische Darstellung von Kornsummenkurven durch Auftrag der Durchgänge [M.-%] pro Sieb

Ziel: Bestimmung der Korngrößenverteilung

### 1.3.3.7.3 Bindemittel-Zuschlag-Verhältnis

Die Kenntnis des Mischungsverhältnisses des ursprünglichen Mörtels ist im Hinblick auf vergleichbare Ausbesserungsmörtel relevant.

**Verfahren:**

- Bestimmung der säurelöslichen Anteile (Kapitel 1.3.3.7.1)
- Ermittlung des Glühverlustes (Kapitel 1.3.3.7.1)
- Bindemittelanteil = säurelösliche Anteile – Glühverlust
- Zuschlag = Differenz des Bindemittelanteils zu 100 %
  - ➔ Voraussetzung, dass der Zuschlag keine säurelöslichen Anteile enthält (Kontrolle durch Mikroskopie)

### 1.3.3.7.4 Sonstige Untersuchungen

Durch mikroskopische oder röntgenografische Analysen können die Ergebnisse der chemischen Analyseverfahren eingeengt bzw. untermauert werden.

#### Mikroskopie (Kapitel 1.3.3.1)

Soll die Probe gezielter im Hinblick auf bestimmte Fragestellungen untersucht werden, als dies mit der chemischen Analyse möglich ist, wird man sich zunächst der **Auflichtlichtmikroskopie** bedienen. Dies kann sowohl an der unbearbeiteten als auch an der geschliffenen Probe erfolgen. Speziell zur Analyse der Verarbeitung ist ein Anschliff erforderlich.

**Untersuchungsziel von Auflicht- und Durchlichtmikroskopie:**

- Gefüge des Mörtels ➔ Zustand, Verarbeitung (z. B. mehrlagig)
- Porosität, die z. B. mit eingefärbtem Kunstharz sichtbar gemacht wird
- Art des Zuschlags ➔ z. B. Information, ob der Zuschlag aus säurelöslichen Anteilen besteht, die die chemische Bindemittelanalyse verfälschen könnten.
- Zusatzstoffe, wie Kohle, Schlacke, Ziegel, Fasern (z. B. Kälberhaare)
- Besonderheiten, z. B. Sekundärbildungen, Verbund des Mörtels, Ausheilung von Rissen durch Calcit, Kalkherzen aus ungelöschten Kalkresten (unbearbeitete Probe)
- Kornform des Zuschlags (bevorzugt nach Abtrennung vom Bindemittel)

#### Röntgendiffraktometrie

**Untersuchungsziel:**

- Phasenanalyse kristalliner Komponenten von Bindemittel, Zuschlag und ggf. Zusatzstoffen, z. B. Analyse von Dolomit
- Analyse submikroskopischer Komponenten

- nach gezielter Probenahme und Aufbereitung:
  - Zementsteinphasen
  - Sekundärbildungen, z. B. Ettringit

**Einschränkung:**

- nur kristalline Phasen nachweisbar
- Nachweisgrenze: ca. 3 M.-%
- nur qualitative bzw. halbquantitative Analyse möglich

### 1.3.3.8 Anstrichuntersuchungen

#### **Ziel der Untersuchungen**

- Altersmäßige Einstufung von Fassungen
- Materialanalyse

#### **Verfahren**

- Freilegen aussagekräftiger Stellen mit feinen Messern oder Nadeln
- Querschliffanalyse → Schichtenaufbau, Farbe und Dicke der einzelnen Schichten, Verteilung von Farb- und Bindemittel
  - Einbettung der Probe in Epoxidharz oder Polyesterharz
  - schleifen, vornehmlich per Hand, trocken
  - zeichnerische Dokumentation der Schichtenfolge, ergänzt durch Auflicht-Mikrofotografie
  - Beschreibung der Schichten im Schichtenblatt, zur Abgrenzung verschiedener Fassungen (Trägematerial, Grundierungsschichten oder Farblagen)
  - Korrelation von Fassungen mithilfe von Leitfassungen, Schmutz- oder Alterungsschichten
- Mikrochemische Analyse von Pigmenten und Bindemitteln → vgl. weiterführende Literatur, z. B. [87]
- Pigmentanalyse:
  - Röntgendiffraktometrie (Kapitel 1.3.3.1)
  - Mikrosonde (Kapitel 1.3.3.1)
  - Lasermikroanalyse (Spektralanalyse durch Anregung mit Laserstrahl)
- Bindemittelanalyse:
  - Infrarotspektroskopie (qualitative und quantitative Analyse anorganischer und organischer Verbindungen durch Aussenden spezifischer Spektren bei Anregung mit IR-Strahlen zur Analyse von Silikat- und Dispersionsfarben)
  - Röntgendiffraktometrie (Kapitel 1.3.3.1) zur Analyse von Silikatfarben
  - Chromatografie (Trennung von flüssigen oder gasförmigen Phasen zur Analyse organischer Verbindungen anhand von Chromatogrammen)

- ▣ Differentialthermoanalyse (Messung chemischer und physikalischer Veränderungen beim Aufheizen einer Probe verglichen mit einer Referenzprobe)
- Histochemische Anfärbung von Dünnschliffen oder Querschliffen
  - ➔ Nachweis von Bindemitteltypen, besonders Öle und Proteine
  - ➔ Erkenntnis über Durchdringung oder Vermischung von Bindemitteln verschiedener Schichten
- Schnellverfahren zur Bestimmung von Dispersions-, Acryl- und Mineralfarben vor Ort
  - ▣ Dispersionsfarben auf Polyacrylsäurebasis: Anquellen bei Einwirkung von Lösemittel (Alkohol, Xylol)
  - ▣ Acrylfarben: Anlösen der Farbe durch Lösemittel (Ankleben von mit Lösemittel getränktem Wattebausch)
  - ▣ Mineralfarben: keine Farbanlösung, Erweichen des Farbanstrichs durch starke Wasseraufnahme ➔ abwischbar, jedoch keine Unterscheidung zu dispersionsgebundenen Silikatfarben mit bis zu 5 % Dispersionsanteil möglich.

## 1.4 Sanierungsmethoden

### 1.4.1 Reinigung

#### Ziel der Reinigung

Entfernung von Schmutz, Krusten, Farbresten und sonstigen Belägen, damit die Originalfarbe des Steins wieder zum Vorschein kommt und die Poren geöffnet sind. Dabei soll jede Aufrauung der Steinoberfläche vermieden werden.

Bei denkmalwerten Gebäuden wird häufig nur verlangt, die eigentlichen Schadstoffe zu entfernen, unschädliche Schmutzreste aber auf der Oberfläche zu belassen.

#### Hinweise auf weitere Reinigungszwecke

- Taubenkot (Kapitel 2.1.2)
- Farbentfernung (Kapitel 1.4.3)
- Bewuchsentfernung (Kapitel 1.4.2)



Verfahren (Tabelle 10)

Tabelle 10 ■ Reinigungsverfahren u. a. nach WTA-Merkblatt 3-5-98/D [88]

Verfahren/Parameter	Wirkungsweise	Anwendungsbereich/ Einschränkung
1. Wasserreinigung		
<p>kalt <b>1.1 Berieselung</b> [ heiß Einwirkdauer: 2–8 h drucklos, ggf. bis zu mehreren Wochen</p>	Aufweichen, Quellen und Anlösen von kittenden Bestandteilen der Kruste wie Salzen und Tonen, Abspülen	Anwendung nur bei kalkgebundenem Stein mit Schmutz- oder Gipskruste und dichten Schmutzbelägen, geeignet für glatte und dichte Oberflächen, nicht geeignet für stark saugfähige Steine, Gefahr der Mauerwerksdurchfeuchtung
<p>kalt <b>1.2 Wasserstrahlen</b> [ heiß Einwirkdauer: 5–10 min / m² Druck: 20–max. 120 bar, meist 50–80 bar, Durchflussmengen: 300–1.200 l/h, ggf. mit bis zu 5 % Tensiden (Neutralreiniger)</p>	Wirkung durch Druck und Temperatur des Wasserstrahls	gebräuchliches und preiswertes Kurzzeitverfahren zur Natursteinreinigung Nachteile: Salze werden in den Stein eingetragen, nicht abgespült, Substanzverlust bei zu hohem Druck Nachspülen, um Netzmittel vollständig zu entfernen
<p><b>1.3 Wasserstrahlen mit Druckluft und Feinststrahlmittel</b> Parameter je nach Verfahrenstyp unterschiedlich, Druck: 0,5–1,5 bar, Strahlmittel: variabel, max. 0,5 mm z. T. Verwirbelung von Strahlmittel an der Düse, geringer Wasserverbrauch, z. T. nur zur Bindung des Strahlstaubes <b>Handelsnamen:</b> Jos, Nebelstrahlen</p>	mechanischer Schmutzabtrag, Abspülen durch Wasser	schonend, geringer Wassereintrag, geringer Druck
Fortsetzung auf S. 93 ➔		

Tabelle 10 ■ Fortsetzung

Verfahren/Parameter	Wirkungsweise	Anwendungsbereich/ Einschränkung
<b>1.4 Dampfstrahlen</b> Einwirkdauer: 5–10 min. / m <sup>2</sup> Temperatur: 160 °C Druck: max. 30 bar an der Düse Durchflussmenge: 300– 800 l/h	Reinigung durch Umwandlung von überhitztem Wasser in Dampf, die damit verbundene schlagartige Expansion bewirkt mechanisches Abtragen der Verschmutzung	geringere Durchfeuchtung als beim Wasserstrahlen, hohe Temperatur und Druck können zu Substanzverlust am Stein führen
<b>1.5 Vakuum-Verfahren</b> Aufbau von Vakuum durch ein Wasch-Spül-Absauggerät, Wasserverbrauch: ca. 30 l/h <b>Handelsname:</b> Gregomatic-Vakuum-Waschautomat	Reinigung durch Absaugen in einer Vakuumkammer, die von Hand über die Fassadenoberfläche geführt wird	schonend, geringe Wasserbelastung des Steins, nicht geeignet für raue Oberflächen
<b>2. Trockenreinigung</b>		
<b>2.1 Druckstrahlen mit feinstem Strahlmittel</b> Druck: 0,2–1,5 bar, Strahlmittel: variabel, Ø 10–100 µm, z. T. Verwirbelung von Strahlmittel in der Düse, Absaugen des Strahlguts mittels Unterdruck reduziert die Umgebungsbelastung <b>Handelsnamen:</b> Puderstrahlen, Mikrotrockenstrahlen	mechanisches Entfernen von Partikeln von der Steinoberfläche	schonend, kein Wassereintrag, auch für feinste restauratorische Freilegungen verwendbar
<b>3. chemische Reinigung</b>		
<b>3.1 Reinigung mit anorganischen Säuren (z. B. HCl, HF, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>), anorganischen Laugen (z. B. KOH, NaOH), organischen Säuren (z. B. Ameisensäure, Essigsäure)</b>	chemische Lösung der Verschmutzungen	für extrem festsitzende Verschmutzungen, chemische Belastung des Steins mit Gefahr der Beschädigung der Steinoberfläche und der Bildung bauschädlicher Salze, Gefahr der Reaktion mit Rückständen vorangegangener chemischer Reinigungen
Fortsetzung auf S. 94 ➔		

Tabelle 10 ■ Fortsetzung

Verfahren/Parameter	Wirkungsweise	Anwendungsbereich/ Einschränkung
<b>3.2 Reinigungspasten</b> je nach Pastentyp alkalische (z. B. $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ , $\text{NaHCO}_3$ ) oder saure Wirkstoffe (z. B. $\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18}$ , $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) bzw. Komplexbildner (Salze der EDTA), Einwirkzeit: 1–2 Tage, Feuchthalten, z. B. durch Folie	chemische Auflösung von Kalk- und Gipskrusten, Entfernung von Kupferverbindungen durch Bildung von wasserlöslichen Kupferkomplexen, die sich in Paste oder Kompressen anreichern	Gefahr der Bildung von bauschädlichen Salzen, EDTA v. a. anwendbar für Gipskrusten, anwendbar für Kupferverfärbungen von kalzithaltigem Naturstein unter Kupferabdeckungen [89]
<b>4. sonstige Verfahren</b>		
<b>4.1 Laserverfahren</b>	Abplatzen von Krusten durch die hohe Energie eines Laserstrahls	schonend, für restauratorische Zwecke
<b>4.2 Ultraschall-Verfahren</b>	Der Ultraschallmeißel wird durch einen Generator in Schwingungen versetzt.	schonend, für restauratorische Zwecke
<b>4.3 Trockeneis</b> zur Entfernung von Beschichtungen, Klebstoffen: 10–20 bar, mind. 6 bar	Beschleunigung von $\text{CO}_2$ -Trockeneispellets mit Druckluft. Beim Auftreffen der Pellets erfolgt eine punktuelle Unterkühlung der Oberfläche, wobei die Beschichtung versprödet, schrumpft und sich ablöst.	schonendes Verfahren, jedoch wenig Erfahrung mit mineralischen Stoffen, rückstandsfreies Auflösen der Pellets zu verdunstendem $\text{CO}_2$
<b>5. handwerkliche Reinigung</b>		
<b>5.1 Abbürsten</b> mit lauwarmem Wasser und Bürste	mechanisch	kleine Flächenleistung, schonend, geringe Wasserbelastung, nicht erfolgreich bei stärkeren Krusten
<b>5.2 steinmetzmäßiges Abarbeiten oder Abschleifen</b>	Abarbeiten der Kruste mit Steinmetzwerkzeugen	bei extrem festsitzenden Belägen; nur in begrenztem Umfang eingesetzt, da sehr aufwendig und mit Substanzverlust verbunden

Zur Überprüfung der Wirkungsweise, Einstellung der jeweiligen Parameter etc. sollte vor jeder Natursteinreinigung eine Musterfläche angelegt werden. Gegebenenfalls müssen mehrere Verfahren kombiniert werden, wie z. B. Heißdampf- und Nebelstrahlen oder Kompressen- und Laserstrahlreinigung. Bezüglich der Entsorgung sind die jeweils örtlich gültigen Regeln für Auffangen der Schmutzwasserflotte, des abgetragenen Materials und des Strahlglu-

tes zu beachten. Dies kann je nach Verfahren und Art der Verschmutzung zu einem erheblichen Kostenaufwand führen, da teilweise große Schadstoffmengen in den abgelösten Materialien enthalten sind. Bei chemischen Reinigungsverfahren ist ein Nachwaschen der Steinoberfläche erforderlich, um Rückstände der Chemikalien zu entfernen [88], [89].

1.4.2      **Beseitigung von und Schutz vor Bewuchs**

**Ziel**

Entfernung von Bewuchs in Form von Mikroorganismen, Kleinpflanzen, Sträuchern, zur Vermeidung von Schäden durch Wassereintrag, Wurzelsprengung (Kapitel 2.1.1). Durch Verwendung von Fungiziden und Bioziden wird vorübergehend weiterer Bewuchs verhindert. Bei Veralgung hat sich folgende Vorgehensweise bewährt [90]:

- algizide Imprägnierung,
- Heißwasserstrahlen (60 bis 80 °C, 2 bis 5 bar),
- algizide Imprägnierung als Grundierung s. o.,
- algizide Zwischen- und Deckbeschichtung mit Siliconharzfarbe.

**Verfahren (Tabelle 11)**

**Tabelle 11** ■ Verfahren zur Entfernung von Bewuchs (Kapitel 1.4.1)

Verfahren/Wirkungsweise	Vorteile	Nachteile
<b>1. händisch</b>		
<b>1.1</b> Mit lauwarmem Wasser und Bürste	schonend	kleine Flächenleistung
<b>1.2</b> Entfernen der Wurzeln von Hand oder mit Werkzeugen	bei kleinen Wurzeln schonend	kleine Flächenleistung, bei stärkeren Wurzeln Lösung von anhaftendem Gesteinsmaterial
<b>2. chemisch</b>		
<b>2.1</b> Abschneiden der Pflanzen und Bestreichen der Schnittstelle mit herbizidhaltigem Paraffin, dadurch Vermodern der Wurzeln	schonend, bei größeren Wurzeln anwendbar	kleine Flächenleistung, langwierig (1/4–1/2 Jahr)
Fortsetzung auf S. 96 ➔		

Tabelle 11 ■ Fortsetzung

Verfahren/Wirkungsweise	Vorteile	Nachteile
2.2 Fungizide und Biozide unterschiedlicher Zusammensetzung	vorübergehend vorbeugende Wirkung, Entfernung vor allem von Mikroorganismen	Eintrag von Chemikalien, giftig, nicht immer biologisch abbaubar
3. Wasserreinigung anwendbar für Kleinpflanzen und Mikroorganismen		
3.1 Warmwasserstrahlen Temperatur: 80–100 °C Druck: 50–80 bar Sonderform: 60–80 °C, 2–5 bar	große Flächenleistung	hoher Wassereintrag  geringerer Wassereintrag, in Kombination mit algizider Imprägnierung bewährt bei Veralgung [90]
3.2 Dampfstrahlen Temperatur: 160 °C Druck: ca. 30 bar	Erhöhung der Leistung, geringerer Wassereintrag und Druck gegenüber Warmwasserstrahlen	Gefügebelastung durch starke Volumenzunahme bei Umwandlung von überhitztem Wasser in Dampf auf Gesteinsoberfläche und Aufheizung des Gesteins durch Verdampfungswärme
3.3 Wasserstrahlen mit Druckluft und Strahlmittel Parameter je nach Verfahrenstyp unterschiedlich, Druck: 0,1–3 bar Strahlmittel: variabel, 5–500 mm z. T. Verwirbelung von Strahlmittel an der Düse, geringer Wasserverbrauch, z. T. nur zur Bindung des Strahlstaubes <b>Handelsnamen:</b> Jos, Nebelstrahlen	schonend, höhere Flächenleistung als mechanische Verfahren	geringer Wassereintrag
3.4 Vakuum-Verfahren Aufbau von Vakuum durch ein Wasch-Spül-Absauggerät, Wasserverbrauch: ca. 30 l/h <b>Handelsname:</b> Gregomatic-Vakuum-Waschautomat	schonend, keine Luft- und Wasserbelastung	nur anwendbar bei rel. glatten Flächen, geringer Wassereintrag

Zur Überprüfung der Wirkungsweise, Einstellung der jeweiligen Parameter etc. sollte vor jeder Natursteinreinigung zur Entfernung von Bewuchs eine Musterfläche angelegt werden. Bezüglich der Entsorgung sind die jeweils örtlich gültigen Regeln für Auffangen der Schmutzwasserflotte, des abgetragenen Materials und des Strahlgutes zu beachten.

1.4.3 Farbertfernung

Ziel

Beseitigung von Anstrichen aufgrund von Anstrichschäden, die vielfach auf das Anstrichmaterial zurückzuführen sind (Kapitel 2.4.1, 2.4.2 und 2.4.3), von Graffiti oder zur Erzielung steinsichtiger Oberflächen.

Verfahren (Tabelle 12)

Tabelle 12 ■ Verfahren zur Farbertfernung

Verfahren/Parameter	Wirkungsweise	Anwendungsbereich
1. chemisch		
1.1 Abbeizen	<ul style="list-style-type: none"><li>■ alkalische Abbeizmittel: Verseifen organischer Anteile (NaOH, NH<sub>3</sub>)</li><li>■ lösende Abbeizmittel: Erweichen der Bindemittel durch organische Lösemitel, CKW-haltig bzw. biologisch abbaubar</li><li>■ Säuren: Auflösen der Bindemittel</li></ul>	Dispersions- oder dispersionsgebundene Farben, Ölfarben – nicht wirksam bei anorganisch gebundenen Farben (Silikatfarben), Abbeizer auf Säurebasis für kalkgebundene Farben, Gefahr der Säureeinwirkung auf Untergrund
2. mechanisch		
2.1 steinmetzmäßiges Abarbeiten	Abarbeiten von Farbschichten mit Meißel u. ä. Steinmetzwerkzeugen	bei restauratorischen Maßnahmen, zeitaufwendig, Substanzverlust
2.2 Abschleifen	Abschleifen von Hand mit Schleifstein oder mit Schleifmaschine, trocken	Substanzverlust
Fortsetzung auf S. 98 ➔		

Tabelle 12 ■ Fortsetzung

Verfahren/Parameter	Wirkungsweise	Anwendungsbereich
<b>2.3 Wasserstrahlen mit Druckluft und Feinststrahlmittel</b> Parameter je nach Verfahrenstyp unterschiedlich, Druck: 0,5–1,5 bar, Strahlmittel: variabel, 5–500 mm z. T. Verwirbelung von Strahlmittel an der Düse, geringer Wasserverbrauch, z. T. nur zur Bindung des Strahlstaubes <b>Handelsnamen:</b> Jos, Nebelstrahlen	mechanischer Schmutzabtrag, Abspülen durch Wasser	schonend, geringer Wassereintrag, geringer Druck
<b>2.4 Druckstrahlen mit feinem Strahlmittel</b> Druck: 0,2–1,5 bar, Strahlmittel: variabel, Ø 10–100 µm, z. T. Verwirbelung von Strahlmittel in der Düse, Absaugen des Strahlguts mittels Unterdruck reduziert die Umgebungsbelastung <b>Handelsnamen:</b> Puderstrahlen, Mikrotrockenstrahlen	mechanisches Entfernen von Partikeln von der Steinoberfläche	schonend, kein Wassereintrag, auch für feinste restauratorische Freilegungen verwendbar

Ein spezieller Anwendungsbereich ist die Graffiti-Entfernung, die in Kombination mit einer wasserdampfdiffusionsfähigen Schutzbeschichtung die Entfernung zukünftiger Graffiti-Aufträge wesentlich erleichtert [91]. Es werden je nach Beständigkeit temporäre, semipermanente und permanente Systeme unterschieden (Tabelle 13). Bei der Systemauswahl ist der Zustand des Untergrundes sowie die Wasserdampfdurchlässigkeit und Reinigungstechnik des Graffiti-Systems zu beachten [92].

Zur Überprüfung der Wirkungsweise des Verfahrens, zur Einstellung der jeweiligen Parameter etc. sollte vor jeder Natursteinreinigung eine Musterfläche angelegt werden. Im WTA-Merkblatt 2-8-04/D BEWERTUNG DER WIRKSAMKEIT VON ANTI-GRAFFITI-SYSTEMEN [94] werden Prüfmethoden dargestellt, die eine Vergleichbarkeit verschiedener Anti-Graffiti-Systeme ermöglichen sollen.

**Tab. 13** ■ Graffitienschutz mit Opfer-, Semipermanent- und Permanentssystemen nach [93]

System Kenn- zeichnung	Opfer-Systeme (temporär)	Semipermanent- systeme	Permanentsysteme
chemische Zusammen- setzung	naturnahe Wachse, Acrylate, Polysaccharide	Polymere, Polymere modifiziert mit Acry- lat, Silicon mod. mit Acrylharz, oligomere Siloxane	1- und 2-komponen- tige Polyurethane, Nanotechnologie (einsetzbar im Denk- malschutz)
Haltbarkeit auf der Fassade	0,5–10 Jahre	5 Jahre	10 Jahre
Eigenschaften	lösemittelfrei, wasserlöslich diffusionsoffen	Einschicht-Systeme (teilweise Ablösung bei Graffiti-Entfernung) Zweischicht-Systeme (Aufbau: beständige Grundierungsschicht, obere Opferschicht)	bedingt lösemittelfrei, nur in Ausnahmefällen diffusionsoffen, Nanotechnologie: lösemittelfrei, diffusionsoffen
		hydrophob	hydrophob, oleophob
	reversibel	teilweise reversibel	irreversibel
Entfernung von Verunreinigun- gen	mit Heißwasser- Hochdruck oder Nie- derdruck-Heißdampf		mit systemabgestimm- tem Reinigungsmittel

Für alle Verfahren zum Entfernen von Anstrichen ist die Entsorgung des abgetragenen Anstrichs und daran anhaftender Verunreinigung zu beachten. Die Entsorgung aller Feststoffe muss getrennt von flüssigen Phasen erfolgen. Die gültigen Vorschriften der jeweiligen kommunalen Verordnungen sind einzuhalten.

#### 1.4.4 Steinaustausch

Steinaustausch bei Schäden an Natursteinmauerwerk kann je nach Schädigung des Gesteins mit ganzen Quadern, Platten oder Vierungen erfolgen.

Für Stellen, an denen Steinaustausch durchzuführen ist, muss zunächst das Material festgelegt werden. Falls derselbe Steinbruch nicht mehr ermittelt werden kann oder die Gesteinseigenschaften für einen Steinaustausch aus demselben Material nicht ratsam sind, müssen Gesteine mit vergleichbaren Eigenschaften gewählt werden. Hinweise liefert z. B. das Deutsche Natur-



stein-Archiv Wunsiedel mit über 5.000 Natursteinmustern, der Bildatlas von Grimm [18] oder die Naturstein-Datenbank des Abraxas-Verlags [95].

Die Gesteinswahl richtet sich in erster Linie nach Gesteinsart, Färbung, Bindemittel (bei Sandsteinen), Struktur und Textur des auszutauschenden Gesteins. Neben der optischen Eignung müssen physikalische Eigenschaften, für die i. d. R. Prüfzeugnisse vorliegen, überprüft werden. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um Prüfung der Druckfestigkeit, Wasseraufnahme und Frostbeständigkeit (Kapitel 1.3.3.2 und 1.3.3.3). Bei Fassadenplatten ist außerdem die Ausbruchkraft am Ankerdornloch maßgebend.

#### 1.4.4.1 Ganze Quader oder Werkstücke

Für den Steinaustausch durch ganze Quader [96] gelten folgende Arbeitsschritte:

- Abstützen, Verstreben der angrenzenden Bauteile oder Quader, falls erforderlich,
- Entnahme des auszutauschenden Steins durch Ausstemmen, evtl. nach Einschneiden der Fugen,
- Anfertigen des Ersatzstücks, das mindestens die Dicke des auszutauschenden Bauteils haben muss,
- Vornässen des Untergrundes, damit kein hoher Wasserentzug durch den Versetzmörtel erfolgt,
- Einsetzen des Ersatzstücks, bei schweren Quadern unter Verwendung von Justierhilfen in Form von Bleiplättchen o. Ä. oder durch Verkeilen,
- Falls erforderlich, Verankern mit Dübeln aus rostfreiem Edelstahl,
- Hohlraumfreies, vollflächiges Versetzen mit Versetzmörtel, der in seinen Eigenschaften an den vorhandenen angepasst ist,
- Ausgießen von verbliebenen Hohlräumen mit dünnflüssiger Mörtelsuspension,
- Verfugen mit einem an den Naturstein angepassten Fugenmörtel (Kapitel 1.4.6); die Festigkeit des Fugenmörtels ist niedriger als die des Versetzmörtels zu wählen,
- ggf. Bearbeiten der Oberfläche vor Ort, um den Austauschquader an die vorhandene Fassade anzupassen.

#### 1.4.4.2 Platten

Der Austausch durch Platten erfolgt im Wesentlichen an oberflächlich geschädigten Steinen, die keine statischen Kräfte aufnehmen müssen (Bild 13).



**Bild 13** ■ Einsatz von Platten am Sockelmauerwerk

Abmessung:

Nach DIN 18332 NATURWERKSTEINARBEITEN [10] gelten Naturwerksteine bis zu einer Dicke von 8 cm als Platten. Für Steinaustausch durch Platten sind jedoch Dicken von 8 bis 10 cm als Minimum anzusetzen. Je nach Material und Plattenformat können Dicken bis 15 cm erforderlich werden.

Für die Arbeitsweise gilt im Wesentlichen Kapitel 1.4.4.1.

Ob eine Befestigung erforderlich ist, hängt von den objektspezifischen Begebenheiten ab. In der Regel empfiehlt sich zur Lastaufnahme eine Verankerung bei mehreren, aneinandergrenzenden Platten.

### 1.4.4.3 Vierungen

Der Ersatz von Teilstücken eines Gesteins erfolgt durch Vierungen [96] (Bild 14).

Arbeitsschritte:

- rechtwinkliges oder schwalbenschwanzförmiges Ausspitzen der Schadstelle, min. 4 cm tief [10],
- Anfertigung einer passgenauen Vierung, i. d. R. ab einer Kantenlänge von 10 cm,
- Vornässen des Untergrundes und Einsetzen der Vierung durch vollflächiges Vermörteln, Fugenbreite max. 1 bis 2 mm, alternativ Verkleben der Vierung mit Epoxidharz,
- falls nicht schon bei der Herstellung der Vierung erfolgt, Bearbeiten der Oberfläche in Anpassung an den restlichen Stein.



**Bild 14** ■ Kapitell mit eingesetzten Vierungen

### 1.4.5 Steingergänzung

#### 1.4.5.1 Restauriermörtel

Durch Steingergänzung mit Restauriermörtel werden kleine Fehlstellen des Werksteins ausgebessert. Sie sollte nur bei Fehlstellen  $< 100 \text{ cm}^2$  angewendet werden [10].

Material:

- mineralisch gebundener Restauriermörtel (Bindemittel aus Zement, Trasszement, hydraulischen Kalken oder Luftkalken bzw. deren Abmischungen),
- kunstharzmodifizierte mineralische Restauriermörtel (Bindemittel vorwiegend aus Zement und max. 10 % der Zementmasse aus Polymeren),
- Reaktionsharzmörtel (Bindemittel vorwiegend Epoxidharz, Methylmethacrylatharz),
- kieselsäureestergebundene Restauriermörtel (Bindemittel aus Kieselsäureethylester mit ca. 20 M.-%  $\text{SiO}_2$ ).

Bei mineralisch gebundenen Mörteln ist der Zementgehalt möglichst niedrig zu halten. Zementgebundene Mörtel haben einen hohen E-Modul, vor allem gegenüber Sandsteinen, der zum Ablösen von Restauriermörtelplomben führt. Andererseits kommt es aufgrund der höheren Verwitterungsresistenz von Zementmörteln vielfach zur reliefartigen Erhebung gegenüber der verwitterten Sandsteinoberfläche. Durch die hohe Alkalität von Zementmörteln wird die Bildung von Salzen begünstigt sowie die Verfärbung im Grenzbe-  
reich durch die Mobilisierung von löslichen Fe-II-Verbindungen. Ausbleichen von Restauriermörtelstellen ist auf nicht lichtechte Pigmente zurückzuführen.

**Kunststoffmodifizierte Mörtel** lassen sich besser verarbeiten und haften besser am Untergrund, können jedoch eine hohe Mörteldichtigkeit, d.h. einen hohen Wasserdampfdiffusionswiderstand besitzen.

**Reaktionsharzmörtel** zeichnen sich gegenüber den mineralischen Mörteln durch größere Festigkeit, meist kleinere E-Moduln, größere hygische und thermische Dehnung und kleinere kapillare Wasseraufnahme aus [97, S. 81 f.].

**KSE-gebundene Mörtel** sind chemisch neutral und weisen in vielen Eigenschaften übereinstimmende Werte mit Sandsteinen auf. Dagegen weichen sie z. B. im Dehnungs- und Schwindverhalten vom Sandstein ab.

Als Restauriermörtel sollten nur werksgemischte Trockenmörtel verwendet werden. Die Einfärbung kann passend zu einer Natursteinprobe im Werk erfolgen.

Das Material sollte die in der Tabelle 14 genannten Eigenschaften haben.

Arbeitsweise [98]:

- Ausspitzen der Schadstelle bis auf den tragfähigen Stein: schwalbenschwanzförmig, zur untergriffigen Verankerung des Mörtels, oder geradlinig,  
Ausspitztiefe: ca. 30 mm [10],  
kunstharzmodifizierte bzw. -gebundene feinkörnige Mörtel können aufgrund der besseren Haftung auch auf null auslaufen,
- Aufräumen des Untergrundes,
- ggf. Vorfestigen des Untergrundes,
- Vornässen des Untergrundes bei mineralischen Mörteln,
- Armierung über 50 mm tiefer oder auskragender Restauriermörtelstellen mit nichtrostendem Stahl oder alkalibeständigem Kunststoff, der mit 2-Komponentenkleber befestigt werden kann,  
ca. 4 cm dicke Überdeckung der Armierung,  
keine Armierung über Fugen,
- ggf. Auftragen einer Haftschrämme aus Restauriermörtel mit erhöhter Wassermenge zur Verbesserung der Haftung,
- bei tieferen Fehlstellen Antragen eines Auffütterungsmörtels bis 20 mm unterhalb Oberkante des Natursteins in erdfeuchter Konsistenz,
- ggf. mehrlagiger Antrag des Restauriermörtels bis 2 bis 3 mm über Steinoberfläche,
- steinmetzmäßige Oberflächenbearbeitung des erhärteten Mörtels,
- ggf. Lasur des Mörtels zum Angleichen an die Umgebung.

**Tabelle 14** ■ Anforderungen an Restauriermörtel, Festmörtel [97, S. 83]

Eigenschaft	Anforderung natursteinbez. Mörtelkennwerte
Biegezugfestigkeit	50–200 % der Biegezugfestigkeit des Natursteins
Druckfestigkeit	20–50 % der Druckfestigkeit des Natursteins
Haftzugfestigkeit	min. 50 % des Natursteins
E-Modul	20–100 % von E-Modul des Natursteins
Wärmedehnungskoeffizient $\alpha_T$	50–150 % von $\alpha_T$ des Natursteins
Wasseraufnahmekoeffizient w	0–100 % von w des Natursteins
Wasserdampfdiffusionswiderstand $\mu$	50–150 % des Natursteins

1.4.5.2 Abformen

Von geschädigten Steinbildwerken können Kopien oder Abgüsse hergestellt werden, um die Originale im Museum zu erhalten.

Arbeitsweise [99]:

- Überstreichen oder aufsprühen von Trennmittel auf das Bildwerk, um ein Verkleben der nachfolgenden Silikonkautschukschicht am Naturstein zu vermeiden,
- Überstreichen des Bildwerks mit mehrere mm dickem Latex oder Silikonkautschuk,
- anschließend Auftragen von Gips zur Herstellung einer Schalung,
- Unterteilen der Schalung in mehrere Teile, die vorher mit verstärkten Randbereichen versehen wurden,
- Abnehmen des Gipses und Verbinden der einzelnen Teile mit Bolzen oder Schrauben,
- Abrollen der Latexform und Einlegen in die Gipsform,
- Ausgießen der Negativform mit Steinerfüllungsmaterial (Kapitel 1.4.5.1),
- Überarbeiten der ausgehärteten Positivform durch Abschleifen von Trennnähten, Blasen, ggf. Anmodellieren fehlender Teile.

1.4.6 Verfugung

Anforderung an Fugen (Tabelle 15):

- Gewährleistung der Tragfähigkeit des Mauerwerks,
- Lastverteilung,
- Witterungsschutz.

**Tabelle 15** ■ Anforderungen an Fugenmörtel (in Anlehnung an [100, S. 1.039])

Kennwert	Anforderung
dynamischer E-Modul	möglichst klein
Haftzugfestigkeit, Haftscherfestigkeit	möglichst hoch, $\geq 0,1 \text{ N/mm}^2$ , < Haftzugfestigkeit des Steins
Druckfestigkeit in der Fuge	angepasst an Naturstein, i. Allg. $\geq 2 \text{ N/mm}^2$
Quell- und Schwindvermögen	möglichst klein, $\leq 2 \text{ mm/m}$
thermische Dehnung	angepasst an Naturstein
Frostbeständigkeit	keine wesentlichen Schäden
Wasserdampfdurchlässigkeit	hoch
Wasserrückhaltevermögen	hoch bei stark saugfähigen Steinen

## Material

Der Fugenmörtel ist sowohl an das Gesteinsmaterial als auch an den dahinterliegenden Mauermörtel anzupassen. Die Druckfestigkeit und der E-Modul des Fugenmörtels sollen nicht höher als die des Steins und Mauermörtels sein [100, S. 1.038].

Für die Planung, Bemessung und Ausführung von Mauerwerk gilt in Deutschland die DIN-Norm 1053-1 [1]. Die europäische Norm DIN EN 998-2 [101] regelt die Herstellung und Verwendung von Mauermörtel. Da in dieser Norm gegenüber der alten DIN 1053-1 [1] einige Eigenschaften nicht enthalten sind, wurden zusätzliche Anforderungen in DIN V 18580 aufgenommen [102], [103].

### 1. Mineralischer Fugenmörtel nach DIN 1053 [1]

**Definition:** Gemisch aus Bindemittel (Kalk, Zement sowie Mischungen), Zuschlag, Wasser und evtl. Zusatzmittel (Zusätze in geringen Mengen, z. B. zur Verbesserung der Haftung, hydrophobierende Zusatzmittel), Zusatzstoffe (Gesteinsmehl, Trass), Pigmente (zum Einfärben)

Je nach Inhaltsstoffen und Mischungsverhältnis werden die Mörtel in verschiedene Mörtelgruppen unterteilt, die sich durch ihre Druckfestigkeit und Haftscherfestigkeit unterscheiden (Tabelle 16). Nach DIN EN 998-2 [101] gibt es keine Anforderung an die Fugendruckfestigkeit des Mörtels, der Mörtel einer bestimmten Mörtelgruppe hat damit eine geringere Tragfähigkeit als nach der bisherigen deutschen Norm. Erfüllt ein Mörtel die Eigenschaften sowohl nach DIN EN 998-2 [101] als auch der deutschen Restnorm DIN V 18580

**Tabelle 16** ■ Mörtelzusammensetzung, Mischungsverhältnisse für Normalmörtel in Raumteilen nach DIN 1053-1 [1] und DIN EN 998-2 [101]

Mörtelgruppe nach DIN 1053	Druckfestigkeitsklasse nach DIN EN 998-2 [101] und DIN V 18580 [102]	Druckfestigkeit [N/mm²]	Luftkalk und Wasserkalk		hydraulischer Kalk	hochhydraulischer Kalk, Putz- und Mauerbinder	Zement	Sand aus natürlichem Gestein
			Kalkteig	Kalkhydrat				
I	M 1	> 1	1	1	1	1		4 3 3 4,5
II	M 2,5	> 2,5	1,5	2	2	1	1 1 1	8 8 8 3
Ila	M 5	> 5		1		2	1 1	6 8
III	M 10	> 10					1	4
IIla	M 20	> 20					1	4 größere Festig- keit durch Auswahl geeigneter Sande

[102], wird er mit dem CE- und dem Ü-Zeichen gekennzeichnet und kann der Mörtelgruppe nach DIN 1053 [1] zugeordnet werden [103 S. 25]. Für Verfugarbeiten an Natursteinmauerwerk sind i. d. R. nur Mörtel der Mörtelgruppen I, II und ggf. Ila nach DIN V 18580 [102] relevant.

- Kalkmörtel (DIN EN 459-1) [104], [105], [106]:  
Für Baukalke gilt DIN EN 459-1 [104]. Danach wird zwischen Weißkalk, Dolomitkalk und hydraulischem Kalk unterschieden. Natürlicher hydrau-

lischer Kalk NHL entsteht durch Brennen von tonhaltigem Kalkstein. Hydraulische Kalke können zusätzlich Calciumhydroxid (Weißkalk) gemischt mit Zementen oder Puzzolanen enthalten. Der in der alten DIN 1060-1 [107] aufgeführte hochhydraulische Kalk wird nach DIN EN 459-1 [104] als hydraulischer Kalk HL5 mit einer 28-Tage-Druckfestigkeit von 5 bis 15 MPa bezeichnet. Hierzu gehören auch die Trasskalke, die oft einen beträchtlichen Anteil an Zement aufweisen und in denen Kalk kein Hauptbestandteil des Bindemittels ist [106].

- **Weißkalkmörtel:** Bezeichnung CL, Indizierung nach Anteil an CaO und MgO
  - **Luftkalkmörtel** (Sumpfkalk und Weißkalk), Abbindung überwiegend mit CO<sub>2</sub>  
 Sumpfkalk = mit Wasser versetzter Branntkalk, der in Sumpfgruben zum vollständigen Ablöschen unter Wasserbedeckung aufbewahrt wird  
 Weißkalk = industriell gefertigter Sumpfkalk mit < 10 % hydraulischen Anteilen
  - **Wasserkalkmörtel**, geringe hydraulische Anteile (z.B. Mergel, Ton-erde)  
 Kalkteig = mit Wasserüberschuss gelöschter Kalk  
 Kalkhydrat = zu trockenem Pulver ohne Wasserüberschuss gelöschter Kalk
  - **hydraulischer Kalk:** Bezeichnung HL, Indizierung nach Druckfestigkeit
    - > 10 %, < 15 % hydraulische Anteile, z.B. Trass, Zement  
 28-Tage-Druckfestigkeit ≥ 2 MPa
    - **hochhydraulischer Kalk:** > 15 % hydraulische Anteile  
 28-Tage-Druckfestigkeit 5 bis 15 MPa
- **Gipsmörtel:** In einem DBU-Forschungsprojekt [108] wurde ein Gipsmörtel als Instandsetzungsmörtel für sulfathaltiges Mauerwerk entwickelt. Anforderungen: E-Modul, Biegezugfestigkeit und Druckfestigkeit angepasst bzw. kleiner als vorhandene Werksteine, geringes Quellen und Schwinden, hohe Wasserresistenz, geringer Gehalt an ausblühfähigen Mineralien [108, S. 39 ff.]

#### Mörtelzusammensetzung:

Bindemittelgehalt:  $\alpha$ - und  $\beta$ -Halbhydrat, Kalkhydrat, Anhydrit (CaSO<sub>4</sub>-haltige Komp. ≥ 70 bis 80 M-%)

Zusatzmittel: Methylcellulose, Weinsäure, Kaliumsulfat

Zuschlag: Kalksteinmehl, Kalksteinbrechsand und Quarzsand

Durch gezielte Steuerung der Mörtelkomponenten und des Wasser-Bindemittel-Verhältnisses können die Anforderungen an den Fugenmörtel eingestellt werden.



- Zementmörtel (DIN EN 197-1 [109], DIN 1164-10 [110]): Zement = hydraulisches Bindemittel, Erhärtung des Zementleims (nach Zugabe von Wasser) sowohl an der Luft als auch unter Wasser; hydraulische Erhärtung vorwiegend durch Hydratation von Calciumsilikaten
- HAZ-Mörtel (Hüttensand-Anhydrit-Zement): Bindemittel aus ca. 85 M.-% Hüttensand, ca. 10 M.-% Anhydrit, ca. 5 M.-% CEM I (Portlandzement)  
**Eigenschaft:** sulfatbeständig, Verwendung bei gipshaltigem Mauerwerk [111]
- Mörtel mit Zusatzstoffen:
  - Trasskalkmörtel (Mischungsverhältnis z.B. Trass : Kalk 1 : 1 bis 1 : 1,5)
  - Trasszementmörtel (Mischungsverhältnis z.B. Trass : Zement 1 : 1,5 bis 1 : 4)
  - Putz- und Mauerbinder (DIN EN 413-1 [112]) = hydraulisches Bindemittel für Putz- und Mauermörtel mit Zement, Gesteinsmehl, Kalkhydrat, Zusätzen

**Zuschlag** [1], [3, S. 649]: Größtkorn ca. 1/3 bis 1/5 der Fugenbreite, möglichst hohlraumfrei, aber nicht zu feine Körnung, Anteil der Feinanteile ( $< 0,063\text{ mm}$ ) möglichst niedrig, nach DIN EN 13139 [113] max. 1,5 bzw. 3 M.-%, in Abhängigkeit von der Körnung, Anteil an Stoffen organischen Ursprungs möglichst niedrig

**Bemerkung:**

- stark alkalisch, Gefahr der Verfärbung durch eisenoxidische Komponenten
- hydraulische Zusätze erhöhen die Festigkeit,
- Eigenschaften von Trass: Bindung von Kalk → Reduzierung von Verfärbungen und Kalkausblühungen, spannungsarm abbindend durch langsame Festigkeitsentwicklung, hydraulisch abbindend in Verbindung mit Kalk- oder Zementmörtel

## 2. Kunststoffmodifizierter mineralischer Fugenmörtel [114], [115, S. 192]

**Zusammensetzung:** Kunststoffzugabe i. d. R.  $< 10\text{ M.-%}$  des Bindemittels (z. B. Epoxidharz, Acrylharz), mineralische Bindemittel, Zuschlag- und Füllstoffe

**Eigenschaft:** Erhöhung der Festigkeit und Haftung, Erhöhung des Wasserrückhaltevermögens, Reduzierung der kapillaren Wasseraufnahme und der Wasserdampfdiffusion

**Anwendung:** dünne Fugen, bei denen die erforderliche Festigkeit durch Wasserverlust des Mörtels nicht erreicht wird

### 3. Reaktionsharzmörtel

Bindemittelfunktion wird vollständig von Kunstharzen übernommen, z. B. Epoxidharz-, Polyurethan-, Acrylharzmörtel

**Eigenschaft:** Erhöhung von Druck- und Biegezugfestigkeit, hohe chemische Resistenz

Anwendung bei hoher Witterungsbelastung [115 S. 193-194]

### 4. Blei

**Eigenschaft:** gut verformbar, Einsatz bei stark der Witterung ausgesetzten Fugen, wasserabdichtende Verfüguung von Stahlteilen

**Anwendungsbereich für Bleiwolle:** Instandsetzung von Fehlstellen in Bleifugen, Anschluss von Bleiabdeckungen, Auffütterung von tiefen Bleifugen, die anschließend vergossen werden

**Anwendungsbereich für flüssiges Blei:** Verfugen von wasserbeaufschlagten Bauteilen und Stahleinlassungen

### Arbeitsweise

- **Reinigung der Fassade zur Beurteilung des Fugenzustands**
- **Ausräumen der schadhaften Fugen, bis zum Erreichen festen Mauermörtels**  
 Fugentiefe = min. 20 mm oder Zweifaches der Fugenbreite [3, S. 649] bei Mörtelfugen  
 Fugenbreite = ca. 10 mm  
 nach alten Regeln der Technik [2, S. 54] ca. 2 bis 6 mm bei Quadermauerwerk,  
 bei Mauerwerk aus lagerhaften Bruchsteinen ca. 12 bis 15 mm  
 bei Bleiverguss min. 5 mm  
 bei Verstemmung mit Bleiwolle min. 10 mm [115, S. 199]
- **Herstellen rauer Fugenflanken, um Verbund des Mörtels mit dem Stein zu gewährleisten**  
**Verfahren zum Ausräumen von Fugen:**
  - von Hand mit Hammer und Meißel
  - Einschneiden in Fugenmitte und Entfernen des Fugenmörtels mit leichtem Pressluftwerkzeug
- **Reinigung der Fugen durch Ausblasen mit Druckluft, Fugenflanken sollen frei von losen Teilen und Mörtelresten, Schmutz und Staub sein**
- **Vornässen der Fugenflanken bei mineralischem Fugenmörtel, um die Haftung durch Entzug von Anmachwasser nicht zu beeinträchtigen**
- **Verfugen**
  - händisch: mit Fugeisen

- ▣ maschinell: Verarbeiten mit Spritzmaschine für Trockenmörtel (Torkretieren) oder Nassspritzverfahren (Putzmaschine) → hohe Flächenleistung, aber Verschmutzung der Steinoberfläche, die anschließend gereinigt werden muss, ggf. Schutz der Steinoberfläche durch Lehm- oder Tonschicht, die nach dem Verfugen abgewaschen wird, Feuchtebelastung beim Nassspritzverfahren
- ▣ verbleien

## 1. mineralischer Mörtel [100, S. 1.044 ff.]

- keine Verarbeitung unter +5°C Außenluft- und Mauerwerkstemperatur
- keine übermäßige Verdichtung der Oberfläche durch Einbügeln, Entfernen der Sinterhaut durch Aufrauen, um Haftung zu gewährleisten
- bei Fugentiefe > 20 mm lagenweises Einbringen des Fugenmörtels
- Fugenabschluss bündig zu den Steinkanten, gerade oder als Hohlkehle, um Eindringen von Wasser zu vermeiden
- Aufrauen der Oberfläche, z. B. mit Besen, nach Ansteifen des Fugenmörtels
- kein Überziehen des Mörtels auf angrenzenden Stein oder Verschmutzen der Steinränder
- Nachbehandlung:
- Schutz vor Schlagregen, starker Sonneneinstrahlung und Wind, 7 bis 14 Tage langes Feuchthalten

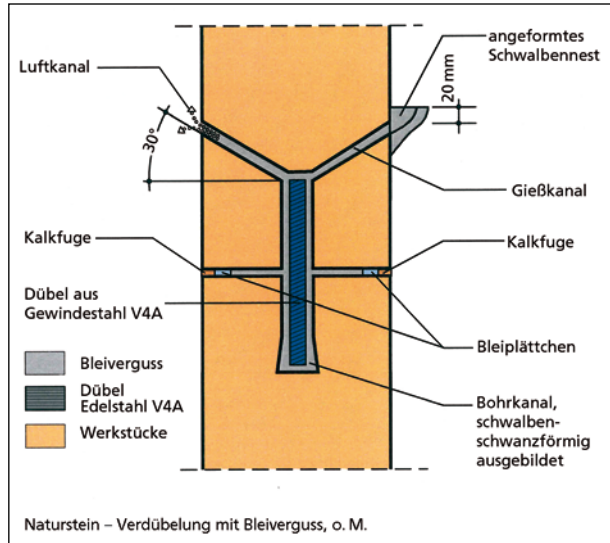
## 2. Verbleien:

Arbeitsweise für den Bleiverguss zweier Werkstücke (Bild 15) [116, S. 168 f.]:

- Einarbeiten von kreuzförmigen Fließbrillen (Fugenkreuz) und Setzen von Abstandsbleien auf die Fugenfläche
- Abdichten der Fuge mit Ton
- Einarbeiten von Entlüftungslöchern sowie einem Vergussloch, über das das geschmolzene Blei eingefüllt wird
- Entfernen der Tonmanschette
- Verstemmen des Bleis mit einem stumpfen Meißel
- Abschneiden des überstehenden Bleis

Arbeitsweise für Bleiverstemmung: [115, S. 198]:

- Einlegen von Bleiwole in die Fuge
- Verstemmen mit stumpfem Eisen



**Bild 15** ■ Verbindung von Werkstücken mit Bleiverguss nach [117, S. 44]

## 1.4.7 Verankerung

### Ziel

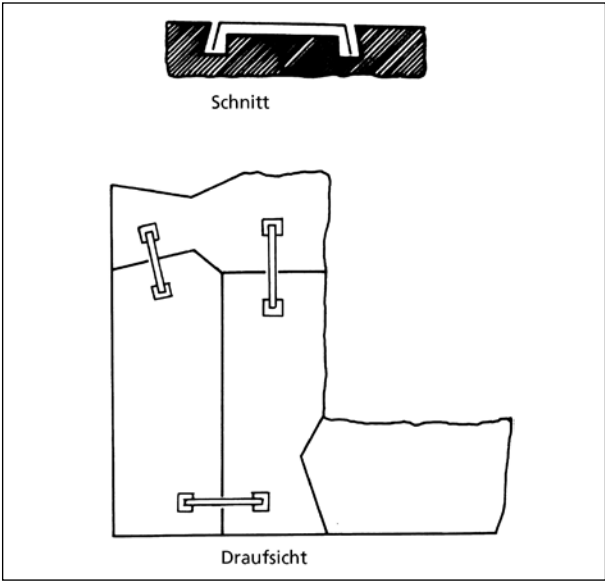
Die Verankerung dient dazu, Steine in ihrer Position am Bauwerk zu sichern. Sie wird angewendet zum:

- Verbinden von Steinquadern,
- Befestigen von Bauteilen,
- Befestigen von vorgehängten Fassaden (Kapitel 2.5.7),
- Befestigung von Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) (Kapitel 1.4.18).

### Verankerungsformen

In antiken Steinkonstruktionen wurden verschiedenartige Steinverbindungen verwendet:

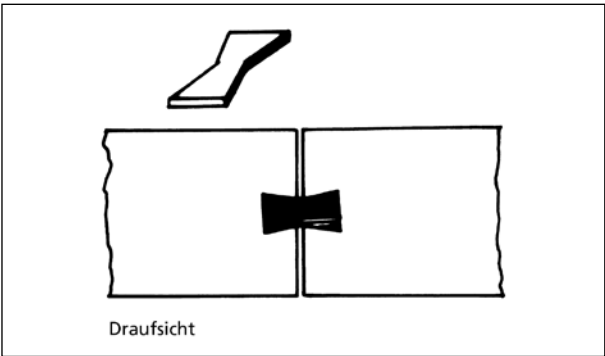
- Eisen-, Holz- oder Steindübel,
- Eisen-, Kupfer- oder Bronzeclammern, eingegossen mit Gips, Schwefel, Asphalt, Blei oder Zement (Bilder 16 und 17),
- Schwalbenschwänze aus Eisen, Holz, Blei, seltener Bronze, Kupfer (Bild 18),
- Ineinandergreifen der Steine durch entsprechende Profilierung der Stoßflächen.



**Bild 16** ■ Verankerung durch Klammern [2, S. 45]



**Bild 17** ■ Neu eingesetzte und verankerte Konsolen



**Bild 18** ■ Verankerung durch Schwalbenschwänze [2, Tafel 10]

## Bleiverankerung

Verbindung von Bauteilen durch bleivergossene Dübel, im Wesentlichen aus rostfreiem Stahl

**Anwendungsbereich:** Verankerung von Bauteilen, z. B. Figuren, Fialen und sonstige Bauzier

**Arbeitsweise:** Die nachfolgenden Abmessungen sind exemplarisch zu verstehen, sie sollen die Zusammenhänge zwischen Dübellänge, Ankerloch und -durchmesser etc. verdeutlichen. Bei kleineren Bauteilen sind diese Maße entsprechend reduziert, die Größenverhältnisse jedoch gleichbleibend.

- Einfräsen oder Ausstemmen eines rillenförmigen Diagonalkreuzes in die zu verankernde Fläche des Bauteils
- Einarbeiten eines 20 cm tiefen Bohrlochs mit 4 cm Durchmesser in der Mitte der zu verankernden Fläche des Bauteils
- quadratische Aufweitung des Bohrlochs, an der unteren Seite schwalbenschwanzförmig auf 5 bis 6 cm Kantenlänge
- Einsetzen des rostfreien Stahldübels (Querschnitt 2 cm × 2 cm, Länge 36 cm), der mit einer Tonmanschette positioniert wird
- Eingießen von flüssigem Blei, das den Dübel im Bohrloch festsetzt, durch eine Öffnung in der Tonmanschette
- Abnehmen der Tonmanschette
- Abtrennen des überstehenden Bleis mit Schlageisen bzw. Einstemmen in das Dübelloch
- vor dem Verankern mit dem unteren Bauteil Vorbereiten der Fläche zur Aufnahme des Dübels: Eintiefung eines Bohrlochs und einer kreuzförmigen Rille wie vor
- Festlegen der Fuge mit bleiernen Abstandshaltern, die auf die Oberfläche des unteren Steins in Dicke der späteren Fuge aufgelegt werden
- Versetzen des mit einem Dübel versehenen Steins auf den darunterliegenden Stein
- Ummanteln der Fuge mit einer Tonmanschette, die für den Bleiverguss mit drei Luftlöchern und einer Einfüllöffnung versehen wird
- Eingießen von Blei, Abnehmen der Tonmanschette, Verstemmen der Fuge, Abtrennen des überstehenden Bleis (Kapitel 1.4.6)

Die Wirkung der Bleiverankerung beruht auf der unterschiedlichen Wärme-dehnung und Wärmeleitfähigkeit der verschiedenen Materialien. Das heiße Blei kühlt sich im Vergleich zum Stahldübel schneller ab. Bei der Kontraktion des Dübels wird eine beträchtliche Vorspannung, d. h. eine Zugspannung der zu verbindenden Bauteile erzeugt.

Der Nachteil einer Bleiverankerung liegt in der Undurchlässigkeit der Bleifuge gegenüber Wasserdampf.

## Verbinden von Bauteilen durch Klammern

Anwendungsbereich: Sichern von gerissenen oder verschobenen Bauteilen  
Arbeitsweise:

- Ausspitzen des Steins auf ca. 4 cm Tiefe zur Aufnahme der Klammer
- Einsetzen einer an beiden Enden umgebogenen Klammer aus rostfreiem Stahl mittels Verfugmörtel oder 2-Komponenten-Steinkleber
- ggf. Auftragen von ca. 4 cm dickem Restauriermörtel zum Verdecken der Klammer [10]

### 1.4.8 Trockenlegung

#### 1.4.8.1 Horizontalabdichtung

Bei der Horizontalabdichtung handelt es sich um die Unterbindung aufsteigender Feuchtigkeit durch Einbau von Sperrschichten. Je nach Aufbau des Mauerwerks, Durchfeuchtungsgrad und Salzkonzentration können unterschiedliche Verfahren eingesetzt werden. Die verschiedenen Verfahrenstechniken für mechanische Horizontalsperren sind im WTA-Merkblatt 4-7-02/D [118] aufgeführt.

## 1. Mauertrennverfahren

Verfahren:

- Aufsägen des Mauerwerks mit Kreis-, Schwert- und Seilzugsägen oder Öffnen des Mauerwerks und abschnittsweises Ersetzen von Mauerwerksteilen
- Einsetzen von Sperrschichten aus Kunststoff- oder Glasfaserplatten, Metallfolien oder -platten, Bitumenbahnen bzw. bitumenbeschichtete Metallbahnen sowie organische und/oder anorganische Vergussmassen

Anwendungsgrenzen der Verfahren in Abhängigkeit von der Mauerwerksdicke:

- einseitige Bearbeitung:  
Kreissäge: max. 0,4 bis 0,5 m Mauerdicke  
Schwert- oder Kettensäge: 1,30 m
- zweiseitige Bearbeitung:  
Verfahren nach Kunz (beidseitig ausgeführte schräge Mauerschnitte, die vergossen werden): max. 0,8 m Mauerdicke

Einschränkungen:

- Zur Verringerung von Erschütterungen soll der Schnitt möglichst in einer Fuge verlaufen, bei unregelmäßigem Mauerwerksaufbau werden also ein größerer Aufwand und erhöhte Sorgfalt erforderlich

- Nachfallgefahr bei zweischaligem Mauerwerk, das vorher verpresst werden muss
- Einbringen von Kühlwasser in das Mauerwerk bei Seilsäge- und Kreisägeverfahren
- Verfahren nicht möglich bei statischer Instabilität
- Breite des Arbeitsraumes: abhängig von dem gewählten Sägeverfahren
- Entsprechend den statischen Gegebenheiten werden nur Abschnitte von max. 1,50 bis 2,00 m Länge durchtrennt, die dann mit der Abspernung versehen und wieder kraftschlüssig verkeilt und verpresst werden müssen. Erst danach ist das Weiterarbeiten möglich.

## 2. Unterfangung des Mauerwerks

**Verfahren:** Unterfangung des Fundaments mit einem wasserdichten Beton

**Anwendung:** aufwendiges Verfahren, kann gleichzeitig als statische Sicherung dienen

## 3. Einrammen von Edelstahlblechen

**Verfahren:** geriffelte Edelstahlbleche werden mit einer pneumatischen Ramme in die Lagerfuge getrieben

**Einschränkungen:**

- nur bei durchlaufenden Lagerfugen einsetzbar, andernfalls muss vor dem Einbauen der Bleche ein Sägeschnitt hergestellt werden
- Korrosionsgefahr der Metallplatte durch Hitzeentwicklung beim Einbau

**Mauerdicke:** max. 1 m

**Breite des Arbeitsraumes:** min. 2 m

## 4. Kernbohrverfahren

**Verfahren:** Erstellung einer Sperrebene durch überlappende Kernbohrungen über die gesamte Mauertiefe, die mit Dichtmörtel verfüllt werden.

**Einschränkung:** Dichtmörtel muss schwindfrei und verträglich mit Baustoffen des Mauerwerks sein.

## 5. Injektionsverfahren [46, S. 81 ff.], [119], [120], (Tabelle 17)

**Verfahren:**

- Herstellen einer kapillarbrechenden Schicht durch Injektion mit Lösungen, die das Porennetz verstopfen oder hydrophobieren; bei hohem Durch-



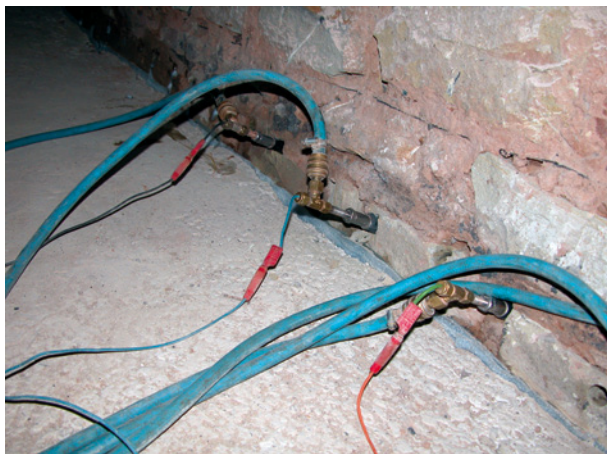
**Tabelle 17** ■ Bewertung der einzelnen Injektionsverfahren [46, S. 94 f.],  
WTA-Merkblatt 4-4-04 [120]

Verfahren	Besonderheit	Anwendungsbereich
drucklose Injektion	<ul style="list-style-type: none"><li>■ Einbringen des Injektionsmittels in das Bohrloch mit Gießkanne oder Flasche</li><li>■ Wegfließen muss durch vorbereitende Maßnahme verhindert werden</li></ul>	Durchfeuchtungsgrad muss < 60 % sein
Druckinjektion	<p>Einbringen des Injektionsmittels in das Bohrloch mit Druck über Packer</p> <p>Verteilung und Penetration des Injektionsmittels erfolgen unter Druck</p> <ul style="list-style-type: none"><li>■ Druck: &lt; 10 bar</li><li>■ Wegfließen muss durch vorbereitende Maßnahme verhindert werden</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>■ Durchfeuchtungsgrad kann &gt; 60 % sein</li><li>■ Anwendung auch bei kapillargesättigtem Mauerwerk</li><li>■ nicht einsetzbar im Druckwasserbereich</li></ul>
Impulsverfahren	<ul style="list-style-type: none"><li>■ elektronische Steuerung der Injektionsmittelzufuhr</li><li>■ gleichmäßige Verteilung über perforierte Infusionsrohre</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>■ anwendbar in Kombination mit Silicon-Mikroemulsion (SMK)</li><li>■ Anwendung auch bei Hohlräumen, Klüften ohne vorbereitende Verfüllung</li></ul>
Mehrstufen-Verfahren	<ul style="list-style-type: none"><li>■ anwendbar auch bei hohem Durchfeuchtungsgrad</li><li>■ nur Kombination von Stufe 1 + 2 oder 2 + 3</li><li>■ 1. Vorinjektion mit einer Mikrozementsuspension bei Hohlräumen</li><li>■ 2. Injektion des Wirkstoffs SMK</li><li>■ 3. bei hohem Durchfeuchtungsgrad oder Luftfeuchte kann alkalischer Aktivator injiziert werden</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>■ hoher technischer Aufbau</li><li>■ Verteilung und Penetration des Injektionsmittels können durch Alkalität der Vorinjektion eingeschränkt werden</li></ul>
Paraffin-Verfahren	Vortrocknung des Mauerwerks zur besseren Injektionsmittelaufnahme und -verteilung	Aufheizung des Mauerwerks erforderlich, dadurch kann Bausubstanz geschädigt werden

feuchtungsgrad auch mit Vortrocknung durch Heizstäbe zur kurzfristigen Reduzierung des Durchfeuchtungsgrades (Bilder 19 und 20).

- Injektion:
  - ▣ drucklos (Durchfeuchtungsgrad  $< 60\%$ ), niedrige Viskosität der Injektionsstoffe (z.B. Silikonat, Silan, Silicon-Mikroemulsion (SMK), erwärmtes Paraffin)
  - ▣ unter Druck ( $< 1 \text{ MPa} = 10 \text{ bar}$ )
  - ▣ Impulssystem (elektronisch gesteuerte Zufuhr des Injektionsmittels mit variierenden Impulsen über perforierte Rohre, Anwendung auch bei hohlräumigem Mauerwerk mit hohem Durchfeuchtungsgrad)
  - ▣ Mehrstufeninjektion (bei hohem Durchfeuchtungsgrad und Hohlräumen, Vorinjektion mit einer Mikrozementsuspension bei Hohlräumen,

**Bild 19** ■ Heizstäbe in Injektionsbohrungen zur Vortrocknung



**Bild 20** ■ Injektionslöcher, verfüllt mit Imprägniercreme. Das Foto zeigt eine Mauerwand mit mehreren horizontalen Bohrlöchern. Die Löcher sind mit einer hellen, cremefarbenen Substanz (Imprägniercreme) verfüllt. Die Mauer selbst ist hellbraun und zeigt einige Risse.



nach Einbringen des Wirkstoffs – bevorzugt SMK – kann dieser mit Alkalien aktiviert werden)

- Verschließen der Injektionslöcher mit Mörtel

**Anordnung der Bohrlöcher:** ein- oder zweireihig mit versetzt angeordneten Bohrlöchern

**Bohrlochdurchmesser:** 15 bis 25 mm

**Bohrlochachse:** Neigung bis 20° nach unten

**Abstand der Bohrlöcher:** ca. 10 bis 12,5 cm

**Injektionsmittel:** Nach WTA-Merkblatt 4-4-04 [120] zertifizierte Injektionsstoffe eignen sich nach Herstellerangabe für Durchfeuchtungsgrade bis 60, 80 oder 95 %. Damit können geeignete Mittel für eine entsprechende Feuchtebelastung eingeordnet werden.

- Alkalisilikate (Wasserglas)  
$$\text{K}_2\text{SiO}_3 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{SiO}_{2\text{aq}} + \text{K}_2\text{CO}_3$$

K-Wasserglas                      Kieselgel      K-Carbonat
- Alkalimethylsiliconate  
$$\text{K-Methylsiliconat} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Polymethylkieselsäure} + \text{K-Carbonat}$$
- Kombinationsprodukte aus Alkalisilikat + Alkalimethylsiliconat
- Hydrophobierungsmittel wie Silane oder Siloxane, mit organischen Lösemitteln
- Alkalipropylsiliconat
- lösemittelfreie Silicon-Mikroemulsionen (SMK), frei von organischen Lösemitteln, auch als Imprägniercreme verwendet
- organische Harze, z. B. Polyurethan
- Acrylatgele zur Baukörper- oder Schleierinjektion
- Paraffine
- Mikrozementsuspensionen

### Charakteristik und Einschränkung der einzelnen Injektionsmittel

Wassergläser:

- Bildung von wasserlöslichem Alkalicarbonat, das an der Baustoffoberfläche auskristallisiert. Daher nicht anwendbar bei steinsichtigem Natursteinmauerwerk, da innerhalb relativ kurzer Zeit mit verstärkter Verwitterung im Umkreis der Horizontalsperre gerechnet werden muss.
- durch Schrumpfen des Kieselgels Bildung einer Sekundärporosität, die Eindringen von Feuchtigkeit begünstigt. Eine vollständige Austrocknung ist daher mit diesen Materialien nicht zu erzielen.

- nicht anwendbar bei Mauerwerksdicke über 50 cm, da nicht genug  $\text{CO}_2$  aus der Luft zur Reaktion vorhanden.

#### Alkalimethylsiliconate:

- max. Mauerwerksdicke 50 cm und max. 50 % Durchfeuchtungsgrad, da das Präparat mit  $\text{CO}_2$  aus der Luft reagiert
- bei Hydrophobierungen mit organischen Lösemitteln Ablüftung erforderlich, sofern in geschlossenen Räumen gearbeitet wird
- Bildung unerwünschter Salze

#### Silan, Siloxan/Injektionscreme aus Silan-Siloxan-Emulsion:

- hydrophobierend
- besonders geeignet bei hohlräumigem Mauerwerk mit geringem Durchfeuchtungsgrad < 50 % [121]

#### Silicon-Mikroemulsionen (SMK) [122]:

- in Wasser emulgierbares Silikonharzkonzentrat mit guter Wirksamkeit, da wässrige Emulsion und sehr kleine Teilchengröße die Verteilung im Mauerwerk begünstigt
- meist im Druckverfahren angewendet
- Bei hohem Durchfeuchtungsgrad (> 60 %) oder nicht alkalischem Mauerwerk kann nach 1 bis 2 Tagen ein Aktivator (Kalkhydratwasser) zur Reaktionsbeschleunigung injiziert werden.
- Zur Verbesserung der kapillaren Aufnahme der SMK in Mauerwerk mit hohem Durchfeuchtungsgrad ist auch die Vorheizung des Mauerwerks mit Heizstäben möglich.
- Mehrstufeninjektion: Kombination einer SMK-Injektion mit vorhergehender Verpressung einer hochsulfatbeständigen Bohrlochschrämme zur Verschließung von Hohlräumen und Klüften, Injektion eines Aktivators bei hohem Durchfeuchtungsgrad, hohe Wirksamkeit

#### Organische Harze oder Gele:

- Injektionsstoffe müssen feuchteverträglich sein [123].
- Anwendung als Acrylatgel zur Herstellung eines Dichtschleiers im gesamten Mauerwerksquerschnitt [124]
- Umweltverträglichkeit bei Kontakt mit Grundwasser erforderlich

#### Paraffin:

- Aufheizung des Mauerwerks auf 60 bis 80 °C, um geschmolzenes Paraffin einzubringen. Gegebenenfalls Bauwerksschäden durch Aufheizung (unterschiedliche thermische Dehnung). Gegebenenfalls Abbau durch Mikroorganismen [119].

Mikrozementsuspension:

- Feinstzement zur Hohlraumverfüllung, auch bei Mehrstufeninjektion in Kombination mit Alkalisilikat/Alkalimethylsilikonat bzw. Silicon-Mikroemulsion verwendet

## 6. Elektrophysikalische Verfahren [46, S. 95 ff.], [119], [125], [126]

Bei den elektrophysikalischen Verfahren wird versucht, die Potenzialdifferenz, die durch das Durchströmen von Flüssigkeit im Mauerwerk auftritt, zur Entfeuchtung zu nutzen. Der Aufbau eines elektronischen Feldes zur Beeinflussung der Fließrichtung der aufsteigenden kapillaren Feuchtigkeit kann aktiv durch Anlegen einer Spannung an Elektroden im Mauerwerk erreicht werden. Bei passiven Verfahren soll die Potenzialdifferenz nicht durch Fremdspannung, sondern durch unterschiedliche Elektrodenmaterialien gebildet werden. In einigen Verfahren soll der Effekt durch Wellen erreicht werden. Die Verfahren entsprechen nicht den allgemein anerkannten Regeln der Technik und sind in der Fachwelt umstritten.

**Passive Elektroosmose:** Kurzschließen oder Erdung des Mauerwerks oder Spannungsaufbau durch Anbringen von unterschiedlichen Elektroden, die kurzgeschlossen werden (Batterieprinzip). Kein Anlegen von Fremdstrom.

**Galvanische Methoden:** Erzeugung eines galvanischen Elementes durch Einbau von zwei Elektrodenebenen. Dessen Potenzial soll das Mauerwerkspotenzial überlagern.

**Ladungskompensationsverfahren:** Zerstörung des mauereigenen elektrischen Feldes durch Einbau von Elektroden, die als Dipol fungieren. Kein vertikaler Wassertransport mehr oberhalb der Mitte des Dipols.

**Aktive Elektroosmose:** Entsalzung und Trocknung von Mauerwerk durch Anlegen einer Gleichstromspannung von 1 bis 60V, die dem Strömungspotenzial durch Wassertransport in einer Kapillare entgegengerichtet ist. Die benötigte Spannung ist abhängig von dem in der elektrischen Doppelschicht an der Kapillarwand ausgebildeten Zeta-Potenzial, mit dem die Stärke der Ladungstrennung angegeben wird. Gestein und Mörtel müssen das gleiche Zeta-Potenzial aufweisen.

**Einschränkungen:**

- Korrosion der Elektroden
- sehr geringer Spannungsaufbau zwischen Elektroden eines galvanischen Elementes (ca. 1 V)
- Kurzschließen oder Erden basiert auf dem Prinzip, das Potenzial als Wirkung, jedoch nicht die Wasserströmung als Ursache zu kompensieren [127, S. 13]

- Beeinflussung durch Salzgehalt des Mauerwerks
- hohe Spannungen erforderlich, um Kapillarkraft des Wassers entgegenzuwirken
- Verringerung des Zeta-Potenzials mit zunehmender Versalzung
- nicht anwendbar bei Kalksteinen
- nicht anwendbar bei metallischen Teilen zwischen Anode und Kathode
- nicht anwendbar unter der Erdoberfläche bei seitlich eindringendem Wasser

## 7. Weitere Verfahren

»Zauberkästchen«: Auf elektrodenlose elektrophysikalische, »magnetokinetische« und andere Verfahren, die nicht den allgemein anerkannten Regeln der Technik entsprechen, wird hier nicht näher eingegangen. Dazu wird auf einschlägige weiterführende Literatur verwiesen, z. B. [128].

**Entlüftungsröhrchen (Knapen'sche Mauerlunge)** [127, S. 100 f.]: Mit Kalkmörtel in die Mauer eingesetzte Ton- oder Kunststoffröhrchen nehmen Feuchtigkeit auf, die nach Verdunstung im Röhrchen nach unten als schwere feuchte Luft abfließen soll. Funktionsfähigkeit höchst fraglich (siehe Bild 39, Kapitel 2.1.4.1).

### 1.4.8.2 Vertikalabdichtung

Die Abdichtungsmaßnahmen mit bituminösen Werkstoffen, Kunststoff oder Metall sind in DIN 18195 [129], [130] geregelt. In den Stoffteil der DIN wurden Abdichtungen mit mineralischen Materialien und kunststoffmodifizierten Bitumendickbeschichtungen (KMB) neu aufgenommen [131]. Das WTA-Merkblatt 4-6-05/D NACHTRÄGLICHES ABDICHTEN ERDBERÜHRTER BAUTEILE [123] behandelt sowohl Abdichtungen nach DIN 18195 [129], [130] als auch Injektionen für flächige und partielle Abdichtungen (Tabelle 18).

**Tabelle 18** ■ Lastfälle und Abdichtungsmaßnahmen in Anlehnung an [132, Tabelle 1]

Bauteil	Bodenart	Dränung	Lastfall/ DIN-Norm	Abdichtung
erdberührte Wände und Bodenplatten oberhalb des Bemessungswasserstandes	stark durchlässiger Boden ( $k > 10^{-4} \text{ m/s}$ )	ohne	Bodenfeuchtigkeit und nichtstauendes Sickerwasser/ DIN 18195-4 [129]	mineralische Dichtungsschlämme, flexible Dichtungsschlämme, KMB, einlagige Dichtungsbahn, Bitumenschweißbahn
	Ausführung der Abdichtung min. 300 mm über Bemessungswasserstand			
	wenig durchlässiger Boden ( $k \leq 10^{-4} \text{ m/s}$ ), Gründungstiefe des Bauwerks bis 3 m unter GOK, UK Kellersohle min. 300 mm über Bemessungswasserstand	mit ohne	Aufstauendes Sickerwasser/DIN 18195-6 [130]	mineralische Dichtungsschlämme, KMB, ein-/zweilagige Dichtungsbahnen
erdberührte Wände und Bodenplatten unterhalb des Bemessungswasserstandes			drückendes Wasser/ DIN 18195-T6 [130]	ein-/mehrlagige Dichtungsbahnen

**Mineralische Abdichtung**

**Regelwerk:**

- Regelung von Abdichtungen von Bauteilen in dem Merkblatt RICHTLINIE FÜR DIE PLANUNG UND AUSFÜHRUNG VON ABDICHTUNGEN VON BAUTEILEN MIT MINERALISCHEN DICHUNGSSCHLÄMMEN der Deutschen Bauchemie e. V. [133]
- WTA-Merkblatt 4-6-05 NACHTRÄGLICHES ABDICHTEN ERDBERÜHRTER BAUTEILE [123]

**Anwendungsbereich:**

- Feuchtigkeitsschutz gegen Bodenfeuchte/nichtstauendes Sickerwasser nach DIN 18195-4 [129]
- drückendes Wasser und aufstauendes Sickerwasser nach DIN 18195-6 [130]
- Innenabdichtung
- Vertikalabdichtung im Spritzwasserbereich von Sockeln

Nur auf mineralischem, nicht rissgefährdetem Untergrund anzuwenden

**Bestandteile:** Zement, Zuschläge, hydraulisch abbindende Zusatzstoffe

**Auftrag** [133]: Egalisierung des Untergrundes mit Zementmörtel oder mineralischer Dichtungsschlämme.

Nach Aushärtung erfolgt der Auftrag der mindestens 2 mm dicken Abdichtungsschlämme.

- Mehrere Schichten im Spachtel-, Streich- oder Spritzverfahren.
- Bei drückendem Wasser mindestens 3 Schichten.

Mindestgesamttrockenschichtdicke:

- $\geq 2$  mm bei Bodenfeuchte und nichtstauendem Sickerwasser,
- $\geq 3$  mm bei aufstauendem Sickerwasser und drückendem Wasser.

Einbau von Schutzschichten z. B. aus Kalkzementputz, Zementputz, Polystyrolhartschaumplatten.

## Flexible Dichtungsschlämme

**Richtlinie:** RICHTLINIE FÜR DIE PLANUNG UND AUSFÜHRUNG VON ABDICHTUNGEN ERDBERÜHRTER BAUTEILE MIT FLEXIBLEN DICHTUNGSSCHLÄMMEN der Deutschen Bauchemie e. V. [134]

**Anwendungsbereich:**

- Feuchtigkeitsschutz gegen Bodenfeuchte/nichtstauendes Sickerwasser nach DIN 18195-4 [129]
- nichtdrückendes Wasser, z. B. Balkone, Dachterrassen
- Vertikalabdichtung im Spritzwasserbereich von Sockeln

**Aufbau:**

- Egalisierung des Untergrundes mit Zementmörtel oder -Dichtungsschlämme
- Mehrere Schichten im Spachtel-, Streich- oder Spritzverfahren
- Mindestgesamttrockenschichtdicke:  $\geq 2$  mm bei Bodenfeuchte und nichtstauendem Sickerwasser
- Einbau von Schutzschichten z. B. aus Kalkzementputz, Zementputz, Wärmedämmmaterialien

Ein- und zweikomponentige, elastifizierte Dichtungsschlämme können Risse  $\leq 0,2$  mm [132] überbrücken und werden in risse- und bewegungsgefährdeten Bereichen eingesetzt. Zur Verstärkung der Abdichtung kann abschließend eine organische Beschichtung, z. B. eine Bitumenkautschukemulsion, aufgebracht werden.

**Bestandteile:** Zement, Zuschläge, Kunststoffanteil

## Kunststoffmodifizierte Beschichtungsstoffe auf Basis von Bitumenemulsionen

**Regelwerk:**

- DIN 18195-4 [129]
- DIN 18195-6 [130]



- RICHTLINIE FÜR DIE PLANUNG UND AUSFÜHRUNG VON ABDICHTUNGEN MIT KUNSTSTOFFMODIFIZIERTEN BITUMENDICKBESCHICHTUNGEN (KMB) – ERDBERÜHRTE BAUTEILE der Deutschen Bauchemie e. V. [135]

### Anwendungsbereich:

- Bodenfeuchtigkeit/nichtstauendes Sickerwasser nach DIN 18195-4 [129]  
Bewegungsfugen bis max. 5 mm, langsame oder seltene Bewegung der Fugenflanken sind mit Fugendichtband abzudichten
- Aufstauendes Sickerwasser nach DIN 18195-6 [130]
- in Kombination mit mineralischen oder flexiblen Dichtungsschlämmen als Zwischenabdichtung, als Abdichtung in und unter Wänden sowie als Sockelabdichtung

### Aufbau:

- Egalisierung des Untergrundes mit Zementmörtel, mineralischer Dichtungsschlämme oder Kratzspachtelung mit KMB
- Zur Haftvermittlung ist ein Voranstrich erforderlich (auf Basis von Bitumen-Emulsion, Reaktionsharz, Kunststoffdispersion, silikatisch, Bitumenlösung).
- Auftrag der ein- oder zweikomponentigen Massen im Spachtel- oder Spritzverfahren in min. 2 Arbeitsgängen mit und ohne Verstärkungseinlage  
Mindestgesamttrockenschichtdicke:
  - bei Bodenfeuchtigkeit und nichtstauendem Sickerwasser:  $\geq 3$  mm
  - bei aufstauendem Sickerwasser:  $\geq 4$  mm

Einbau von Schutzschichten z.B. aus Noppenbahnen, min. 25 mm dicken Hartschaumplatten, Perimeterdämmplatten

### Bitumenbahnen

Regelwerk: DIN 18195-4 [129]

Anwendungsbereich: Bodenfeuchtigkeit/nichtstauendes Sickerwasser nach DIN 18195-4 [129]

### Ausführung:

- Auftrag eines kaltflüssigen Voranstrichs
- mindestens einlagiges Aufkleben der Bitumenbahn mit Klebmasse
- Aufbringen von Bitumen-Schweißbahnen im Schweißverfahren
- Vollflächiges Aufkleben von min. einer Lage kaltselbstklebender Bitumen-Dichtungsbahnen (KSK)

Regelwerk: DIN 18195-6 [130]

Anwendungsbereich: drückendes Wasser und aufstauendes Sickerwasser nach DIN 18195-6 [130]

### Ausführung:

- Verkleben von nackten Bitumenbahnen mit Bitumenklebemasse. Anzahl der Lagen ist abhängig von Eintauchtiefe im Grundwasser. Auftrag der Klebemasseschichten im Bürstenstreich- oder Gießverfahren bzw. im Gieß- und Einwalzverfahren. Einpressung der Abdichtung mit min.  $0,01 \text{ MN/m}^2$ , alternativ in Nähe GOK vollflächige Einbettung der Abdichtung. Zulässige Belastung max.  $0,6 \text{ MN/m}^2$ . Auftrag eines Deckaufstrichs auf der Abdichtung.
- Nackte Bitumenbahnen mit Metallbändern: Einbau der Bitumenbahn wie oben, als zweite Bahn wird ein  $0,1 \text{ mm}$  dickes Kupferband oder  $0,05 \text{ mm}$  dickes Edelstahlband mit gefülltem Bitumen im Gieß- und Einwalzverfahren aufgebracht. Einpressung nicht erforderlich. Druckbelastung max.  $1 \text{ MN/m}^2$ , bei 2 Metalllagen  $1,5 \text{ MN/m}^2$ . Äußere Lage muss Bitumenlage sein.
- Bitumenbahnen und/oder Polymerbitumen-Dachdichtungsbahnen: Voranstrich an senkrechten Flächen. Einbau der Bahnen im Gieß-, im Flämm- oder im Gieß- und Einwalzverfahren, Anzahl der Lagen ist abhängig von Eintauchtiefe im Grundwasser. Kombination von Bitumenbahnen mit Gewebeeinlage mit anderem Trägermaterial. Einpressung der Abdichtung nicht erforderlich. Druckbelastung max.  $1 \text{ MN/m}^2$ , bei Glasgewebeeinlagen  $0,8 \text{ MN/m}^2$ . Deckaufstrich aus ungefülltem bzw. gefülltem Bitumen.
- Bitumen-Schweißbahnen: Einsatz nur in Ausnahmefällen, z. B. im Überkopfbereich oder an unterschrittenen Flächen. Einlagen aus Gewebe, Polyester und/oder Kupferbändern. Einbau der Bahnen im Schweißverfahren. Einpressung der Abdichtung nicht erforderlich. Druckbelastung max.  $1 \text{ MN/m}^2$ , bei Glasgewebeeinlagen  $0,8 \text{ MN/m}^2$ .

### Kunststoff- und Elastomer-Dichtungsbahnen

Regelwerk: DIN 18195-4 [129]

Anwendungsbereich: Bodenfeuchtigkeit/nichtstauendes Sickerwasser nach DIN 18195-4 [129]

### Ausführung:

- Auftrag eines kaltflüssigen Voranstrichs vor Verklebung von bitumenverträglichen Bahnen
- Auftrag von Bitumenklebemasse vor der Abdichtung mit Polyisobutylen-Bahnen und Aufklebung der Bahnen im Flämmverfahren
- bitumenverträgliche Kunststoff-Dichtungsbahnen: Einbau mit Bitumenklebemasse, im Flämmverfahren oder lose mit mechanischer Befestigung
- nichtbitumenverträgliche Kunststoff-Dichtungsbahnen: Einbau in loser Verlegung mit mechanischer Befestigung. Kein Kontakt mit Bitumen.

- Elastomer-Bahnen: Einbau mit Bitumenklebemasse oder in loser Verlegung mit mechanischer Befestigung
- Elastomer-Dichtungsbahnen mit Selbstklebeschicht: Auftrag eines kaltflüssigen Voranstrichs. Aufklebung der Bahnen und Verschweißung der Überlappungen

**Regelwerk:** DIN 18195-6 [130]

**Anwendungsbereich:** drückendes Wasser und aufstauendes Sickerwasser nach DIN 18195-6 [130]

**Ausführung:**

- ggf. Auftrag eines Voranstrichs
- vollflächiges Aufkleben einer Lage bitumenverträglicher Kunststoff- oder Elastomer-Dichtungsbahn im Bürstenstreich- oder Flämmverfahren
- Verschweißung der Längs- oder Quernähte

### **Außenabdichtung über Bohrlochinjektion (Flächeninjektion)**

Sofern eine Vertikalabdichtung von außen erforderlich ist, aber das Erdreich nicht aufgegraben werden kann: Herstellen eines Bohrlochrasters über die gesamte Fläche der Kellerwände, mit ca. 6 bis 8 Bohrungen/m<sup>2</sup>, über die injiziert wird. Das Injektionsmaterial bildet eine abdichtende Schicht zwischen Erdreich und Mauerwerk.

**Injektionsmaterial:**

- Polyurethan
- Acrylat

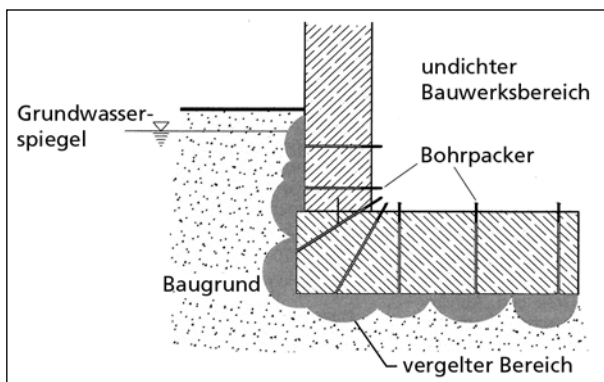
**Nachteil:** keine Kontrolle über das austretende Injektionsmaterial und damit über den Erfolg während der Maßnahme

Bei der **Polyurethan-Injektion** kann mit schnell schäumendem Polyurethan (SPUR) vorgeschäumt werden, zum Abbau des Wasserdrucks sowie zum Füllen von Hohlräumen im Erdreich.

Die **Acrylat-Vergelung** stammt aus der Abdichtung von Tunneln, Brücken und Gewölben (Kapitel 2.5.9). Acrylate werden speziell zur Schleiervergelung eingesetzt [136], (Bild 21).

**Richtlinie:**

- DB Richtlinie 804.61.02 zur Durchführung von Vergelungsmaßnahmen [137]
- WTA-Merkblatt 5-20-09/D GELINJEKTION [138]



**Bild 21** ■ Prinzip der Gelschleierinjektion, schematisch nach [138, S. 6]

#### Ausführung:

- partiell oder vollflächig
- Innerhalb oder außerhalb des Bauteils

#### Injektionsstoffe:

- Acrylatgel, min. 4-komponentig, von DB AG eingesetzt [137]
- Polyurethangel, 1 : 1 bis 1 : 10 mit Wasser oder Kunststoffdispersion gemischt

Produkte müssen Anforderungen des STUVA-Merkblattes [139] oder der DB-Richtlinie [137] entsprechen.

**Materialeigenschaft der Gele:** geringe Viskosität, variable Reaktionszeiten abhängig von Bauwerkssituation, weichelastisch aushärtend, umweltunbedenklich (wasserrechtliche Genehmigung).

Die Vergelung erfolgt von der Innenseite des Bauteils. Voruntersuchungen entscheiden über Größe des Bohrlochrasters, Packerart, Injektionstechnologie (ein- oder mehrstufig), Injektionsdruck, Materialverbrauch etc. Über ein Bohrlochraster wird das Gel von unten nach oben verpresst. Die Kontrolle erfolgt über Materialaustritt an anderen Bohrlöchern.

Eine Vergelung innerhalb des Bauteils bietet sich bei hohlraumreichen Baukörpern, z. B. historischem Mauerwerk, an, bei direkt anstehendem Wasser oder wenn eine außen liegende Abdichtung nicht errichtet werden kann. Nachteilig ist eine nur indirekt mögliche Qualitätskontrolle der Maßnahme.

#### Entwässerungslöcher

Die Abführung von seitlich eindringendem Wasser, z. B. bei Stützmauern, die von dem dahinterliegenden Erdreich durchfeuchtet werden, kann über gering geneigte Bohrlöcher erfolgen. Dies dient jedoch lediglich der Verhinderung von Stauwasser und stellt keine Abdichtungsmaßnahme dar.

### 1.4.8.3 Innenabdichtung

Bei Bauwerksverhältnissen, bei denen ein Aufgraben des Außenmauerwerks nur unter erschwerten Bedingungen oder gar nicht möglich ist, sind auch Innenabdichtungen mit mineralischen Schlämmen möglich. Zur Innenabdichtung dürfen keine elastischen oder plastischen Stoffe verwendet werden, da sie sich durch den Wasserdruck vom Untergrund lösen und Blasen bilden.

### 1.4.8.4 Dränung

Bei Böden mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von  $k \leq 10^{-4} \text{ m/s}$  ist zusätzlich zur Abdichtung eine Dränung anzulegen. Bei  $k > 10^{-4} \text{ m/s}$  gilt diese Forderung nur bei Hanglage bzw. einer wasserstauenden Schicht wenig unterhalb des Fundaments. Durch eine Dränung soll das Entstehen von drückendem Wasser verhindert werden. Dies gilt jedoch nur für bestimmte Fälle, z. B. für periodisches Stauwasser, während über längere Zeiträume drückendes Wasser von einer Dränung nicht mehr sinnvoll aufgenommen werden kann.

Hier ist in DIN 18195-6 [130] keine Dränung als flankierende Maßnahme gefordert.

#### Regelwerk:

Die Anlage von Dränungen ist in DIN 4095 [140] geregelt.

#### Aufbau:

Eine Dränung setzt sich aus einem Dränrohr und einer Dränschicht, bestehend aus Sicker- und Filterschicht, zusammen.

Das **Dränrohr** besteht meist aus einem perforierten Kunststoffrohr mit glatter Fließsohle, das zum Schutz gegen Verschlammung mit Geotextil oder Filtervlies ummantelt ist. Zulässig sind auch glatte oder gewellte Rohre aus Ton, Steinzeug oder Beton. Das Dränrohr ist mit einem Gefälle von 0,5 % zu verlegen. Diese Mindestforderung sollte aber auf 1 bis 2 % erhöht werden, da ein Gefälle von 5 mm pro Meter in der Praxis schlecht einzuhalten ist. Zur Einhaltung des Gefälles eignet sich eine Sohlschicht aus Magerbeton. Das Dränrohr ist entlang der Außenfundamente anzuordnen, darf jedoch nicht tiefer als die Fundamentsohle verlaufen.

Bei Richtungswechsel sind im Abstand von max. 50 m vertikale Spülrohre ( $\varnothing$  min. 300 mm), ggf. auch Kontrollrohre ( $\varnothing$  min. 100 mm) anzuordnen. Der Sammel- oder Übergabeschacht ist mit einem Durchmesser von min. 1.000 mm auszuführen.

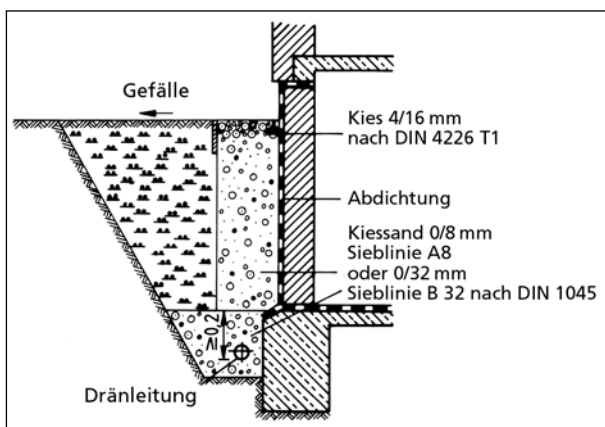
Die **Sickerschicht** kann bei mineralischer Dränschicht aus Kiessand der Körnung 0/8 mm, Sieblinie A8, und Kies bestehen. Vor Wänden beträgt die Sickerschicht min. 0,5 m (Bild 22).

Als Sickerschicht können auch Dränsteine oder Dränplatten eingesetzt werden (Bild 23).

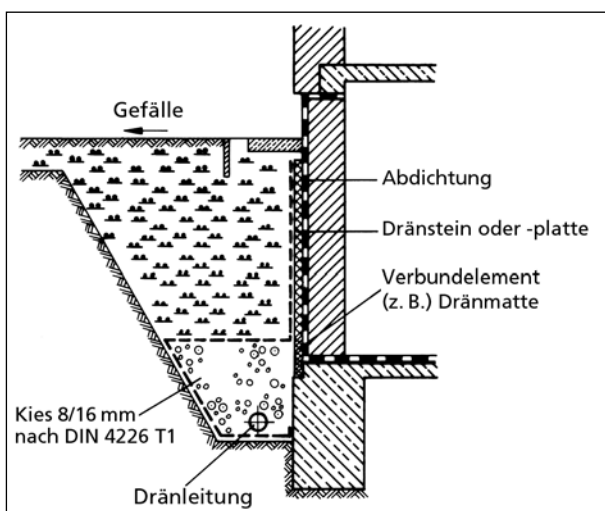
Die **Filterschicht** besteht aus Kiessanden oder gebrochenem Material, Körnung 8/16 mm in einer Schichtdicke von min. 10 cm, besser 20 cm, oder aus Geotextilien.

Dränmatten aus Kunststoff mit einer Vlieslage gelten als Verbundelemente, die die Funktion einer Sicker- und Filterschicht erfüllen.

**Bild 22** ■ Prinzip einer Dränanlage mit mineralischen Schüttungen [140]



**Bild 23** ■ Prinzip einer Dränanlage mit Dränelementen [140]



## 1.4.9 Entsalzung

### Ziel

Entfernen von bauschädlichen, wasserlöslichen Salzen sowohl als Kristallaggregate als auch in gelöster Form aus den Oberflächenzonen von Gestein und Mörtel. Die bauschädlichen Salze bewirken zum einen Gesteins-, Putz- und Anstrichschäden (Kapitel 2.1.4, 2.3.2 und 2.4.1), zum andern beeinträchtigen sie die Wirksamkeit von Festigungs- und Konservierungsmaßnahmen.

### Verfahren

In Abhängigkeit von Abmessungen, Material etc. der behandelten Bauteile werden verschiedene Verfahren eingesetzt [141], [142], [143].

Das Verfahren der Kompressen-Entsalzung wird im WTA-Merkblatt 3-13-01/D ZERSTÖRUNGSFREIES ENTSALZEN VON NATURSTEIN UND ANDEREN PORÖSEN BAUSTOFFEN MITTELS KOMPRESSEN [144] behandelt. Im WTA-Merkblatt 2-10-06/D OPFERPUTZE [145] werden Opferputze wie Kompressenputze beschrieben. Die Wirkungsweise von Sanierputzen erklärt das WTA-Merkblatt 2-9-04/D SANIERPUTZSYSTEME [80].

Eine Entsalzung hängt von vielfältigen Einflussfaktoren wie Salzkonzentration, Porosität und Feuchtegehalt des Baumaterials, Transportmechanismus der gelösten Salze und Umgebungsbedingungen ab [144]. Erfahrungen zeigen eine geringe Wirkungstiefe der Entsalzungsverfahren mit der Gefahr erneuter Salzausblühung.

In Tabelle 19 sind die unterschiedlichen Entsalzungsverfahren angegeben. Eine Bewertung der unterschiedlichen Kompressenmaterialien erfolgt in Tabelle 20.

**Tabelle 19** ■ Verfahren zur Entsalzung von Mauerwerk, u. a. nach WTA-Merkblatt 2-9-04 [80], WTA-Merkblatt 3-13-01 [144], WTA-Merkblatt 2-10-06 [145], [146]

Verfahren	Funktionsweise	Anwendung/ Wirkung	Nachteil
<b>Entsalzung im Wasserbad</b>	Salze wandern in das entionisierte Wasser, periodischer Wasser- austausch erforderlich	bewegliche Objekte oder Ausbau von Steinen	Substanzverlust durch Lösung von Binde- mittel, Quellen von Tonmineralien
<b>Kompressen</b> , dauernass oder trocknend [144] Inhaltsstoffe: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Zelluloseflocken</li> <li>■ Zellulose, Ton, Sand</li> <li>■ Sumpfkalk</li> </ul> siehe auch Ta- belle 20	je nach Salzkonzent- ration ist mehrfacher Kompressenauftrag erforderlich, <b>1. trocknende Kompresse:</b> Verla- gerung der Verduns- tungszone in feucht aufgetragene Kom- presse <b>2. dauernasse Kompresse:</b> Vornäs- sen, nass Auftragen der Kompresse, Nass- halten → Entsalzung durch Diffusion und Konzen- trationsausgleich	besonders guter Wir- kungsgrad bei kleine- ren Objekten  Kombination von dau- ernasser und abtrock- nender Kompresse bei schlecht löslichen Salzen wie Gips	liegen Salze vor, die verschiedene Hydrat- stufen bilden können, besteht die Gefahr von Substanzverlust an der Oberfläche, geringere Wirkung als Wasserbadverfahren
<b>Injektionskom- pressen</b>  Kompressenmaterial: Viskose	Zuführung von Was- ser über Bohrungen, Salzverdunstung in mit Packern befestig- ten Kompressen	Mauerwerk mit en- gem, regelmäßigem Fugensystem oder verputztes Mauer- werk	Eingriff in Steinsubs- tanz durch Bohrun- gen, wenn kein ge- ringer Fugenabstand vorliegt
<b>elektrophysika- lische Verfahren</b> (Kapitel 1.4.8.1)	durch Anlegen von Gleichspannung wan- dern Anionen, z. B. $\text{Cl}^-$ , $\text{SO}_4^{2-}$ zur Anode und Kationen wie $\text{Na}^+$ , $\text{Mg}^{2+}$ zur Ka- thode		Eingriff in Steinsubs- tanz durch Bohrlöcher für Elektroden, Korro- sion von Metallleitun- gen möglich
<b>elektrochemische Kompresse</b>	Kompressenentsal- zung mit Steuerung des Wassertransports durch Anlegen von Gleichspannung	Hoher Wirkungsgrad	Entwicklungsstadium
Fortsetzung auf S. 132 ➔			



Tabelle 19 ■ Fortsetzung

Verfahren	Funktionsweise	Anwendung/ Wirkung	Nachteil
Hydrophobierung	Nitrate sollen durch Hydrophobierung gehindert werden, über das Anmachwasser in den Putz zu wandern, da Salzzumwandlung bei Nitraten nicht wirksam ist.	in Verbindung mit Putzauftrag, zur Vermeidung von Haftungsproblemen ist das Aufbringen eines Spritzbewurfs direkt anschließend an die Hydrophobierung notwendig	Salze verbleiben im Mauerwerk, Feuchtigkeitstransport aus dem Mauerwerk erfolgt langsamer, da nur über Wasserdampfdiffusion, Gefahr der Schalenbildung, Putzablösung
Sanierputz (Kapitel 1.4.12.2) [80]	Aufnahme von Salzen in das Porensystem des Putzes durch seine Porengeometrie und Porenhydrophobie (Unterbrechung des kapillaren Feuchte-transportes)		Durch das Einwandern der Salze wirkt der Sanierputz als sog. Opferputz, der erneuert werden muss, wenn die Aufnahmefähigkeit erschöpft ist.
Entfeuchtungsputz [146, S. 32]	Putz mit hoher Wasserdampfdiffusion, aber fehlender Porenhydrophobie		Salze können nicht vom Putz aufgenommen werden, Gefahr der Abplatzung
Opferputz [145]	hochporöser, nicht hydrophober Putz mit hoher Feuchtedurchlässigkeit, der Salzkristallisation/ Verdunstung in den Opferputz oder an dessen Oberfläche verlagert, um Oberfläche des Untergrundes zu schützen	Je nach Anwendungsziel gibt es verschiedene Opferputztypen, z. B.  ■ OP-I bei Salz- und Feuchtebelastung,  ■ OP-I-Salz bzw. Kompressenputz bei extremer Salz- und Feuchtebelastung	Haltbarkeit: Monate bis wenige Jahre, Bildung von Feuchteflecken und Salzausblühungen auf Putzoberfläche, Verbleib von Zementrückständen auf Maueroberfläche nach Putzabnahme  rel. kurze Haltbarkeit
Kompressenputz [145]	Opferputz mit weitgehend salzunempfindlichem Bindemittel, Porosität > 60 Vol.-%, spez. Porenradienverteilung		Anwendung nur im Innenbereich oder in Kombination mit wasserabweisendem Anstrichsystem

Fortsetzung auf S. 133 ➔

**Tabelle 19** ■ Fortsetzung

Verfahren	Funktionsweise	Anwendung/ Wirkung	Nachteil
<b>Abbürsten</b> von Salzausblühungen		kleine Objektteile ohne merkliche Steinschädigung	temporär, keine Schadensbehebung

**Tabelle 20** ■ Bewertung üblicher Kompressen-Antragsmassen nach WTA-Merkblatt 3-13-01/D [144]

Kompressenzusammensetzung	Vorteile	Nachteile
reine Cellulosefasern unterschiedlicher Länge	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ pH-neutral</li> <li>■ flexibel, weich, anschmiegsam</li> <li>■ hohe Wasseraufnahme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ geringe Standfestigkeit</li> <li>■ Gefahr der Schimmelbildung</li> </ul>
Bentonite, Attapulgit, Kaoline, rein oder mit Cellulose gemischt	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ hohes Wasserrückhaltevermögen</li> <li>■ Kaoline: nahezu neutrale Lösung, kaum Alkalien mobilisierbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ extrem hart bei hohen Tonmineralanteilen</li> <li>■ z.T. erhöhte pH-Werte</li> <li>■ Kaoline: Gefahr von weißen Rückständen auf der Oberfläche</li> </ul>
Tone (ohne nähere Spezifikation)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ hohes Wasserrückhaltevermögen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ extrem hart</li> <li>■ z.T. erhöhte pH-Werte</li> <li>■ Verunreinigungen und löslicher Anteil unkalkulierbar!</li> </ul>
Zeitungspapier bzw. -pulpe, überwiegend Cellulose/Hemicellulose/Lignine aber auch Holzfasern und Füllstoffe	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ hohe Wasseraufnahme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ es können Bleichmittel, Additive und Farben eingeschluppt werden</li> </ul>
Cellulose-Abmischungen mit hohem Sandanteil	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ bei hochwertigen Sanden pH-neutral</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Eigenschaften schwankend</li> <li>■ Verarbeitbarkeit schwierig einstellbar</li> <li>■ geringe Standfestigkeit</li> </ul>
Tonmineral-Cellulose-Sandmischung (versch. kommerzielle Mischungen, überwiegend auf Bentonit-Basis)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ gute Standfestigkeit</li> <li>■ maschinell verarbeitbar</li> <li>■ Festigkeit und Schwinden durch Rezeptur regulierbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ kann je nach Mischung zu fest oder zu schwer werden</li> <li>■ z.T. erhöhte pH-Werte</li> </ul>
Tonmineral-Leichtzuschlagmischung, teilweise mit Cellulose	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ gute Standfestigkeit</li> <li>■ maschinell verarbeitbar</li> <li>■ sehr geringes Schwinden, geringe Dichte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ z.T. erhöhte pH-Werte</li> <li>■ kann je nach Mischung zu fest werden</li> <li>■ Kaoline: Gefahr von weißen Rückständen auf der Oberfläche</li> </ul>

## 1.4.10 Festigung

### Ziel

Festigungsmittel werden bei beginnender oder fortgeschrittener Auflockerung des Gesteinsverbandes eingesetzt, um weiteren Substanzverlust durch Stabilisierung des Korn-Korn-Verbandes zu verhindern.

#### Forderungen an Festigungsmittel:

- Aufbau eines gleichmäßigen Festigungsprofils im Stein
- Vermeiden von zusätzlichen Spannungen durch hygrische oder thermische Dehnung
- Die Wasserdampfdiffusionsfähigkeit des Gesteins muss erhalten bleiben.
- Struktur und Farbe der Gesteinsoberfläche dürfen möglichst nicht verändert werden.
- Das Material muss resistent gegen chemische Einflüsse sein.

Eine zu starke Verhärtung der Oberflächenzone mit der Gefahr der Schalenbildung (Kapitel 2.1.10.3) muss verhindert werden. Die verwitterte Zone muss vollständig von dem Festigungsmittel erfasst werden.

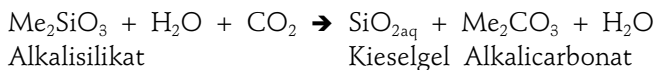
Üblicherweise werden Fassaden nicht vollflächig, sondern nur partiell gefestigt. Dabei werden abhängig vom Schädigungsgrad Bereiche ausgewählt, die allseitig von Fugen umschlossene oder eigenständige Bauteile darstellen.

Zur Optimierung von Auftragsmenge, Applikation und Eindringtiefe sind Vorversuche erforderlich (Kapitel 1.3.3.6).

Die Wirkung von Festigungsmitteln ist abhängig vom Gestein selbst, der Porosität und Porengrößenverteilung des Baustoffs und muss gesteinspezifisch beurteilt werden.

### Material

- Wasserglas  
Bildung von Kieselgel und Alkalicarbonat unter Zufuhr von Kohlendioxid und Wasser



Me = Metallionen, wie z. B. Na, K

**Nachteil:** Bildung von wasserlöslichen Salzen (Alkalicarbonat), geringe Eindringtiefe, Krustenbildung

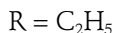
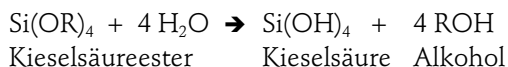
**Anwendung:** spielt heute in der Steinfestigung keine Rolle mehr. Anwendung nur bei erdberührendem Mauerwerk zu Abdichtungszwecken (Kapitel 1.4.8)

#### ■ Kieselsäureethylester KSE

Anwendungsfertige Lösungen in organischen Lösemitteln oder lösemittelfrei, unterschiedliche Wirkstoffkonzentrationen

**Wirkung:**

- Zufuhr von Kieselgel als Bindemittel
- Festigkeitssteigerung mit zunehmender Gelabscheidung (Wirkstoffmenge)



**Einschränkung:**

- bei erhöhter Luftfeuchte oder Baustofffeuchtigkeit erfolgt die Reaktion des Materials sehr schnell, es kommt zu starken Gelabscheidungen an der Oberfläche und zur Ausbildung harter Schalen
- Porenverengung
- Herabsetzung der Wasseraufnahme, in Abhängigkeit von der abgeschiedenen Gelmenge
- bei Überfestigung der Randzone bzw. Festigung des unverwitterten Bereichs Gefahr der übermäßigen Erhöhung der Druckfestigkeit und des E-Moduls
- reduzierte Wirksamkeit bei carbonatischen und tonigen Gesteinen
- Schrumpfrisse, die bei Verfestigung des Gels durch Abgabe von Wasser entstehen → mit der Zeit zunehmende Wasseraufnahme und Festigkeitsabfall
- 2 bis 3 Wochen Reaktionszeit

**Arbeitsweise:**

- Vorversuche zur Ermittlung von Wirkung, Auftragsmenge, Anzahl der Auftragszyklen, Eindringtiefe
- druckloses Auftragen im Flutverfahren, Tauchen bei beweglichen Objekten, Kompressen (Infusionsverfahren)
- beim Flutverfahren: Auftrag von unten nach oben, nass-in-nass-Aufbringen bei mehrfachen Aufträgen
- Schutz der zu behandelnden und frisch behandelten Flächen vor Niederschlag, Wind, Sonne

- ▣ Verarbeitungsbedingungen: Lufttemperatur 10 bis 25 °C, Luftfeuchte 40 bis 70 %
- ▣ Schutz des Verarbeiters vor Lösemitteldämpfen (Atemschutzmaske)
- ▣ Nachwaschen mit Alkohol oder Testbenzin zur Vermeidung von Glanzbildung, Farbveränderung
- **Modifizierung von Kiesel säure ester** [147], [148]
  - ▣ **Elastifizierung:** Zugabe von Weichsegmenten zur Erhöhung der Elastizität und moderaten Festigkeitssteigerung
  - ▣ **Haftvermittler:** Zugabe von Haftvermittlern zur besseren Anbindung an Kalkstein- und Tonoberflächen
- **Kiesel sol**

Kiesel sol ist eine wässrige kolloidale Suspension von amorphem Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ). Das Siliziumdioxid liegt in Form von untereinander unvernetzten, kugelförmigen Einzelpartikeln vor, die an der Oberfläche hydroxyliert sind. Partikelgröße: zwischen 5 und 75 nm.

**Anwendung:** zur Oberflächenfestigung von Stein, zur Festigung von und als Bindemittel für Putz- und Malschichten [21, S. 102]
- **Polyurethan**

Als Festigungsmittel auch in einem BMFT-Projekt erforscht. Spielt heute in der Praxis keine Rolle.
- **Vakuum-Kreislauf-Festigungsverfahren** [149]

Mobiles Verfahren, bei dem Objekte luftdicht in Foliensäcke eingeschweißt werden. Durch Evakuierung wird Unterdruck von 0,1 bis 0,9 bar erzeugt. Das anschließend zugeführte Festigungsmittel (modifiziertes KSE, Acrylat) verteilt sich gleichmäßig in größeren Poren und Rissen.

Volltränkung ist nach vorheriger Trocknung des Objekts möglich.

**Anwendung:** kleinere, transportable Objekte
- **Volltränkung mit Acrylharz** [150], [151]

Tränkung mit Methylester der Methacrylsäure (MMA), der im Gestein zu Polymethylmethacrylat (PMMA) polymerisiert.

Dieses patentierte Verfahren kann nur beim Verfahrenseigner (Consolidas Kunst & Kulturgut GmbH, Alte Ziegelei, 96110 Scheßlitz) durchgeführt werden.

**Anwendung:** bewegliche Objekte, max. 2,5 m × 6,5 m Größe

**Wirkung:**  
Füllung des Porensystems mit PMMA, Schutz vor Feuchte- und Salzbelastung, Reduzierung der Wasseraufnahme gegen null, Gestein nimmt nicht mehr am Feuchtehaushalt teil,  
wesentliche Erhöhung der Druckfestigkeit,  
Konservierung des bestehenden Zustands,  
Volltränkung des Gesteins ist visuell nicht erkennbar.

### Arbeitsweise:

- ▣ Reinigung, evtl. nach Trocknung
- ▣ Lagerung und Vortrocknung bei 20 °C
- ▣ Haupttrocknung bei 25 und 70 °C in speziellen Trocknungskammern bis zur Gewichtskonstanz und Wasseraufnahme < 1 %
- ▣ Besprühen mit aufgeschäumtem Hasenhautleim, um unkontrolliertes Abdampfen von MMA zu verhindern
- ▣ Tränkung mit dünnflüssigem MMA im Autoclaven bei abwechselndem Unter- und Überdruck von -0,75 bis +20 bar
- ▣ Abführung überschüssiger Tränkflüssigkeit und Abdampfen des MMA aus den Oberflächenporen
- ▣ Aushärtung bei 40 bis 70 °C und 20 bar für bis zu 70 h in der Tränkkammer
- ▣ Entfernung des Hautleims mit Hochdruckreiniger (geringer Druck, 40 bis 50 °C)

### Flankierende Maßnahmen [150] :

- ▣ Vorfestigung mit Kieselsäureester, falls erforderlich
- ▣ Sicherung lockerer Teile für den Transport mit Zellstoff- oder Gipsbinden bzw. Kleben mit Epoxidharz
- ▣ anschließender Antrag von Restauriermörtel (Acrylharzbasis) möglich
- ▣ vorherige Rissinjektion sollte mit mineralischem Mörtel oder Epoxidharz erfolgen, Nachbehandlung von Rissen mit Acryl- oder Epoxidharz
- ▣ anschließende Farbtusche mit Acrylfarben möglich

### Einschränkung:

- ▣ Acrylharzvolltränkung ist nach vorangegangener Konservierung oft nicht anwendbar [150]
- ▣ Gips entwässert bei Temperaturen ab 40 °C, daher schrumpft gipshaltiges Material durch die Vortrocknung bei einer Acrylharzvolltränkung, was zu Rissen führt [152].

## 1.4.11 Hydrophobierung

### Ziel

Durch eine Hydrophobierung der Oberfläche von Fassaden soll die kapillare Wasseraufnahmefähigkeit reduziert werden, um die Außenwände vor Niederschlagswasser und darin enthaltenen Schadstoffen zu schützen und die Anlagerung von Schmutzteilchen zu erschweren.

Nach dem WTA-Merkblatt 3-17-10/D HYDROPHOBIERENDE IMPRÄGNIERUNG VON MINERALISCHEN BAUSTOFFEN [153] müssen für Hydrophobierungsmittel folgende **Forderungen** erfüllt sein:

- Reduzierung der kapillaren Wasseraufnahme auf Werte von  $w < 0,1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$
- Ausreichende Wasserdampfdiffusionsfähigkeit muss gewährleistet sein. Diffusionswiderstand des Steins sollte durch die Hydrophobierung nur möglichst wenig erhöht werden [154]
- Hydrophobierungsmittel soll Erscheinungsbild der behandelten Oberfläche nicht verändern, keine Farbvertiefung, klebfrei auf trocknend, keinen Glanz bildend
- Die erforderliche Eindringtiefe ist abhängig vom Wasseraufnahmekoeffizienten  $w$  und der freien Wassersättigung des Gesteins. Nach WTA-Merkblatt 3-17-10/D [153] lässt sich die Auftragsmenge und Benetzungszeit abschätzen.

**Einschränkung:** [155], [156]

- Es muss gewährleistet sein, dass kein Wasser über Risse, defekte Fugen, aufsteigende Bodenfeuchte etc. hinter die hydrophobierte Zone gelangen kann, da durch die Hydrophobierung die Austrocknung stark verlangsamt wird. In einem solchen Fall wäre also eine Wasseranreicherung im Innern des hydrophobierten Steins zu erwarten. Durch die unterschiedliche hygri-sche Dehnung von hydrophobierter Schicht und unbehandeltem Stein können Scherspannungen auftreten, die zur Ablösung der wasserabweisenden Oberflächenzone an der Grenzschicht führen.
- Bei Mauerwerk mit hohen Gehalten an wasserlöslichen, bauschädlichen Salzen besteht die Gefahr der Absprengung der wasserabweisenden Schicht durch das Auskristallisieren der Salze im Innern des Steins.
- Bei hohen Anreicherungen bauschädlicher Salze ist die Wirksamkeit von Hydrophobierungsmitteln in Abhängigkeit von Salzart und Versalzungsgrad eingeschränkt [157].
- Bei der Behandlung von frisch verfugtem Mauerwerk dürfen nur alkalista-bile Präparate eingesetzt werden, da andernfalls im Fugennetz eine was-serabweisende Wirkung nicht entsteht. Der hohe pH-Wert des Mörtels zerstört den Wirkstoff.
- Eine Hydrophobierung kann mit einer geringfügigen Farbtonveränderung, verbunden sein.
- Bei schwach saugenden Gesteinen ( $w < 0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ ) sollte keine Hydrophobierung angewendet werden.
- Keine Verdichtung des oberflächennahen Porenraums durch Schmutz-schichten, Kalksinter etc.

- Zur Vermeidung von Schäden ist auf eine genaue Begutachtung und Instandsetzung des Untergrundes, Auswahl des am besten geeigneten Hydrophobierungsmittels anhand von Vorversuchen und auf die Ausführungstechnik zu achten.

## Material [153]

Nach Stand der Technik werden Silan/Siloxan-Gemische als organische Flüssigkeiten, wasserverdünnbare Emulsionen oder Cremes verwendet. Früher übliche Stoffe wie Methylsilikonate und Siliconharze werden aufgrund ihrer Nachteile nicht mehr eingesetzt. Polyurethane, Acrylatkombinationen werden nur vereinzelt angewendet [156, S. 130].

Die siliciumorganischen Produkte werden großtechnisch aus dem Rohstoff Cl-Silan erzeugt und reagieren auf dem Untergrund zu dem Wirkstoff Siliconharz (Polysiloxan). Je höher der Polymerisationsgrad der Hydrophobierungssubstanz, desto schneller stellt sich die hydrophobierende Wirkung ein. Die Alkalistabilität ist nur bei langen Alkylgruppen gegeben. Das Eindringvermögen ist abhängig von der Molekülgröße, Konzentration und vom verwendeten Lösemittel [158]. Reaktionszeit: min. 2 bis 4 Wochen.

- **Silan:** niedermolekular, hohes Eindringvermögen, Reaktion mit Feuchtigkeit, benötigt Katalysator zur Beschleunigung der Reaktion, hohe Verdunstungsrate, Wirkstoffbildung unter Kondensation und Verdunstung des Lösemittels
- **Siloxan:** oligomer (hohes Eindringvermögen) und polymer (geringeres Eindringvermögen), Wirkstoffbildung unter Kondensation und Verdunstung des Lösemittels
- **Silan/Siloxan-Gemisch, lösemittelhaltig:** gutes Eindringvermögen, anwendbar auch bei Resthydrophobie des Untergrundes
- **Silan/Siloxan-Gemisch, wässrig:** Eindringtiefe niedriger als bei lösemittelhaltigen Produkten, anwendbar bei lösemittelempfindlichen Stoffen, Mobilisierung von Salzen möglich
- **wasserverdünnbare Silicon-Mikroemulsion (SMK) [159]:** Gemische aus Silan und Siloxan, Emulgator und Koemulgator, die in Wasser zu sehr feinteiligen Tröpfchen emulgieren, gutes Eindringvermögen auch bei mäßig feuchten Untergründen, Wirkung je nach Anteil der Komponenten
- **Creme auf Silan-/Siloxan-Basis:** in nur einem Arbeitsgang auftragbar, cremige Konsistenz, hohe Wirkstoffkonzentration, lange Kontaktzeit, Imprägniercreme dringt in Poren des Baustoffs ein und reagiert dort zu Polysiloxan



## Arbeitsweise

Das Verarbeiten mit Pinsel, Quast, Deckenbürste oder Farbrolle sollte mit Ausnahme von Imprägniercreme grundsätzlich unterbleiben, da mit diesen Verfahren keine einheitliche Verteilung der Präparate möglich ist.

- Vorversuche zur Ermittlung von Wirkung, Auftragsmenge, Anzahl der Auftragszyklen, Eindringtiefe
- druckloses Auftragen im Flutverfahren
- Auftrag von unten nach oben, nass in nass
- Verarbeitungstemperatur: 10 bis 25 °C
- Schutz der frisch behandelten Fläche vor Sonne, Wind, Niederschlag
- bei lösemittelhaltigen Produkten Schutz des Verarbeiters vor Dämpfen (Atemschutzmaske)

### 1.4.12 Putz und Schlämme

#### 1.4.12.1 Verarbeitung

##### Aufgabe von Außenputzen und Schlämmen

- Schutz des Mauerwerks vor Durchfeuchtung durch Niederschlag
- ästhetische Gestaltung des Mauerwerks

##### Definition und Eigenschaften von Putzen

Für Putze gilt die Europäische Norm DIN EN 998-1 [77]. Diese Norm ersetzt DIN 18550, Teile 1 bis 4. Da in DIN EN 998-1 [77] keine Anwendungs- und Verarbeitungshinweise gegeben sind, wurde DIN V 18550 PUTZE UND PUTZSYSTEME [65] erarbeitet. Danach werden Putze in Beläge aus Putzmörteln mit mineralischem Bindemittel oder organischem Bindemittel (Kunstharzputze) eingeteilt. Während Putze mit mineralischem Bindemittel sowohl Werkmörtel als auch baustellengemischte Putze sein können, werden Kunstharzputze nur als Werkmörtel geliefert.

An denkmalwerten Bauwerken werden Kunstharzputze nur untergeordnet verwendet, da hier großer Wert auf möglichst originalgetreue Restaurierungen mit Verfahren gelegt wird, die den historischen entsprechen. Ausnahmen bilden z. B. Kunstharzputze auf Wärmedämmverbundsystemen.

Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich auf mineralische Putze und Schlämmen.

Putze nach DIN EN 998-1 [77] werden mit dem CE-Zeichen gekennzeichnet und dürfen nur so verwendet werden.

DIN EN 998-1 [77] unterscheidet Putze nach Anforderungen bzw. Verwendungszweck. Zusätzlich zu Normal-, Leichtputz-, Edelputz- und Einlagenputzmörtel werden Sanierputzmörtel und Wärmedämmputzmörtel aufgeführt. Für Sanierputze, die bei feuchtem und salzhaltigem Mauerwerk Anwendung finden, bestehen zusätzliche umfassende Richtlinien in dem WTA-Merkblatt 2-9-04/D [80] (Kapitel 1.4.12.2). Auch in DIN V 18550 [65] werden Sanier- und Wärmedämmputze behandelt.

Nach DIN EN 998-1 [77] werden Putzmörtel nach ihren Eigenschaften (Druckfestigkeit, kapillare Wasseraufnahme, Wärmeleitfähigkeit) klassifiziert. Die Norm gilt nicht für Mörtel mit Gips als Hauptbindemittel. Aufgrund der Löslichkeit von Gips in Wasser werden Gipsputze nur als Innenputze und nicht als Außenputze verwendet.

Entsprechend den Fugenmörteln (Kapitel 1.4.6) werden in DIN V 18550 [65] auch bei den Putzen verschiedene Putzgruppen unterschieden. Die geringfügigen Unterschiede beider Normen liegen im Wesentlichen in der Zuschlagmenge und z. T. in den Mörtelgruppen (Tabellen 21 und 22).

Nach DIN EN 998-1 [77] werden die Mörtel nicht mehr in Mörtelgruppen eingeteilt. Für die kapillare Wasseraufnahme wurde eine andere Dimension festgelegt. Umrechnungsfaktor für  $c$  in die bisher bekannte Bezeichnung  $w$  [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ ] ist  $\sqrt{60}$  [78].

**Tabelle 21** ■ Putzmörtelgruppen nach DIN V 18550 [65]

Putzmörtelgruppe	Mörtelart
P I	Luftkalkmörtel, Wasserkalkmörtel, Mörtel mit hydraulischem Kalk
P II	Kalkzementmörtel, Mörtel mit hochhydraulischem Kalk oder mit Putz- und Mauerbinder
P III	Zementmörtel mit oder ohne Zusatz von Kalkhydrat
P IV	Gipsmörtel und gipshaltige Mörtel

**Tabelle 22** ■ Klassifizierung der Eigenschaften von Festmörtel nach DIN EN 998-1 Putzmörtel [77]

Eigenschaften	Kategorien	Werte
Druckfestigkeit nach 28 Tagen	CS I	0,4–2,5 N/mm <sup>2</sup>
	CS II	1,5–5,0 N/mm <sup>2</sup>
	CS III	2 3,5–7,5 N/mm <sup>2</sup>
	CS IV	2 ≥ 6 N/mm <sup>2</sup>
kapillare Wasseraufnahme	W 0	nicht festgelegt
	W 1	$c \leq 0,40 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$
	W 2	$c \leq 0,20 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$
Wärmeleitfähigkeit	T 1	$\leq 0,1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
	T 2	$\leq 0,2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

**Definition und Eigenschaften von Schlämmen [160], [161], [162]**

- Dünnschichtiger (1 bis 3 mm [162] oder 3 bis 10 mm [160]) Auftrag von Mörtelmasse oder füllstoffreichem Anstrich
- Struktur des Untergrundes soll erkennbar bleiben
- Schutz- und Verschleißschicht zur Verzögerung der Verwitterung, Haltbarkeit 5 bis 10 bzw. 15 bis 20 Jahre, je nach Schichtdicke
- keine Normen oder Regelwerke
- Schlämmen haben i. d. R. einen hohen Bindemittelanteil, z. B. Bindemittel-Zuschlag-Verhältnis 1 : 1 bis 1 : 2.
- Einstellung: dünnflüssig, d. h. hoher Wassergehalt

**Forderung an Putze und Schlämmen (Tabellen 23 und 24)**

- Verminderung der kapillaren Wasseraufnahme einer Fassade ohne wesentliche Beeinträchtigung der Wasserdampfdurchlässigkeit
- Beständigkeit gegen Frost-Tau-Wechsel
- auf den Untergrund abgestimmte Druckfestigkeit und E-Modul, die in den einzelnen Putzlagen zur Oberfläche hin abnehmen sollen
- Verträglichkeit mit dem Untergrund
- ausreichender Verbund zwischen Putz/Schlämme und Untergrund

**Arbeitsweise**

**Voraussetzung:**

Sauberer, tragfähiger und rissefreier Untergrund,  
intakte Fugen des Untergrundes,  
Schließen von ruhenden Rissen (Kapitel 1.4.15)

- Verarbeitungs- und Untergrundtemperatur > 5 °C
- kein durchnässter Putzgrund

**Tabelle 23** ■ Anforderungen an Putzmörtel [163, S. 1.007] und DIN V 18550 [65]

Kennwerte	Anforderung/Richtwert
E-Modul	möglichst klein
Schwinden und Quellen	möglichst klein
Druckfestigkeit	< Putzgrund
Wasserdampfdurchlässigkeit	möglichst hoch
thermischer Dehnungskoeffizient	$\alpha_T \leq 10 \cdot 10^{-6} / \text{K}$ , angepasst an Putzgrund

**Tabelle 24** ■ Anforderungen an Schlämmen [160, S. 1.030]

Eigenschaft	Anforderung/Richtwert
Luftgehalt des Schlämme-Frischmörtels	$L = 5\text{--}10 \text{ Vol-\%}$
kapillarer Wasseraufnahmekoeffizient	$w < 3\text{--}5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$
Haftzugfestigkeit Schlämme/Untergrund	$\beta_{\text{HZ}} = 0,3\text{--}1,0 \text{ N}/\text{mm}^2$

- Vornässen des Untergrundes
- Auftrag der Schlämme mit Quast oder Pinsel,  
Auftrag des Putzes von Hand: Anwerfen mit Kelle, Abziehen mit Zuglatte oder Brett  
maschineller Auftrag: mit Putzmaschine im Trocken- oder Nassspritzverfahren
- Dicke einer Putzlage < dreifacher Durchmesser des Größtkorns, max. 2 cm Dicke
- ausreichende Standzeit der einzelnen Putzlagen vor dem Weiterarbeiten: 1 Tag/mm Schichtdicke
- Abnahme von Festigkeit und Körnung nach außen
- Auftrag der einzelnen Putzlagen in gleichmäßiger Dicke
- bei mehrlagigem Auftrag ggf. Aufräumen des Putzgrundes zur Verbesserung der Haftung
- kein intensives Glätten des Oberputzes zur Vermeidung von Bindemitelanreicherung
- Schutz des frisch aufgetragenen Putzes vor Regen, Wind, Sonne, um vorzeitigen Entzug des Anmachwassers zu vermeiden

## Putzaufbau

In der Regel folgt auf den Spritzbewurf ein zweilagiger Putz. Je nach Untergrund können zusätzliche Maßnahmen erforderlich werden.

- Spritzbewurf  
**Funktion:** Verbesserung der Haftung, Egalisierung der Saugfähigkeit, bei schwach saugendem Mauerwerk und Sanierputz erfolgt netzförmiger Auftrag des Spritzbewurfs
- Ausgleichsputz  
**Funktion:** Ausgleich von Unebenheiten des Putzgrundes
- Putzauftrag  
**Arbeitsweise:** meist mehrlagiger Auftrag mit Unterputz und Oberputz von Hand oder mit Putzmaschine
- Bewehrung bei rissegefährdetem Untergrund  
**Funktion:** Verteilung der Rissbewegung auf eine größere Fläche → Reduzierung der Gefahr der Rissbildung  
**Material:**  
Gewebe aus mineralischen Fasern  
Gewebe aus Kunststofffasern  
Matten aus punktgeschweißtem, rostfreiem Drahtgitter  
**Arbeitsweise:**  
Gewebe wird in die obere Lage des Unterputzes eingedrückt und dünn mit Putz überzogen. Die Stöße der Bewehrungsgewebe sind 10 cm zu überlappen.  
Die Befestigung von Metallmatten erfolgt mit Armierungsnägeln, die den notwendigen Abstand zum Putzgrund gewährleisten. Die Stöße der Bewehrungsmatten sind 10 cm zu überlappen.
- Putzträger  
**Funktion:** Putzträger dienen zur zusätzlichen Sicherung des Putzes bei herabgesetzter Haftung, z. B. bei schwierigen Putzgründen mit geringer Festigkeit oder unterschiedlichem Saugverhalten (Mischmauerwerk). Sie dürfen keine zusätzlichen Spannungen auf den Putz übertragen.  
**Material:** nach DIN V 18550 [65] metallische Putzträger, Ziegeldrahtgewebe, und Gipskarton- oder Holzwolleleichtbauplatten oder Rohrmatten  
**Einbau:** Überlappung der Stöße um 10 cm (bei metallischen Putzträgern), Befestigung auf dem umgebenden Bauteil oder in genügendem Abstand vom Rand des überspannten Bauteils

#### 1.4.12.2 Sanierputz nach WTA

##### Definition

Ein Sanierputz weist sich durch hohe Porosität und Wasserdampfdurchlässigkeit bei gleichzeitig erheblich verminderter kapillarer Saugfähigkeit aus. Gegebenenfalls in Verbindung mit einem Porengrundputz können Salze, die in den Porenraum wandern, aufgenommen werden. Die Menge der einwan-

dernden Salze ist maßgebend für die ›Lebenserwartung‹ des Sanierputzes, also dem Zeitraum, in dem zumindest in Teilbereichen der gesamte Porenraum mit auskristallisierten Salzen gefüllt ist. Diese Lebensdauer beträgt meist mindestens 5 bis 10 Jahre. Sanierputz sollte i. d. R. durch vertikale und horizontale Abdichtungsmaßnahmen ergänzt werden. In Tabelle 25 sind wichtige Eigenschaften eines Sanierputzes angegeben, der die Qualitätsanforderung Sanierputz-WTA erfüllt.

Alle Sanierputze sind Werk trockenmörtel, daher können hier nur die Verarbeitungsrichtlinien gem. WTA-Richtlinie [80] beschrieben werden, die markenspezifischen Besonderheiten finden keine Berücksichtigung!

In DIN EN 998-1 [77] werden einige Anforderungen an Sanierputze angegeben, der für Sanierputze wichtige Systemgedanke sowie Anwendungsgrenzen fehlen jedoch.

## Arbeitsweise

- Abschlagen des Altputzes bis min. 80 cm über Schadensgrenze
- Auskratzen von Mauerwerksfugen min. 20 mm tief
- Reinigung des Mauerwerks, z. B. mit Stahlbesen

**Tabelle 25** ■ Wichtige Anforderungen an Sanierputz-WTA gemäß WTA-Merkblatt 2-9-04 [80], Tabelle 3

Eigenschaft des <u>Frischmörtels</u>	Forderung für Grundputz	Forderung für Sanierputz	Einheit
Luftgehalt	> 20	> 25	Vol.-%
Eigenschaft des <u>Festmörtels</u>	Forderung für Grundputz	Forderung für Sanierputz	Einheit
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl $\mu$	< 18	< 12	
kapillare Wasseraufnahme $w_{24}$	> 1,0	> 0,3	kg / m <sup>2</sup>
Wassereindringtiefe h	> 5	< 5	mm
Porosität	> 35 (Ausgleichsputz) > 45 (Porengrundputz)	> 40	V.-%
Trockenrohdichte		< 1.400	kg / m <sup>3</sup>
Druckfestigkeit	≥ Sanierputz	1,5–5	N / mm <sup>2</sup>
Verhältnis Druckfestigkeit/ Biegezugfestigkeit	< 3	< 3	

### Auftrag des Sanierputzsystems:

- Spritzbewurf,  $\leq 5$  mm, i. Allg. netzförmig aufgebracht
- Grundputz:
  - zum Ausgleich von Unebenheiten,
  - als ›Salzspeicher‹ bei besonders hoher Untergrundversalzung (Porengrundputz)  $\geq 10$  mm
  - Einsatz von Sanierputz als Grundputz bei max. 40 mm Gesamtdicke der Sanierputzlagen
- Sanierputz: WTA-Merkblatt 3-17-10/D [153]  $\geq 20$  mm, bei mehreren Lagen min. 10 mm/Lage, Gesamtschichtdicke  $\leq 40$  mm

### Deckschichten

Putze oder Anstriche, die die Wasserdampfdurchlässigkeit des Sanierputzes nicht beeinträchtigen

Anstriche/Beschichtungen Innenbereich:  $s_d < 0,2$  m (pro Lage)

Anstriche/Beschichtungen Außenbereich:  $s_d < 0,2$  m (pro Lage)  
 $w < 0,2 \text{ kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$

mineralische Oberputze im Außenbereich:  $w < 0,5 \text{ kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$

Geeignete Anstriche, die die oben aufgeführten Anforderungen erfüllen, stammen daher meist aus den folgenden Gruppen:

- Silikatfarben,
- Dispersionssilikatfarben,
- Siliconharz-Emulsionsfarben,
- Kalkfarben.

Im WTA-Merkblatt werden Kriterien zur Bewertung der Salzbelastung gegeben. Danach sollten entsprechende Putzlagen des Sanierputzsystems aufgetragen werden (Tabellen 26 und 27).

### Anwendungsgrenzen [80]

- Druck-, Stauwasser und Bodenfeuchtigkeit: Sanierputz-WTA ist nur wirksam bei kapillarer und hygroskopischer Feuchtigkeit, nicht bei hydrostatisch einwirkender Feuchtigkeit. Daher auch nicht einsetzbar im erdbehrten Bereich unter GOK.
- Hoher Durchfeuchtungsgrad: nur mit flankierenden Maßnahmen zur Abdichtung bzw. Entfeuchtung
- Durchfeuchtung durch längerfristiges Tauwasser im Sanierputzquerschnitt
- Luftfeuchtigkeit während der Erhärtung  $\geq 65$  %, da Hydrophobierung des Sanierputzes behindert wird.

**Tabelle 26** ■ Mauerwerksschädigende Wirkung verschiedener Salzionen nach WTA-Merkblatt 2-9-04/D [80], Tabelle 5

Salze	Salzgehalte in M-%		
Chloride	< 0,2	0,2–0,5	> 0,5
Nitrate	< 0,1	0,1–0,3	> 0,3
Sulfate	< 0,5	0,5–1,5	> 1,5
Bewertung	Belastung gering	Belastung mittel	Belastung hoch

**Tabelle 27** ■ Maßnahmen durch Sanierputze nach WTA-Merkblatt 2-9-04/D [80], Tabelle 7 in Abhängigkeit vom Versalzungsgrad

Salze	Salzgehalte in M-%	einzelne Schichtdicken [mm]	Anmerkungen
gering	1. Spritzbewurf 2. Sanierputz-WTA	≤ 5 ≥ 20	Spritzbewurf i. d. R. nicht deckend aufbringen, nur volldeckend, wenn der Hersteller es fordert
mittel bis hoch	1. Spritzbewurf 2. Sanierputz-WTA 3. Sanierputz-WTA	≤ 5 10–20 10–20	
	1. Spritzbewurf 2. Porengrundputz-WTA 3. Sanierputz-WTA	≤ 5 ≥ 10 ≥ 15	

### 1.4.12.3 Andere Putzsysteme

Auf feuchte- und salzbelastetem Mauerwerk ist der Einsatz von Sanierputzsystemen-WTA bewährt und Stand der Technik. Alternativ werden vom Markt sogenannte Entfeuchtungsputze und andere Putzsysteme angeboten, deren Funktionsweise fraglich ist und die nicht den Qualitätskriterien von Sanierputzen unterliegen.

### Feuchteregulierungsputz (FRP) [164], [146]

**Merkmal:** hohes Porenvolumen, im Gegensatz zu Sanierputzen-WTA keine hydrophobe Einstellung, abhängig von klimatischen Randbedingungen und raumklimatischen Verhältnissen, keine Merkblätter mit charakteristischen Daten vorhanden, unterschiedliche Wirkungsweise



### Wirkungsweise:

- hohe kapillare Leitfähigkeit, die einen Feuchte- und Salztransport an die Oberfläche ermöglicht, gekoppelt mit hoher Gesamtporosität und hoher kapillarer Wasseraufnahme
- oder: Behinderung des Kapillartransports durch Ausbildung von Makroporen

**Einsatzbereich:** feuchtes Mauerwerk mit geringem Salzgehalt, ausreichende raumseitige Lüftung erforderlich

### Wärmedämmputz (Kapitel 1.4.18.1) [165]

**Merkmal:** Hoher Porenraum und hohe Schichtdicke des Putzes ( $\geq$  ca. 40 mm) zur Feuchteaufnahme und Salzeinlagerung. In Verbindung mit hydrophober Putzbeschichtung wird kapillarer Feuchtetransport unterbrochen. Geringe Reduzierung der Wärmedämmwirkung.

### 1.4.12.4 Festigung

#### Ziel

Erhöhung der Mörtelfestigkeit durch organische und anorganische Festigungsmittel

#### Material

Die Verwendung von Festigungsmitteln ist abhängig vom Einzelfall und der evtl. vorhandenen kunsthistorischen Bedeutung.

- organische Festigungsmittel:  
Epoxidharz, Polyurethan → Vergilbungsgefahr, da nicht UV-stabil, dadurch Entpolymerisierung: Veränderung von Farbtönen, Nährboden für Mikroorganismen  
Methacrylat: langzeitbeständig, auch bei UV-Einfluss
- anorganische Festigungsmittel: Kieselsäureester, dispergiertes Weißkalkhydrat, Kalkmilch, z. T. unter Zugabe von Kasein

### 1.4.12.5 Fixieren gelöster Putzflächen

Durchführung bei kunsthistorisch wertvollen Objekten.

#### Arbeitsweise

- punktuelles Kleben gelöster Putzflächen mit Epoxidharz

- flächiges Hinterfüllen von Schalen und Blasen mit
  - Acrylharz,
  - dispergiertem Weißkalkhydrat: wasserdampfdurchlässig, kapillarfähig, relativ verwitterungsbeständig, alkalisch [166],
- Fixieren von gelösten Putzflächen mit Injektionsmörtel aus
  - Kalkhydrat,
  - dispergiertem Weißkalkhydrat,
  - hydraulischem Bindemittel (z. B. Ledan) [166],
  - Kieselsäureester,
  - Acrylharz.

Das Mischungsverhältnis ist abhängig vom Zustand und Material des Putzes und richtet sich nach den Befunden der Voruntersuchungen und den Erfahrungswerten des Restaurators.

### 1.4.13 Anstrich

#### Ziel

- Schutz der Fassade vor atmosphärischen Einflüssen
- ästhetische Gestaltung einer Fassade

#### Forderung an Anstrichsysteme für mineralische Baustoffe

- geringe kapillare Wasseraufnahme
- geringer Wasserdampfdiffusionswiderstand
- niedrige Trockenspannung
- UV-Beständigkeit
- keine Kreidung
- gute Haftung am Untergrund

#### Materialzusammensetzung

- Bindemittel: organisch, z. B. Leim, Harz, Öl, oder anorganisch, z. B. Kalk, Wasserglas
- Pigmente und Farbstoffe: organisch, z. B. Indigo, oder anorganisch, z. B.  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$
- Füllstoffe: z. B. Kreide, Quarzmehl
- Hilfsstoffe: z. B. hydrophobierende Zusätze
- Lösemittel: Wasser, niedermolekulare Kohlenwasserstoffe

**Spezielle Anstriche:** rissüberbrückende bzw. oberflächlich verfüllende Beschichtungen für kleinere Risse (bis ca. 0,3 mm) mit Zusatz von Fasern und/oder Schlämme

## Anstrichstoffe (nach DIN 18363) [167], [168], [169], [170]:

### ■ Kalkfarben

**Inhaltsstoffe:** Kalk nach DIN EN 459-1 [104],  $\leq 10\%$  kalkbeständige Pigmente

**Bemerkung:** höhere Wasserdampfdurchlässigkeit als Silikatfarben, alkalisch, Wasserabweisung nur durch zusätzliche Imprägnierung oder wasserabweisende Zusatzmittel, keine dunklen Farbtöne, nicht wetterbeständig, da Abbau durch Säure

### ■ Kalk-Weißzementfarbe

**Inhaltsstoffe:** weißer Zement nach DIN EN 197-1 [109], Kalk nach DIN EN 459-1 [104], zementbeständige Pigmente

**Bemerkung:** nicht für gipshaltige Untergründe, keine Volltöne, sorgfältige Nachbehandlung

### ■ Silikatfarben

**Inhaltsstoffe:** Kaliwasserglas (Fixativ), kaliwasserglasbeständige Pigmente

**Bemerkung:** 2-komponentig, nicht für gipshaltige Untergründe, nicht für salzhaltige Untergründe, problematisch bei stark verwitterten oder tonhaltigen Untergründen, stark alkalisch (daher Verfärbung durch Fe-/Mn-haltige Untergründe), geringer Wasserdampfdiffusionswiderstand, Wasserabweisung nur durch zusätzliche Imprägnierung, lasurfähig, matt

### ■ Dispersionssilikatfarben

**Inhaltsstoffe:** Kaliwasserglas (Fixativ), kaliwasserglasbeständige Pigmente, Zusätze von Hydrophobierungsmitteln, max. 5 % organische Anteile

**Bemerkung:** 1-komponentig, wasserabweisend durch Zusatzmittel, haftungsverbessernd durch organische Anteile

### ■ Dispersionsfarben

**Inhaltsstoffe:** Bindemittel aus dispergierten Kunstharzen, die in wässriger Phase polymerisieren, z.B. Vinylacetat und Acrylsäureester, Vinylacetat und Ethylen u. a.

**Bemerkung:** deutlich reduzierte Wasserdampfdurchlässigkeit gegenüber Kalk-, Silikat- und Dispersionssilikatfarben, wasserabweisend, nicht auf frischen Kalkputzen (reduzierte CO<sub>2</sub>-Durchlässigkeit, daher Behinderung der Carbonatisierung des Putzes)

### ■ Siliconharzemulsionsfarben [169]

**Inhaltsstoffe:** Emulsion mit Bindemittel aus 5 % Siliconharz, 5 % Kunstharzdispersion,  $\geq 60\%$  Füllstoffen, Pigmenten, Hilfsstoffen

**Bemerkung:** hydrophob, wasserdampfdurchlässig, chemisch neutral, matt, lasurfähig, Haftung auf Siliconimprägnierungen

## Anstrichaufbau

### ■ Grundierung

#### Aufgabe:

- ▢ Reduzierung und Egalisierung der Saugfähigkeit und Reduzierung der Hinterfeuchtung des Untergrundes
- ▢ Erhöhung der Tragfähigkeit durch Verfestigung des Untergrundes
- ▢ Erhöhung der Anstrichhaftung

#### Material:

- ▢ lösemittelhaltige Grundierung: Kunstharzlösung, in Kombination mit Silanen, Siloxanen oder Siliconharzen oder reine Siliconlösungen, für nachfolgenden Kunstharzanstrich oder bei problematischen Untergründen
- ▢ wässrige Grundierung: Kunstharzdispersion, geringeres Eindringvermögen als bei organischem Lösemittel
- ▢ Silicon-Mikroemulsion: wasserverdünnbar (Kapitel 1.4.11), für nachfolgenden Siliconharzanstrich
- ▢ Wasserglaslösung, wässrig, für nachfolgenden Anstrich aus Silikat- oder Dispersionssilikatfarbe
- ein- oder zweimaliger Deckanstrich

## Arbeitsweise

- Abkleben von Anschlüssen, nicht alkalibeständigen Materialien (z. B. bei Silikatfarben)
- Entfernung von losen Teilen, Reinigung und Entstaubung des Untergrundes
- Auftrag auf tragfähigem Untergrund
- Auftrag auf trockenen Untergrund, bei Kalkfarbe vornässen
- Auftrag durch Streichen oder Rollen
- Einhalten einer Trockenzeit zwischen den Auftragsschichten von min. 12 h bzw. nach Herstellerangabe
- Verarbeitungstemperatur: über 5 °C
- Schutz vor Regen, Wind, Sonne

### 1.4.14 Korrosionsschutz

#### Ziel

Die Instandsetzung von korrodiertem Metall kann durch eine mehrlagige Beschichtung mit korrosionsstabilen Stoffen oder durch eine Passivierung (chemische Reaktion des Eisens mit Bildung von oxidischer Schutzschicht, z. B. Phosphat) erfolgen.

**Anwendung:** Bauteile aus Eisen oder eisenhaltigen Materialien, ggf. auch feuerverzinktem Stahl, z. B. in das Mauerwerk eingelassene Geländer, Windeisen zur Befestigung von Fenstern oder Zieranker

## Arbeitsweise

Nach DIN EN ISO 12944-5 KORROSIONSSCHUTZ VON STAHLBAUTEN DURCH BESCHICHTUNGSSYSTEME [171]

## Entrosten zum Entfernen von Rost und losen Beschichtungen

Die Entrostung kleinerer Teile wird vor Ort manuell durchgeführt. Größere Teile werden i. d. R. ausgebaut und in der Werkstatt behandelt.

- manuell mit Handwerkzeugen, z. B. Drahtbürste, Schleifpapier

**Anwendungsbereich:** kleine Metallteile

**Bemerkung:** Nachreinigung durch Abbürsten, Abblasen

- manuell mit maschinell angetriebenen Werkzeugen, z. B. rotierende Drahtbürsten, Schleifwerkzeuge

**Anwendungsbereich:** kleine Metallteile

**Bemerkung:** Nachreinigung wie vor, größere Flächenleistung

- Verfahren zur Oberflächenvorbereitung:

- Reinigung mit Wasser, Lösemitteln und Chemikalien (chemische Umwandlung, Abbeizen)

- Strahlen (Trocken-, Feucht-, Nassstrahlen)

- Flammstrahlen

**Anwendungsbereich:** größere oder von Hand unzugängliche Teile

**Bemerkung:** bei Durchführung vor Ort ist Schutz angrenzender Teile, Abplanen des Arbeitsgerüsts und ggf. Entsorgung des Strahlmittels erforderlich

## Korrosionsschutzbeschichtung

**Aufbau:** Grundbeschichtung, Deckbeschichtung

**Inhaltsstoffe:** Bindemittel, Pigmente, Füllstoffe, Lösemittel, Zusätze

- Bindemittel: z. B. Alkydharz, Epoxidharzester etc., abhängig vom Verwendungszweck, Beständigkeit
- Pigmente, vor allem Korrosionsschutzpigmente, in Verbindung mit bestimmten Bindemitteln

- für Grundbeschichtungen sind geeignet:

**Bleimennige:** toxikologisch, anwendbar auch bei nicht vollständig gereinigten Oberflächen, verträglich mit Bleieinlassungen, Verwendung wird aus gesundheitlichen Gründen nicht empfohlen, zudem es nicht an private

Endverbraucher abgegeben wird und in der Schweiz seit 2005 völlig verboten ist [172].

**Zinkphosphat:** häufig verwendeter Ersatz von Bleimennige

**Zinkstaub:** sehr gute Korrosionsschutzwirkung, vor weiterer Beschichtung sind Zinkkorrosionsprodukte zu entfernen

**Zinkoxid:** alkalisch, daher zur Neutralisierung saurer Abbauprodukte geeignet, z. T. bleihaltig

- ▣ für Deckbeschichtungen, abhängig von Belastung, Bindemittel und gewünschtem Farbton: z. B. Ruß, Zinkoxid, Eisenglimmer
  - Lösemittel: organische und wässrige Lösemittel
- Die Bedeutung von Stoffen mit organischen Lösemitteln ist aus Umweltschutzgründen rückläufig.

Metallüberzüge, die im Werk durch Feuerverzinken, thermisches Spritzen oder elektrolytisches Verzinken hergestellt worden sind, erfordern je nach Dicke der Schutzschicht, Belastung und Schutzdauer eine Beschichtung aus besonders zusammengesetzten Stoffen (Duplex-System). Die Beschichtung schützt den Metallüberzug vor Fehlstellen, was weiteres Korrodieren zur Folge hätte.

## Arbeitsweise

- Auftrag mit Streichen, Rollen, Spritzen bzw. nach Herstellerangaben in erforderlicher Schichtdicke
- Auftrag nicht auf feuchten Oberflächen
- Verarbeitungstemperatur und Abstände zwischen den Aufträgen nach Herstellerangaben
- Schutz angrenzender Flächen

### 1.4.15 Rissbehandlung

Eine Rissbehandlung ist abhängig von der statischen Beanspruchung des Bauteils, von der Risslänge und -breite sowie vom Zustand des Mauerwerks.

## Verfahren

- Füllen
- Verkleben
- Klammern

Über größeren Verband gerissenes Mauerwerk muss durch konstruktive Maßnahmen wie Verpressen, Klammern oder Vernadeln gesichert werden (Kapitel 1.4.16).

## 1. Rissverfüllung

**Verfahren:** Injektion mit möglichst niedrigem Druck, maschinell oder von Hand

Mit Ausnahme der Polyurethan-Injektion muss die Bewegung der Risse abgeschlossen sein. Bei über größerem Verband auftretenden konstruktiven Rissen muss die Injektion in Verbindung mit dem Einbau von Ankern, Nadeln etc. erfolgen, die aus Gründen des Korrosionsschutzes mit Zement oder Trasszement umhüllt werden müssen.

### Material

- Rissweite < 2 mm:
  - Zement-, Kalk- oder Kalkzementsuspension, ggf. Zusatz von Trass,
  - Epoxidharz
  - Acrylharz
  - Polyurethan (PUR)
- Rissweite > 2 mm:
  - Kalk-, Zement-, oder Kalkzementmörtel, ggf. Zusatz von Trass,
  - kieselsäureestergebundener Mörtel
- wasserführende Risse:
  - Polyurethan (PUR), Abdichtung von unter Druck wasserführenden Rissen mit schnellschäumendem Polyurethan vor PUR-Injektion
  - Zementleim bei drucklos wasserführenden Rissen

### Arbeitsweise

- Verdämmen des Risses mit Mörtel, Ton, Latex, Weich-PVC
- Injektion in Anlehnung an ZTV-ING, Teil 3 MASSIVBAUTEN, Abschnitt 5 [173]
  - Befestigung von Einfüllstutzen (Klebepacker) mit Verdämmmaterial auf der Bauteiloberfläche entlang des Rissverlaufs, Abstand der Einfüllstutzen entsprechend den örtlichen Gegebenheiten oder
  - Befestigung von Bohrpäckern, Schraubpackern wechselseitig entlang des Risses
  - Injizieren von unten nach oben, bis jeweils aus dem oberen Einfüllstutzen bzw. Bohrloch das Füllgut austritt
  - möglichst wenig Druck, in Anpassung an die Gegebenheiten (Zustand des Mauerwerks)
- für restauratorische Zwecke: Verfüllen der Risse von Hand mit medizinischem Gerät

## 2. Verkleben von Werksteinteilen

Verkleben von gelockerten oder abgelösten Teilen, Anwendung bei Zierteilen oder nicht statisch beanspruchten Werksteinen

**Material:** Epoxidharz, Acrylharz

**Bemerkung:** passgenaue Flächen erforderlich, ggf. Unterstützung durch Dübel oder Verankerung

### 3. Verklammern von Bauteilen

Bei nicht mehr in Bewegung stehenden Rissen können Metallklammern eingesetzt werden (Kapitel 1.4.7). Abstand der Klammern ca. 25 cm, Anordnung rechtwinklig zum Rissverlauf (Bild 24).

**Arbeitsgänge:**

- Ausspitzen des Steins auf ca. 4 cm Tiefe zum Einlassen der Klammer  
Material: rostfreier Stahl, z. B. V4A-Stahl
- Befestigung der Klammer mit 2-Komponenten-Steinkleber, Zementmörtel oder Blei
- ggf. Überziehen der Klammer mit 4 cm dickem Mörtel in Anpassung an die Steinoberfläche
- Verfüllen der Risse

### 4. Spiralanker [174], [175]

Das Spiralankersystem dient zur Sanierung von Rissen durch Zugbeanspruchung und Verhinderung weiterer Rissbildungen. Auch anwendbar zur Vernadelung sowie zur nachträglichen Verankerung von mehrschaligem Mauerwerk.

**Komponenten:**

Spiralanker = spiralförmiger Bewehrungsstab aus austenitischem rostfreiem legiertem Stahl mit  $\varnothing$  6,8 oder 10 mm



**Bild 24** ■ Verklammerung eines durchgehenden Mauerrisses



Ankermörtel = zweikomponentig, mineralisch, thixotrop eingestellt, mit hoher Druck- und Haftscherfestigkeit

**Arbeitsweise:**

- Aufschlitzen des Mauerwerks (möglichst in Lagerfuge) senkrecht zum Rissverlauf
- Fuge reinigen und vornässen
- erste Lage Ankermörtel einbringen
- Spiralanker in den Mörtel eindrücken
- zweite Lage Ankermörtel aufbringen und Fuge verschließen

Der Ankermörtel sorgt für den Verbund von Spiralanker und Mauerwerk. Durch die hohe Elastizität des Ankers und die hohe Haftscherfestigkeit des Ankermörtels wird die Bewegung vorhandener Risse behindert und die Bildung neuer Risse vermieden.

## 1.4.16 Statische Sicherung des Mauerwerks

Bei statisch instabilem Mauerwerk sollte zur Beurteilung der Sicherungsmaßnahmen ein Tragwerksplaner eingeschaltet werden.

### 1.4.16.1 Verpressen

**Ziel**

Füllen von Hohlräumen und Rissen, Verfestigen von brüchigem Mauerwerk

**Material**

- Mineralisch gebundene Mörtel:
  - Zement, Kalkzement oder Kalk, minimaler Gehalt an Tricalciumaluminat ( $C_3A$ ), ggf. Zusatz von Trass bzw. Mörtelzusatzmittel, bei Rissbreiten  $\leq 2$  mm als Suspension, bei Rissbreiten von 2 bis 5 mm als Feinmörtel [176]. Bei Verdacht auf gipshaltige Mörtel bzw. Steine im Mauerwerk sind Voruntersuchungen zwingend erforderlich [111] (Kapitel 2.1.17.2).
  - Injektionsschaummörtel (luftporenmittler Injektionsmörtel mit hydraulischem Bindemittel und Schaumbildnern) [177]
- Reaktionsharze:

Anwendung nur bei erhöhten Anforderungen an kraftschlüssigen Verbund, bei trockenen Rissflanken, großen Risstiefen und geringer Rissbreite  $< 1$  mm, da sich die Eigenschaften von Reaktionsharzen wesentlich von denen mineralischer Baustoffe unterscheiden.

## Arbeitsgänge nach WTA-Merkblatt 4-3-98 INSTANDSETZUNG VON MAUERWERK. STANDSICHERHEIT UND TRAGFÄHIGKEIT [176]

- Verfugen, Verdämmen von Rissen
- Herstellen von Bohrlöchern, Anordnung der Bohrlöcher möglichst im Fugennetz
- Ausblasen oder Ausspülen der Bohrkanäle
- Einsetzen von Verpresspackern
- Injizieren unter geringem Druck (Berücksichtigung des Mauerwerkzustands)
- Ausbau der Packer
- Verschließen der Bohrlöcher mit Mörtel

Für die Anwendung von Reaktionsharzen sind die Bohrkanäle möglichst im Trockenbohrverfahren, wechselseitig vom Riss unter einem Winkel von 45° herzustellen.

Probeverpressung zur Festsetzung von w/z-Wert, Materialverbrauch, Druck, Dauer des Verpressvorgangs.

Anordnung und Tiefe der Bohrlöcher: abhängig von Aufbau des Mauerwerks, Hohlraumgehalt.

Zur Hohlraumfüllung und Mauerwerksstabilisierung ist besonders der Injektionsschaummörtel geeignet, der an die bauphysikalischen Kennwerte des Mauerwerks angepasst werden kann und verträglich mit Mauerwerkssalzen ist.

### 1.4.16.2 Vernadelung

#### Ziel

Erhöhung der Querkzugfestigkeit des Bauwerks

#### Arbeitsgänge

In Anlehnung an WTA-Merkblatt 4-3-98/D INSTANDSETZUNG VON MAUERWERK. STANDSICHERHEIT UND TRAGFÄHIGKEIT [176] sind durchzuführen:

- Herstellen von Bohrlöchern zur Aufnahme der Nadelanker, Bohrl Lochdurchmesser 40 mm größer als Nadeldurchmesser
- Säubern der Bohrlöcher durch Ausblasen mit Druckluft
- Zentrisches Anordnen der Nadeln mit Abstandshaltern

**Material:** gerippter Betonstahl, 8 bis 20 mm Durchmesser, z. B. BSt 500 S, ggf. als GEWI-Stahl, Edelstahl (z. B. Werkstoffnr. 1.4404 oder 1.4571 für Einsatz in chloridhaltigem Mauerwerk)

- Injizieren der Bohrlöcher mit Mörtel, um Verbund der Nadeln mit Mauerwerk herzustellen sowie als Korrosionsschutz
- Verschließen der Bohrlöcher mit Mörtel, 25 bis 40 mm Überdeckung

### 1.4.16.3 Verankerung

#### Ziel

Verklammerung, Stabilisierung von Mauerwerk

#### Verpressanker

**Arbeitsgänge** nach WTA-Merkblatt 4-3-98/D INSTANDSETZUNG VON MAUERWERK. STANDSICHERHEIT UND TRAGFÄHIGKEIT [176]

- Nicht druckfestes Mauerwerk vorverpressen
- Herstellen von Bohrlöchern zur Aufnahme der Spannanker, Bohrlochdurchmesser 40 mm größer als Anker- oder Stoßmuffendurchmesser
- Säubern der Bohrlöcher durch Ausblasen mit Druckluft
- Zentrischer Einbau der Spannstähle  
Material: Edelstahl, z. B. Spannstahl St 835/1030, St 885/1080, ggf. als GE-WI-Stahl
- Einbau von Ankerplatten zur beidseitigen Befestigung der Spannstähle im Mauerwerk, bei nur einseitig zugänglichem Mauerwerk Verkleben der Anker mit Epoxidharz oder Befestigung mit Spreizdübeln
- Vorspannen der Spannanker
- Injizieren der Bohrlöcher mit Mörtel, bei hohlraumreichem Mauerwerk unter Verwendung von Injektionsstrümpfen, zur Vermeidung von Verlusten des Injektionsmörtels
- Korrosions- und Brandschutzanstrich der außen liegenden Ankerplatten

### 1.4.17 Metallabdeckung

#### Ziel

Schutz gegen eindringenden Niederschlag

#### Anwendung

Abdeckung von:

- Fenstersohlbänken
- Mauern
- Dachrändern

## Material

- Zink (Titanzink)
- Blei
- Kupfer
- Aluminium
- Edelstahl oder verzinkter Stahl

## Aufbau [178]

Befestigung der Abdeckung:

- direkt
  - vollflächiges Kleben (bei glattem Untergrund)
  - sichtbar mit Nagel, Schraube oder Niet, ggf. mit Wasserdichtung → Gefahr von Rissen durch Behinderung der thermischen Längenänderung
- indirekt mit Haftstreifen aus verzinktem Stahl → Gewährleistung der Kantensteifigkeit  
Dicke ca. 1,0 mm  
Befestigung der Haftstreifen auf Bohlen, die auf dem Naturstein aufgedübelt werden (Bild 25)

Mauerabdeckungen sollten wegen der Gefahr von Verwerfungen nicht direkt befestigt werden.

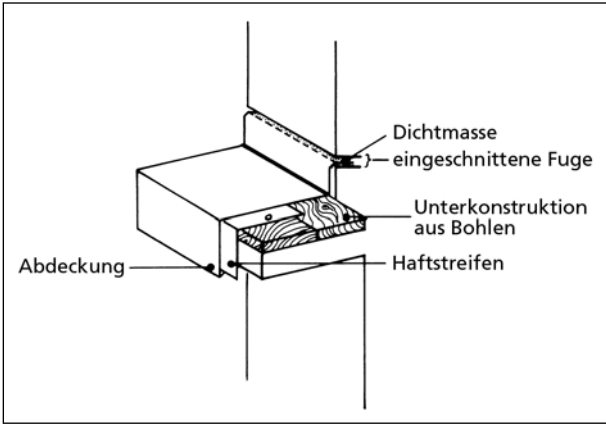
- Wandanschluss von Gesims- bzw. Fensterbankabdeckung verputztes Mauerwerk:
  - Aufkantung, die mit Mauerhaken befestigt und überputzt wird (Bild 26)
  - Aufkantung und Verschraubung mit einem Haftstreifen, der gleichzeitig als Putzleiste dient (Bild 27)
- steinsichtiges Mauerwerk:
  - Aufkantung und Verwahrung in einer eingeschnittenen Nut oder Fuge des aufgehenden Mauerwerks, Abdichtung mit Mörtel oder Siliconharzkleber (Bild 25)
  - Aufkantung und Abdeckung mit Kappleiste, die wie vor in Nut oder Fuge eingelassen wird (Bild 28)

Ausbildung einer Tropfkante mit  $\geq 20$  mm Abstand zu Gesims bzw. Fassade.

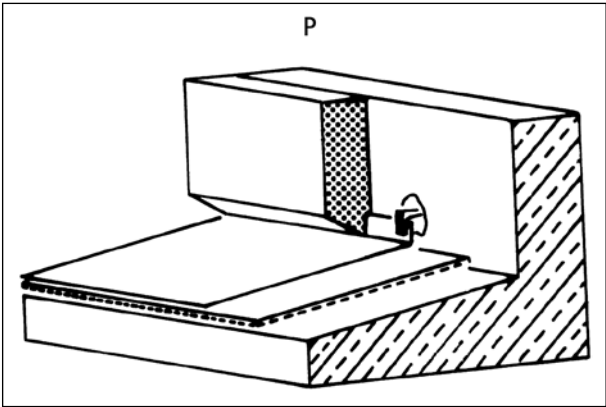
## Ausbildung der Abdeckung

Verbindung der Einzelteile durch

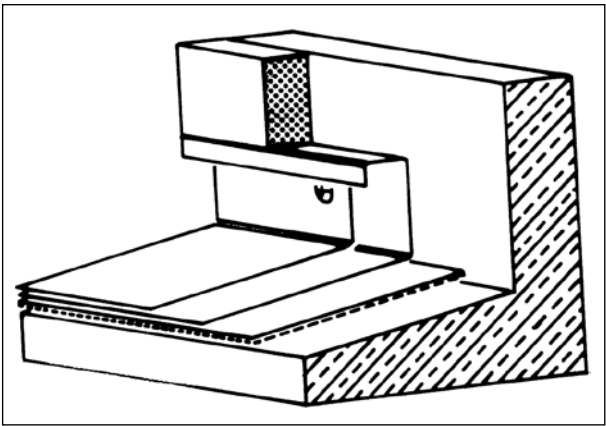
- Löten
- Nieten
- Falze, z. B. Querfalze oder Doppelstehfalze (Einzellängen von Zinkblechen max. 2 m zur Gewährleistung der Kantenstabilität) (Bild 29)



**Bild 25** ■ Befestigung einer Abdeckung mit Haftstreifen. Wandanschluss durch Einlassung in einer Fuge (in Anlehnung an [178, S. 221])

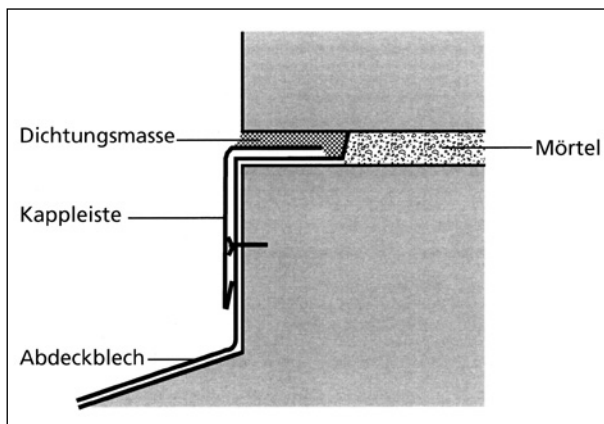


**Bild 26** ■ Wandanschluss einer Abdeckung mit Aufkantung und Mauerhaken [178, S. 220]

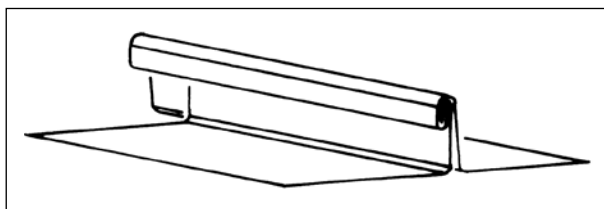


**Bild 27** ■ Wandanschluss einer Abdeckung durch Befestigung in einer Putzleiste [178, S. 220]

**Bild 28** ■ Wandanschluss einer Abdeckung mit einer in eine Nut oder Fuge eingelegten Kappleiste



**Bild 29** ■ Prinzip eines Doppelstehfalzes (in Anlehnung an [178, S. 108])



- Schiebehafter Metalldicke min. 0,7 mm  
Gefälle ca. 3°  
Tropfkante:
- Überstand min. 20 mm
- Höhe min. 50 mm
- Ausbildung der Tropfkante durch geradlinige Abkantung, da hierdurch eine gezieltere Wasserabführung als mit gerundeten Formen möglich ist

Aufgrund der thermischen Dehnung von Blechen werden gewöhnlich Einzelteile verwendet, die mit Falzen verbunden sind und auf Bohlen und Haftstreifen montiert werden oder mit zusätzlicher Wasserdichtung angeschraubt werden. Mit Einzelteilen muss insbesondere dann gearbeitet werden, wenn Vor- und Rücksprünge an Gebäuden zu berücksichtigen sind. Zur Abdeckung von gerundeten Bauteilen ist meist ein Einschneiden des Blechs erforderlich.

## 1.4.18 Wärmedämmung

### Ziel

Eine Wärmedämmung dient dazu, den Wärmeschutz zu verbessern, um Heizenergie einzusparen und Tauwasserausfall im Innern oder auf der Oberfläche von Bauteilen zu verhindern. Dies erfolgt durch Erniedrigung des Wärmedurchgangskoeffizienten  $U$  bzw. Erhöhung des Wärmedurchlasswiderstands  $R$  (Kapitel 1.3.3.3.6 und 1.3.3.3.7). Eine Wärmedämmung kann erfolgen als:

- Außendämmung,
- Kerndämmung,
- Innendämmung.

### 1.4.18.1 Außendämmung

#### Verfahren

- Wärmedämmputz
- Wärmedämmverbundsystem (WDVS)
- vorgehängte hinterlüftete Fassade

#### Wärmedämmputz

Wärmedämmputze sind nach DIN V 18550 [65] Mörtel mit erhöhter Wärmedämmung, die aus Zuschlägen niedriger Rohdichte hergestellt werden. Ihr Rechenwert der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  beträgt max.  $0,2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , bei einer Trockenrohddichte des erhärteten Mörtels von max.  $600 \text{ kg}/\text{m}^3$ . Ein Wärmedämmputzsystem besteht aus aufeinander abgestimmtem, wärmedämmendem Unterputz und wasserabweisendem Oberputz.

Nach EN 998-1 [77] (Kapitel 1.3.3.7) werden folgende Eigenschaften für Wärmedämmputzmörtel festgelegt:

- Druckfestigkeit  $0,4$  bis  $5 \text{ N}/\text{mm}^2$
- kapillare Wasseraufnahme  $c \leq 0,40 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}) (= 3,1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}))$  [78]
- Wasserdampfdurchlässigkeit  $\mu \leq 15$
- Wärmeleitfähigkeit:
- Wärmeleitfähigkeitsgruppe T1:  $\lambda \leq 0,1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$   
bzw. T2:  $\lambda \leq 0,2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

Da DIN EN 998-1 [77] nur eine Stoffnorm ist, wird sie durch die Ausführungs- und Anwendungshinweise der DIN V 18550 [65] ergänzt.

Anforderungen an den Unterputz nach DIN V 18550 [65]:

- Druckfestigkeit  $\geq 0,4 \text{ N/mm}^2$
- $0,5 < w \leq 2,0 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$  (wasserhemmend)
- Wärmeleitfähigkeit T1:  $\lambda \leq 0,12 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$  bzw. T2:  $\lambda \leq 0,24 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$

Anforderungen an den Oberputz nach DIN V 18550 [65]:

- Druckfestigkeit  $0,8 \leq \delta \leq 3,0 \text{ N/mm}^2$
- $w \leq 0,5 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ ,  $s_d \leq 2,0 \text{ m}$  (wasserabweisend)

**Aufbau:**

- ggf. Spritzbewurf zur Egalisierung der Saugfähigkeit
- Wärmedämmputz als Unterputz
- wasserabweisender Oberputz

**Auftrag [65]:**

- Dicke des Unterputzes: min. 20 mm, max. 100 mm
- Dicke des Oberputzes (bei Wärmedämmputz mit EPS-Zuschlag):  $\geq 6 \text{ mm}$ , max. 12 mm inkl. 4 mm Ausgleichputz. Bei anderen Leichtzuschlägen (z. B. Glasschaum, Perlite, Bims, Vermiculite) nach Herstellervorgabe.

Nach Fertigstellung des Unterputzes und vor Auftrag des Oberputzes ist eine Standzeit von mindestens 7 Tagen einzuhalten, bei höheren Schichtdicken mindestens 1 Tag je 5 mm Dicke des Unterputzes.

Durch das Auftragen entsprechend höherer Schichtdicken kann der Wärmedurchlasswiderstand bzw. der Wärmeschutz erhöht werden. Mit der Schichtdicke kann der erforderliche U-Wert eingestellt werden.

## Wärmedämmverbundsystem (WDVS)

Beim Wärmeschutz mit Wärmedämmverbundsystemen werden Dämmplatten auf der Fassade befestigt, die zur Aufnahme der nachfolgenden Putzbeschichtung vollflächig mit Armierungsgewebe versehen werden.

**Regelung:** VOB/C-ATV DIN 18345 WÄRMEDÄMM-VERBUNDSYSTEME [179], Richtlinien für Fassadendämmplatten aus EPS-Hartschaum bzw. aus Mineralwolle des Fachverbands Wärmedämmverbundsysteme [180], [181].

**Material:**

- Polystyrol-Hartschaum  
schwer entflammbar, anwendbar bis max. 22 m Gebäudehöhe (Hochhaushöhe)
- Polyurethan-Hartschaum
- Mineralfasern als Matten, Platten, Lamellen, Filze aus Glas-, Stein- oder Schlackenwolle  
nicht brennbar, anwendbar für alle Gebäudehöhen



**Arbeitsweise** [182, S. 93 ff.], [183]:

- Befestigung der Dämmplatten
  - Verklebung

**Voraussetzung:** ausreichend tragfähiger Untergrund (Haftzugfestigkeit des Untergrundes  $> 80 \text{ kN/m}^2$ ), Unebenheiten max.  $1 \text{ cm/m}$

**Material:** Polystyrol-Hartschäume mit  $\leq 10 \text{ kg/m}^2$  System-Gesamtgewicht
  - Verdübelung zusätzlich zur Verklebung

**Voraussetzung:** nicht tragfähiger Untergrund (Haftzugfestigkeit des Untergrundes  $< 80 \text{ kN/m}^2$ ), Unebenheiten max.  $2 \text{ cm/m}$ , System-Gesamtgewicht  $> 10 \text{ kg/m}^2$  sowie bei Systemen mit Steinwollendämmung unabhängig vom Gewicht

Ermittlung der Dübelmenge nach Windzone, Gebäudehöhe und System- bzw. Dübellastklasse
  - mechanisch mit Profilschienen und ggf. Dübeln

**Anwendung:**  
bei nicht tragfähigen Untergründen oder bei größeren Vorsprüngen in der Plattenflucht

**Material:**  
Kunststoffschienen bei schwer entflammbarem Dämmplattenmaterial  
Aluminiumschienen bei nicht brennbarem Dämmplattenmaterial
- Armierung
  - Aufbringen der Armierungsmasse
  - Einbetten des Armierungsgewebes mit  $10 \text{ cm}$  Überlappung
  - zusätzliche Armierung an Fensterecken, Kanten (ggf. zusätzlich mit Eck-schutzschienen)
  - vollflächiges nass-in-nass-Überspachteln des Gewebes mit Armierungsmasse
- Putz
  - Polystyrol-Hartschaumplatten mit Kunstharz- oder Siliconharzputzen sowie bei mineralischer Armierungsmasse mit Mineral- oder Silikatputz (Kaliwasserglas und organische Bestandteile)
  - Mineralfaserplatten mit Silikatputz oder mineralischem Leichtputz (hydraulisch abbindend)

**Sockelbereich:** Die Wärmedämmplatten sollten bis zur Spritzwasserzone ca.  $30 \text{ cm}$  über GOK reichen. Der Sockelbereich kann ausgebildet werden als:

- Putz, ggf. Wärmedämmputz
- Hochziehen der Perimeterdämmung von erdberührendem Bereich bis in Sockelbereich
- Sockeldämmplatten mit zusätzlichem Panzergewebe

**erdberührender Bereich:** Wärmedämmung als Perimeterdämmung, Material z. B. extrudiertes Polystyrol, erhöhter Feuchteschutz durch Abdichtungsanstrich vor Aufbringung der Platten

### **Vakuum-Dämmung [184, S. 16 f.]**

Mit Vakuum-Paneelen kann die Wärmedämmung gesteigert werden, ohne die Dicke des Dämmstoffs zu erhöhen, da die Wärmeleitfähigkeit im Vakuum mit  $\leq 0,005 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  bzw.  $0,02 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  bei belüftetem Paneel sehr niedrig ist. Vorteilhaft ist die geringe Plattendicke von ca. 10 bis 40 mm. Die bis zu achtfach bessere Dämmwirkung gegenüber herkömmlichen Dämmstoffen ermöglicht den Einsatz entsprechend dünnerer Platten.

**Anwendung:** Außen- und Innenbereich, auch als WDVS

**Material:** evakuierte Platten mit Stützkern (z. B. pyrogene Kieselsäure) und metallisierter Kunststoffolie

**Nachteil:** hohe Kosten, keine Langzeiterfahrung, sorgfältige Planung und Ausführung erforderlich.

### **Vorgehängte Fassade**

Eine vorgehängte, hinterlüftete Fassade oder Schale (Kapitel 1.2.1 und 2.5.7) wird auf der Fassade, auf der ggf. eine Wärmedämmplatte montiert ist, unter Wahrung eines min. 20 mm großen Luftspalts befestigt. Die Wärmedämmung erfolgt sowohl über die Luftschicht als auch über die eingebaute Wärmedämmschicht. Die Luftschicht steht mit der Außenluft über Be- und Entlüftungslöcher sowie die offenen Fugen der Bekleidung in Verbindung. Die Hinterlüftung dient der Reduzierung von innerer Luftfeuchte und der Ableitung von eingedrunenem Niederschlag.

**Verankerung** der Platten mit der Fassade durch Trag- und Halteanker aus nichtrostendem Stahl, Werkstoffnr. 1.4571 und 1.4401, ggf. unter Verwendung von Unterkonstruktionen

**Material:** z. B. Kunststoff, Aluminium, asbestfreier Faserzement, Naturwerkstein

**Nachteil:** Durch defekte Fugen o. ä. eindringendes Wasser kann die Wärmedämmung durchfeuchtet werden

**Vorteil:** Durch Platten mit hoher Bruchfestigkeit ist Schutz vor mechanischer Belastung der Fassade gegeben

## Vor- und Nachteile der Außendämmung

- keine Wärmebrücke, da vollflächiges Aufbringen der Dämmschicht
- hohe Dämmstoffdicken zur Erhöhung des Wärmeschutzes möglich
- Eliminierung von Kondenswasserzonen im Bauteil
- ggf. Gefahr durch mechanische Beschädigung
- bei denkmalwerten Fassaden nur bedingt anwendbar

### 1.4.18.2 Kerndämmung [185]

Eine Kerndämmung ist bei zweischaligem Mauerwerk nachträglich möglich, indem die Luftschicht mit wasserabweisenden Dämmstoffen verfüllt wird.

Regelung: DIN 1053 [1]

Material: Mineralfaserflocken, Schüttung aus hydrophobiertem Perlite, Ortschaum

Nachteil: Verteilung des Dämmstoffs nicht kontrollierbar  
Anwendung bevorzugt im Neubau

### 1.4.18.3 Innendämmung [186], [187], [188]

Eine energetische Optimierung ist z. B. bei denkmalwerten Gebäuden oft nur als Innendämmung möglich. Dem Risiko eines Tauwasserausfalls steht eine schnellere Erwärmung von Räumen und Wänden gegenüber.

Um die Gefahr der Tauwasserbildung bei Innendämmungen einschätzen zu können, sollte eine genaue feuchtetechnische Untersuchung durchgeführt werden. Hierfür eignen sich Simulationsverfahren wie WUFI (Wärme- und Feuchtetransport instationär), DELPHIN oder COND.

Ein vereinfachtes hygrisches Nachweisverfahren ist nach WTA-Merkblatt 6-4 INNENDÄMMUNG NACH WTA [186] und DIN 4108-3 [69] bei bestimmten Voraussetzungen möglich.

Voraussetzung: Durch die wärmeschutztechnische Verbesserung wird der Wärmedurchlasswiderstand  $R$  nicht um mehr als  $1,0 \text{ m}^2 \text{ K/W}$  erhöht und der  $s_d$ -Wert des Wärmedämmsystems beträgt min.  $0,5 \text{ m}$ .

## Dämmsysteme [187]

- Dampfdichte Dämmplatten: z. B. Schaumglasplatten, alukaschierte Polyurethan-Hartschaumplatten, vakuumgedämmte Isolationspaneele
- Dämmsysteme mit Dampfbremse
  - Dampfbremse als Folie, Anstrich, Dichtungsmasse

▣ feuchteadaptive Dampfbremse:

Polyamidfolie,  $s_d \approx 2 \text{ m}$ ,  $\mu$  abh. von rel. Luftfeuchte, d. h. bei höherer sommerlicher Raumluftheuchte wird Trocknungsprozess unterstützt, nur in Kombination mit dampfdurchlässigen Dämmstoffen (z. B. Kalziumsilikatplatten, Dämmputze)

- dampfdurchlässige Dämmungen: z. B. Kalziumsilikatplatten, Dämmputze
- kapillaraktive Innendämmung [189]: diffusionsoffenes Dämmsystem aus Dämmplatten mit aufeinander abgestimmtem Klebemörtel, in dem aufgenommene Feuchtigkeit kapillar transportiert und über Dampfdiffusion an die Raumlufte abgegeben werden kann

## Dämmverfahren

- Verbundplatten, ggf. mit integrierter Dampfsperre (z. B. Gipskarton)
- Holzrahmenkonstruktion mit Dämmstoffeinlage
- Reflexionsplatten für Heizkörpernischen
- Dämmtapete, nur geringer Wärmeschutz

## Vor- und Nachteile der Innendämmung

### Vorteil:

- einfache Montage
- raum- oder wohnungsweise Dämmung möglich
- oft einzige Möglichkeit der nachträglichen Wärmedämmung bei denkmalwerten Fassaden

### Nachteil:

- Sorgfältiger Einbau zur Vermeidung der Hinterströmung der Wärmedämmung besonders bei Durchdringungen, An- und Abschlüssen sowie vollflächiger Verklebung bzw. Anmörtelung der Dämmplatten erforderlich
- durch Wärmebrücken über einbindende Bauteile deutliche Reduzierung des Wärmeschutzes mit Gefahr von Kondenswasserbildung, Schimmelpilzbildung und Feuchtflecken
- Gefahr der Kondensation im Bauteilinnern, wenn warme Innenluft auf kalten Baustoff trifft, daher Ausrüstung der Innendämmung meist mit Dampfsperre
- Verkleinerung der Räume



## 2 Schadensarten

### 2.1 Schäden an Naturstein

#### 2.1.1 Bewuchs

##### Erscheinungsbild (Bilder 30 und 31)

Vorkommen: defekte Fugen, Risse, Bodenbildung auf Gesteinsvorsprüngen, Steinoberflächen

Bestandteile: Sträucher, Bäume (vor allem Birken oder Weiden), Moos u. a. Kleinpflanzen, Mikroorganismen

##### Untersuchung

Pflanzen: visuell

Mikroorganismen: Rasterelektronenmikroskopie (Kapitel 1.3.3.1)

##### Schadensursache

Voraussetzung: erhöhte Baustofffeuchte, jedoch nicht so stark, dass Pflanzen bzw. Mikroorganismen abgespült werden, z. B. durch aufsteigende Bodenfeuchte, Spritzwasserzonen etc.



**Bild 30** ■ Zerstörung  
des Mauerwerks durch  
Baumbewuchs



**Bild 31** ■ Intensive Vermoosung einer Statue

Verstärkung der Effekte durch defekte Fugen, Risse im Stein sowie konstruktive oder bauliche Mängel wie defekte Regenfallrohre oder Blechabdeckungen

Die Tabellen 28 und 29 verdeutlichen die Schädigungsmechanismen, die von Bewuchs ausgehen können.

Pflanzen mit Wurzeln, die in Fugen oder Risse eindringen, wirken durch den Wurzeldruck, der eine Lockerung des Gesteinsgefüges hervorruft, gesteinschädigend. Dagegen kann ein Fassadenbewuchs durch Kletterpflanzen mit Haftwurzeln Schutzfunktionen übernehmen wie Wind-, Wärme- und Schlagregenschutz.

Tabelle 28 ■ Wirkung von Pflanzen

Pflanzen	Wirkungsweise	Auswirkung auf Stein
Kletterpflanzen wie Haftwurzler, Ranken, Schlingen, Spreizklimmen	Klettern durch Haftwurzeln, Ranken mit Blättern, Trieben etc.	keine Ablösung von Gesteinspartikeln, Wirkung des Blätterdachs als Windschutz, Wärmeschutz durch Luftpolster zwischen Wand und Blattoberfläche, Schutz vor Schlagregen
Pflanzen mit in das Bauwerk eindringenden Wurzeln (z. B. Efeu)	Wurzeldruck in Fugen	Lokale Störung des Gesteinsgefüges durch Erzeugung von Rissen, veränderter Feuchtehaushalt durch Wassertransport des Wurzelwerks

Tabelle 29 ■ Wirkung von Mikroorganismen

Mikroorganismen	Wirkungsweise	Auswirkung auf Stein
schleimbildende Pilze und Algen auf Gesteinsaußenfläche, schleimbildende Bakterien in Poren und Rissen	Bildung einer Schleimschicht als Lebensraum, die feste, flüssige und gasförmige Bestandteile, z. T. belegt mit Sulfaten und Ammoniumsalzen, bindet	Bindung von Feuchtigkeit, Porositätsänderung durch Anlagerung an Porenwänden, Bildung von Gipskrusten, Lösung von Carbonat
nitrifizierende Bakterien	<p><b>Ammoniakoxidanten:</b> Oxidation von Ammoniak zu salpetriger Säure (<math>\text{HNO}_2</math>) Katalyse von schwefliger Säure zu Schwefelsäure durch das Stoffwechselprodukt Nitrit (Salz der salpetrigen Säure)</p> <p><b>Nitritoxidanten:</b> Oxidation von salpetriger Säure zu Salpetersäure (<math>\text{HNO}_3</math>), Oxidation von Stickstoffmonoxid über salpetrige Säure zu Salpetersäure</p>	<p><b>Ammoniakoxidanten:</b> Katalyse des Schwefelsäureangriffs</p> <p><b>Nitritoxidanten:</b> Reaktion von Ca-Carbonat zu wasserlöslichem, stark hygroskopischem Ca-Nitrat (Mauersalpeter)</p>

Fortsetzung auf S. 172 ➔



Tabelle 29 ■ Fortsetzung

Mikroorganismen	Wirkungsweise	Auswirkung auf Stein
Biofilme mit Pilzen, Actinomyceten, chemoorganotrophen und chemolithoautotrophen Bakterien		Verfärbung, Verfestigung mit Abschalung, Abplatzung, Mobilisierung von Eisen und Mangan, das sich an Pilzhypphen oder in der Nähe absetzt [192, S. 177]
chemoorganotrophe Mikroorganismen	organisches Material als Nährstoff- und Energiequelle Pigmentbildung bzw. -ausscheidung [192, S. 179]	Abbau von Hydrophobierungen, Anti-Graffiti-Imprägnierungen, Erzeugung von organischen Säuren oder mineralischen Produkten (Carbonat, Oxalat, Sulfat, Apatit), die u. a. zur Gefügeauflockerung und Krustenbildung führen, Verfärbung durch Pigmentbildung
Metall oxidierende Mikroorganismen	Umsetzung z. B. von Eisen- und Manganmineralien	Materialverarmung der Gesteine, Anreicherung und Verdichtung an der Gesteinsoberfläche durch Zementation des Porenraums
Flechten	Auflösung von Ca-Carbonat durch organische Säuren	Bildung von Ätzgruben

Sanierung

Durch Bewuchs verunreinigte Flächen lassen sich durch verschiedene Verfahren (Kapitel 1.4.2) säubern. Die Auswahl des speziellen Verfahrens richtet sich nach dem Verschmutzungsgrad und der Härte und Porosität des Gesteins sowie dem Zustand des Bauwerks. Konstruktive und bauliche Mängel sind auf jeden Fall zu beseitigen.

Schadensvermeidung

- regelmäßige Bauunterhaltung: Kontrolle der Wasserableitung
- Fungizide: (Tabelle 11)
- Hydrophobierung: Schutz vor Bewuchs durch Verringerung der Wasseraufnahme des Baustoffs, aber Gefahr der Vergrünung durch chemoorganotrophe Mikroorganismen (Tabelle 29), Bewuchsschutz nur Nebenaspekt einer Hydrophobierung

## 2.1.2 Ablagerung von Taubenkot

### Erscheinungsbild

Weiß bis graubraune Beläge auf Gesimsen, Vorsprüngen, aber auch in Hohlräumen, Dachstühlen etc., die eine Höhe von mehreren cm bis in Ausnahmefällen sogar dm erreichen können (Bild 32).

Punktuelle Verschmutzungen treten an fast allen Gebäudeteilen auf, entstanden durch Kot, der im Fluge fallen gelassen wird.

Bevorzugte Nist- und Ruheplätze sind Mauerwerksöffnungen wie Fenster, Nischen oder Gerüstbalkenlöcher, vor allem an geschützten Stellen an Nord- und Ostseiten der Bauwerke.



**Bild 32** ■ Verunreinigung durch Taubenkot im Dachgeschoss eines Wasserturms

Schadensursache

1. Gesundheitsschädigung  
Fliegenlarven, Flöhe → indirekte Verbreitung von Krankheitskeimen und Krankheiten  
Milben → direkte Krankheitsübertragung durch Saugen von Blut beim Menschen und bei Tauben  
Staub der eingetrockneten Kotansammlungen → gefährlich für Atemwege. Eingetrocknete Kotansammlungen, z. T. verunreinigt mit verendeten Tieren, dienen als Nistplätze.
2. Steinschädigung  
Bestandteile von Taubenkot: organische Säuren, vor allem Harnsäure, Eiweiße  
Wirkung:  
Harnsäure, Eiweiße → Abbau zu Ammoniak  
Ammoniak → Salpetersäure durch Mikroorganismen wie Nitrifikanten (Kapitel 2.1.1)  
Calciumcarbonat → Calciumnitrat (›Salpeter‹)  
Geringe Steinschädigung: vor Feuchte geschützte Stellen

Sanierung (Tabelle 30)

Tabelle 30 ■ Reinigungsverfahren zur Entfernung von Taubenkot (Kapitel 1.4.1)

Maßnahme	Anwendung	Nachteile
mechanisch mit Bürste und lauwarmem Wasser	bei geringen Verschmutzungsgraden wirksam	geringe Flächenleistung
mechanisch mit Schaufel u. ä. Werkzeugen	erforderlich bei großen Kotansammlungen	Schutzanzug und Atemschutz erforderlich
Warmwasserstrahlen, Temp. ca. 80 °C, Druck 50–80 bar	große Flächenleistung	zusätzlicher Wassereintrag, Gefahr des Eintrags der gelösten Kotbestandteile in das Bauwerk
Wasserstrahlen mit Druckluft und Feinststrahlmittel	große Flächenleistung, etwas niedriger als beim Warmwasserstrahlen, geringe Wasser- und Druckbelastung	aufwendig, lohnend in Kombination mit Reinigung von Krusten, Bewuchs, Gefahr des Eintrags der gelösten Kotbestandteile in das Bauwerk

## Schadensvermeidung

Um den Anflug und die Besiedlung von Tauben zu vermeiden, können verschiedene Taubenvergrämungsmaßnahmen angewendet werden (Tabelle 31, Bilder 33 und 34). Die Auswahl des Verfahrens hängt von den baulichen Gegebenheiten ab.

**Tabelle 31** ■ Taubenvergrämungsmaßnahmen

Verfahren/ Anwendungsbereich	Wirkungsweise	Nachteile
<b>Vernetzung</b> /Nischen mit Figuren, Fenster, Öffnungen	UV-stabiles Kunststoff- oder Textilnetz, V2A-Drahtnetz, Drahtstärke 0,6 mm, 40–50 mm Maschenweite	Befestigung mit Ringösen im Mauerwerk, s. u. optische Beeinträchtigung
<b>Spanndrähte</b> /Fensterbänke, Mauervorsprünge, Dachrinnen, Firstziegel	Befestigung der kunststoffummantelten V2A-Drähte durch Federn an Trägerelementen, die aufgedübelt, geklebt oder geklemmt werden können, Drahtabstand 50–60 mm	Bei Verdübelung können durch die Beschädigung des Natursteins Probleme mit der Denkmalpflege auftreten; optische Beeinträchtigung
<b>Speichen</b> /für kleine Abmessungen, z. T. optisch weniger auffallend als Drähte oder Netze	ca. 10 cm hohe, rostfreie Edelstahl Elemente mit Metallspitzen, die in Trägerleisten aus UV-beständigem Kunststoff befestigt sind, Abstand der Speichen ca. 50 mm, Ø 1,3 mm, Befestigung der Leisten durch Kleben, Schrauben oder Nieten	optische Beeinträchtigung
<b>elektrische Taubenabwehr</b>	mit Abstandhaltern befestigte Drähte, die in Impulsen mit Strom versorgt werden. Stromstärke: 20 mA Stromspannung: 6.000 V Impuls: 0,75 s Aufklebung der Abstandhalter mit Epoxidharz, ungefährlich für Vögel	Stromanschluss erforderlich, störanfällig bei schlechter Witterung wie Sturm oder Schnee
Fortsetzung auf S. 175 ➔		

Tabelle 31 ■ Fortsetzung

Verfahren/ Anwendungsbereich	Wirkungsweise	Nachteile
Trägerfrequenz oder Ultraschall	Aussendung einer für Tauben unangenehmen Frequenz mit einem Schalldruck von 125 db	Nur im Anfangsstadium wirksam, weil sich die Vögel möglicherweise an die Frequenz gewöhnen. Auf Dauer wirksam in geschlossenen Räumen, in denen ein konstanter Druckaufbau möglich ist.
Vergrämungspaste oder Schaumspray	Durch Einstreichen der Gesteinsoberfläche mit einer pastösen Substanz sollen Tauben am Landen gehindert werden. Das Schaumspray wirkt wie ein harziger Untergrund. Transparent, nicht schädlich für Tauben	Paste: Tauben bleiben kleben und verenden. Wirkung fraglich. Schaum: Haltbarkeit ca. 12 Monate

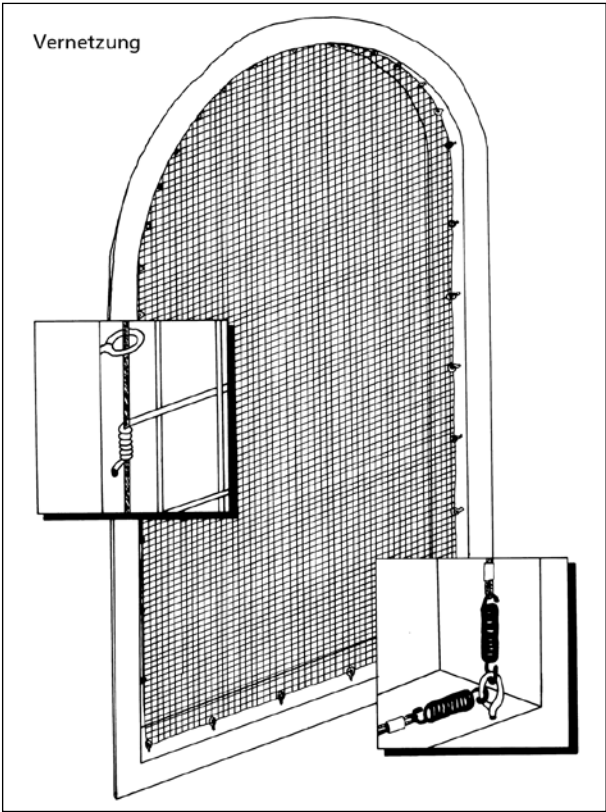


Bild 33 ■ Skizzenhafte Darstellung von Vernetzung [190]

**Bild 34** ■ Anordnung von elektrifizierten Spanndrähten vor einer speziell angefertigten Blechabdeckung auf dem Gesims



### 2.1.3 Krustenbildung

#### Erscheinungsbild

Krusten an der Gesteinsoberfläche entstehen durch die Anlagerung von atmosphärischem Ruß, Staub und Schmutz und haben meist eine dunkle, schwarze bis graue Färbung. Es können dünne, festhaftende von dickeren, z. T. blasig abgelösten Krusten unterschieden werden.

Krusten bilden sich bevorzugt an regengeschützten Stellen, an denen Schadstoffe und neu gebildete Salze nicht durch Witterungseinflüsse abgespült werden, sondern sich anreichern können.

Eine Sonderform bilden Sinterkrusten, die eine weiße Oberfläche haben und aus Calcit bestehen.

#### Untersuchung

Analyse der Kruste: (Kapitel 1.3.3.4)

Ziel der Analyse: Kenntnis über chemische Verbindung, Vergleichsanalyse im Gestein → Aussage über Schadstoffanreicherung in Krusten

#### Schadensursache

##### Gipskrusten

Bildungsmechanismus: Anlagerung von Salzen (z.B. Sulfaten), Ruß- und Staubpartikeln an die Steinoberfläche → ggf. Reaktion von abgelagerten Salzen mit Ca-Mineralen des Steins oder Fugenmörtels

### Schadensmechanismen:

- Verdichtung des Porenraumes durch Partikel, die miteinander verkleben sowie durch auskristallisierte Salze
- Verringerung der Wasserdampfdiffusion, Verlagerung der Kristallisationszone ins Gesteinsinnere, sodass neu gebildete Salze nicht mehr an der Oberfläche auskristallisieren, sondern innerhalb des Porensystems
- unterschiedliches Wärmeausdehnungsverhalten von Kruste und Stein bei Temperatur- und Feuchtigkeitsveränderungen
- Auflockerungszone unter Kruste bei Salzbildung

Mitwirkung von **Mikroorganismen**: Krusten sind häufig mit Mikroorganismen (Kapitel 2.1.1) [191], [192] besiedelt. Während früher Aschepartikel wesentlich an der Verschmutzung der Fassaden beteiligt waren, sind heute zunehmend pigmentierte Mikroorganismen zu finden. Die sinkende Luftbelastung durch anorganische Schadstoffe hat zu einem besseren Nährstoffangebot geführt, mit verstärkter Bildung einer komplexen Mikroflora aus Bakterien und Pilzen [192, S. 179 f.], (Bilder 35 und 36).

**Schleimbildende Bakterien**: Auffangen fester, flüssiger und gasförmiger Bestandteile der Luft durch die Schleimkapsel → Dauerfeuchter Zustand bildet eine gute Voraussetzung für weitere chemische Reaktionen. Die Mikroorganismen sind in einen Biofilm eingebettet, der einen starken Einfluss auf den Wasserhaushalt des Gesteins hat [191, S. 147]. Zudem führt der Biofilm zu einer Färbung der Gesteinsoberfläche sowie zu einer oberflächigen Verfestigung mit Abschalung und Abplatzung [192, S. 177].

**Metalloxidierende Bakterien**: Aufnahme von Metallen, Ausscheiden am Mycel der begleitenden Pilze → Verdichtung des Porenraumes

**Nitrifizierende Bakterien**: Katalyse der Sulfatbildung durch Stoffwechselprodukt Nitrit, Freisetzen des Enzyms Tyrosinase beim Absterben der Zelle, z. B. durch Austrocknen des Gesteins, dies geht in Melanin über und bewirkt eine Schwarzfärbung der Krusten. Durch Bildung von Salpetersäure werden säureempfindliche Mineralien angegriffen und das Gestein durch Salzbildung geschädigt [191, S. 147].

### Sinterkrusten

Der Kalkanteil von Mörtel und Stein wird teilweise als Hydrogencarbonat gelöst und bei Verdunsten der dabei vorhandenen Feuchtigkeit an der Steinoberfläche entlang von Rissen, defekten Fugen u. Ä. wieder als Calciumcarbonat ausgeschieden.

### Brandkrusten

Krusten können auch durch Brandeinwirkung entstehen. Hier ist die Schwarzfärbung auf den freiwerdenden Ruß zurückzuführen.



**Bild 35** ■ Verfärbung durch biogene Kruste und Flechtenuflagerung



**Bild 36** ■ Mauerwerk mit schwarzer Kruste an der Gesteinsoberfläche



## Sanierung

Verschiedene Reinigungsverfahren nach (Kapitel 1.4.1).

### Sonderfall denkmalgeschützte Bauwerke

Im Vorfeld einer Sanierung muss abgeklärt werden, bis zu welchem Grade eine Entfernung von Krusten im Hinblick auf eine schädigende Wirkung unbedingt notwendig ist. Vielfach ist unter denkmalpflegerischen Aspekten eine vollständig saubere Oberfläche nicht erwünscht. Die Reinigung beschränkt sich dann auf Krusten mit hoher Schadstoffbelastung.



## Schadensvermeidung

### Regelmäßige Reinigung

**Hydrophobierung:** erschwerte Anlagerung von Krusten durch wasserabweisende Ausrüstung der Oberfläche. Keinesfalls als alleinige Maßnahme gegen Krusten zu empfehlen.

## 2.1.4 Salzbildung

### Erscheinungsbild

Salze bilden einen feinen Flaum auf der Fassadenoberfläche oder lagern sich in Form von Krusten ab. Sie sind von weißer bis weißlicher Färbung. Im tieferen Porenraum liegen Salze in gelöster Form vor.

**Art der Salze:** An Bauwerken nachgewiesen sind mehrere 100 unterschiedliche Verbindungen, die als bauschädliche Verwitterungsneubildungen bezeichnet werden können. In Tabelle 32 sind jedoch nur die am häufigsten auftretenden Stoffe aufgeführt.

### Untersuchung

Analyse der Salze: (Kapitel 1.3.3.4)

Häufigste Anionen: Sulfat, Chlorid, Nitrat

Untergeordnete Anionen: Phosphat, Hydrogencarbonat, Carbonat

Häufigste Kationen: Kalium, Natrium, Magnesium, Calcium,

**Halbquantitative Untersuchung:** mittels Röntgendiffraktometrie (Kapitel 1.3.3.1), zur Ermittlung der Zusammensetzung von Salzgemischen

**Ziel der Analysen:**

- Kenntnis über den Umfang der Gesteinsverwitterung, Alterationsvorgänge im Naturstein, Verträglichkeit mit neu einzubauendem Mörtel (Verfugen, Versetzen, Verpressen)
- Kenntnis der hygroskopischen Eigenschaften, zur Bewertung von Mauerwerksdurchfeuchtungen.

### Schadensmechanismen

siehe Tabelle 33

**Tabelle 32** ■ Übersicht über die wichtigsten im Mauerwerk vorkommenden Salze

Formel	chemische Bezeichnung	mineralogische Bezeichnung
<b>Carbonate:</b> $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{ H}_2\text{O}$	Natriumcarbonat	Natrit, Soda
$\text{K}_2\text{CO}_3$	Kaliumcarbonat	Pottasche
$\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2 \text{ H}_2\text{O}$	Natriumhydrogencarbonat	Trona
<b>Chloride:</b> $\text{NaCl}$	Natriumchlorid, Kochsalz	Halit
$\text{CaCl}_2$	Calciumchlorid	Hydrophylit
$\text{CaCl}_2 \cdot 6 \text{ H}_2\text{O}$	Calciumchlorid-Hexahydrat	Antarcticit
<b>Sulfate:</b> $\text{CaSO}_4$	Calciumsulfat	Anhydrit
$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{ H}_2\text{O}$	Calciumsulfat-Dihydrat	Gips
$\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{ H}_2\text{O}$	Magnesiumsulfat-Heptahydrat	Epsomit, Bittersalz
$\text{Na}_2\text{SO}_4$	Natriumsulfat	Thenardit
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{ H}_2\text{O}$	Natriumsulfatdekahydrat	Mirabilit, Glaubersalz
$\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$	Kaliumnatriumsulfat	Aphtitalit, Glaserit
$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{ CaSO}_4 \cdot 32 \text{ H}_2\text{O}$	Calciumaluminiumsulfathydrat	Ettringit
<b>Nitrate:</b> $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6 \text{ H}_2\text{O}$	Magnesiumnitrat	Nitromagnesit
$5 \text{ Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4 \text{ H}_2\text{O}$	Calciumnitrat	echter Mauersalpeter
$\text{KNO}_3$	Kaliumnitrat	Nitrokalit, Kalisalpeter

**Tabelle 33** ■ Schadensmechanismen von Salzen oder Salzlösungen [193]

Mechanismen	Wirkung und Auswirkung
Kristallisationsdruck <ul style="list-style-type: none"><li>■ hydrostatischer Kristallisationsdruck oder Hydrationsdruck</li><li>■ linearer Wachstumsdruck</li></ul>	<p>Druckaufbau, wenn das weitere Wachstum der Kristalle durch die Porenwand oder andere Kristalle behindert wird.</p> <p><b>Hydrationsdruck</b> bezeichnet den Druck, der durch Volumenvergrößerung beim Übergang des Salzes in wasserreichere Phasen entsteht.</p> <p>Der <b>lineare Wachstumsdruck</b> tritt besonders bei nadeligen oder stängeligen Kristallen auf und wird durch das Wachstum in einer kristallografisch bevorzugten Richtung bewirkt.</p> <p>In großen Poren ist das Wachstum von Salzen gegenüber kleinen Poren energetisch bevorzugt. Bei hohem Anteil an kleinen Poren, von denen Nachschub an Salzlösung für die Kristallisation in großen Poren kommt, sind daher hohe Sprengdrücke wahrscheinlicher.</p> <p>Durch zyklisches Auftreten des Kristallisationsdrucks erfolgt eine Schwächung der Korn-Korn-Bindungen und damit des Gesteinsgefüges.</p>
Lösungsreaktion	<p>Beeinflussung der Löslichkeit der Komponenten des Gesteins durch die Salzlösung (Eigen- und Fremdioneneffekt)</p> <p>Lockerung des Gefüges durch Lösung von Partikeln</p>
Fällungsreaktion	<p>Ausfällung von Stoffen durch Reaktion von Komponenten der Salzlösung mit dem Gestein, meist verbunden mit Volumenausdehnung und Gefügebelastrung des Gesteins</p>
hygrische Dehnung	<p>feuchtigkeitsabhängige Volumenänderung von mit Salzen belasteten Baustoffen, damit Schwächung des Gefüges</p>
osmotischer Druck	<p>Durch osmotische Bewegung von Lösungen geringerer Konzentration zu Lösungen höherer Konzentration, die voneinander durch eine semipermeable Membran getrennt sind, erfolgt in den Lösungen höherer Konzentration eine Volumenzunahme und damit ein Druckaufbau. Als semipermeable Membran können kolloide Phasen im Intergranularbereich wirken.</p>
dynamisch-synergetische Effekte	<p>Beim Austrocknen von Salzlösungen bleiben poröse Filme zurück, die die Porenwandoberfläche zumindest punktuell überziehen. Durch zyklische Feuchteänderung stellt sich eine Strukturänderung der Salze ein. Die damit verbundenen Schubspannungen schwächen das Gefüge.</p>
chemomechanische Effekte	<p>Änderung des Zeta-Potenzials mineralischer Baustoffe durch Salzionen. Da das Zeta-Potenzial in Korrelation mit mechanischen Eigenschaften des Materials steht, wirkt sich seine Änderung z. B. auf die Härte, Bruchzähigkeit oder Festigkeit aus.</p>
Spannungskorrosion	<p>Salze oder Salzlösungen verringern die Zug-, Biegezug- und Druckspannungen von porösen, mineralischen Baustoffen, die mechanisch belastet sind.</p>

### Herkunft der Salze:

- Eigensalze aus dem Mauerwerk selbst
- aus dem Untergrund, durch aufsteigende Feuchte
- Reaktionsprodukte verschiedener Baumaterialien
- Reaktion von Immissionen mit den Baustoffen

Einflussfaktoren: Luftfeuchte, Mauerwerksfeuchte, Porenradialverteilung

#### 2.1.4.1 Schadensursache: aufsteigende Feuchtigkeit

Aufsteigende Feuchtigkeit ist ein Medium zur Lösung und zum Transport von Salzen, die nach den vorgenannten Schadensmechanismen wirken können. Beim Verdunsten dieser Feuchtigkeit kristallisieren die Salze aus (Bild 37).

### Nachweismethoden

#### Vertikales Bohrprofil:

- Bohrungen im Trockenbohrverfahren aus übereinanderliegenden Probe-  
stellen, z. B. 0,5 m, 1,0 m und 1,5 m
- Ermittlung des Durchfeuchtungsgrades (Kapitel 1.3.3.3.3)
- Aufsteigende Feuchtigkeit ist durch erhöhte, mit der Höhe des Bauteils  
abnehmende Durchfeuchtungsgrade nachweisbar.



**Bild 37** ■ Starke Durchfeuchtung des Mauerwerks mit Salzausblühungen

## Sanierung

### 1. Horizontalabdichtung (Kapitel 1.4.8.1)

Vielfach ist aufsteigende Feuchtigkeit auch mit anderen Feuchtequellen wie z. B. seitlich eindringender oder hygroskopischer Feuchtigkeit verbunden, so dass **flankierende Maßnahmen** (z. B. Dränung, Entsalzung) getroffen werden müssen.

### 2. Nach dem Abstellen der Feuchtezufuhr wird eine **Entsalzung** (Kapitel 1.4.9, Tabelle 19) vorgenommen.

Methoden:

- Anlegen von Kompressen
- Injektionskompressen
- Entsalzen im Wasserbad: nur bewegliche Objekte
- elektrophysikalische Methoden

### 3. **Sanierung von Naturstein:** In Abhängigkeit vom Schadensgrad kommen die nachfolgend genannten Verfahren einzeln oder auch in Kombination zum Einsatz. Eine generelle Vorgabe für die Vorgehensweise kann nicht gegeben werden.

- Austausch stark geschädigter Werksteine
- Entsalzen (Kapitel 1.4.9)
- Abbürsten der auskristallisierten Salze
- Auskratzen von Fugen, Reinigung, Neuverfugen

### 4. Verputztes Mauerwerk (Kapitel 2.3)

## Nicht wirksame Sanierungsmethoden

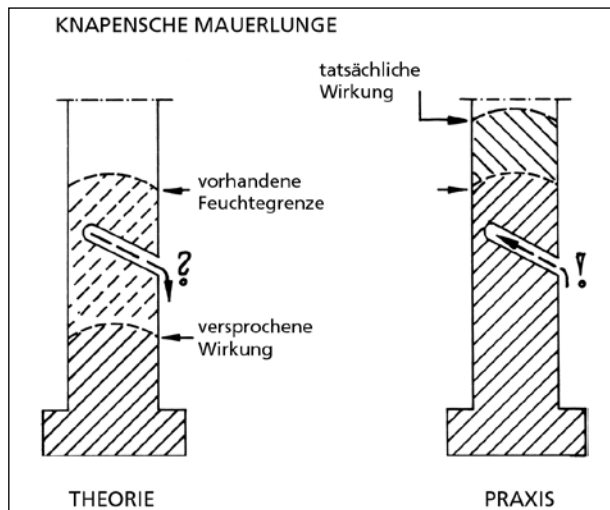
**Knapenröhrchen:** Das Knapenröhrchen oder die sogenannte Knapen'sche Mauerlunge besteht aus einem Tonröhrchen, das mit Kalkmörtel in ein Bohrloch mit leichtem Gefälle zur Mauerwerksoberfläche eingesetzt wird (Bild 38). In das Röhrchen soll die in der Mauer enthaltene Feuchtigkeit diffundieren, verdunsten und als feuchte, schwere Luft 'abfließen'. Da die relative Feuchte der Außenluft nicht immer niedriger als die Feuchtigkeit innerhalb des Röhrchens ist, kann das Prinzip auf Dauer nicht funktionieren. Die häufig angetroffenen Kunststoff- oder Metallröhrchen können nur durch ihre Perforation, aber nicht durch Diffusion Wasser aufnehmen. Bei Einbau in dichtem Zementmörtel wird die Wasseraufnahme erst recht herabgesetzt (Bild 39).

**Verdunstungsgraben:** Die Verdunstungsgräben verlaufen im Erdreich längs des betreffenden Mauerwerks. Durch eine Öffnung soll kalte Außenluft einströmen und an der sonnenbeschienenen Seite durch einen etwas höher gelegenen Schacht wieder ausströmen. Die leichtere, warme Luft erzeugt ein

**Bild 38** ■ Knapenröhrchen an der Oberkante eines Kellermauerwerks



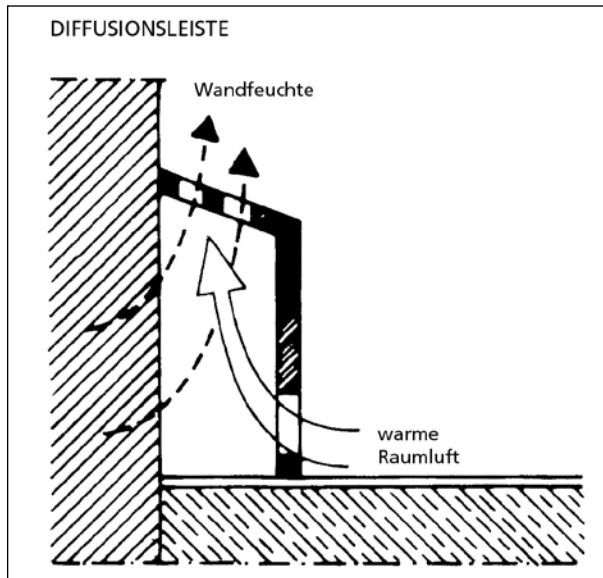
**Bild 39** ■ Wirkungsprinzip der Knapen'schen Mauerlunge [127, S. 101]



Dampfdruckgefälle, das für den Transport der Luft sorgt. Die vorbeiströmende Luft nimmt dabei Feuchtigkeit auf.

Die einströmende Außenluft kühlt sich jedoch meist an den durchfeuchteten Grundmauern ab und kondensiert, d. h. bei entsprechender Witterung führt der Belüftungsgraben zu einer zusätzlichen Durchfeuchtung der Wand.

**Diffusionsleiste:** Im Innern von Räumen soll die Mauerwerksfeuchte durch die in einer Leiste entlangströmende warme Raumluft aufgenommen werden und durch die obere Öffnung der Leiste hinausströmen (Bild 40). Hier wird es ebenfalls eher zu einer Kondensation an der Mauer kommen.



**Bild 40** ■ Wirkungsprinzip der Diffusionsleiste [127, S. 101]

## Schadensvermeidung

- Einbau einer Horizontalabdichtung nach DIN 18195 BAUWERKSABDICHTUNGEN
  - Material: horizontale Dichtungsbahnen
  - Einbau im unteren Teil von Mauern bis ca. 30 cm über Oberkante Gelände
  - Verbindung der Horizontalabdichtung mit einer Vertikalabdichtung
  - zusätzliche horizontale Abdichtung bei unterhalb der Horizontalabdichtung liegendem Fußboden
- Einbau einer Wandheizung: Falls Abdichtungsmaßnahmen aufgrund örtlicher Gegebenheiten nicht möglich sind, ist auch die Installation einer Wandheizung zur Erhöhung der Wandtemperatur und Vermeidung von Feuchteschäden möglich. Ausführung z. B. als Unterputzheizung mit wasserführenden Rohren aus Metall oder Kunststoff, als vorgefertigte Elemente (Bild 41).



**Bild 41** ■ Beispiel für eine Wandheizung [194]

#### 2.1.4.2 Schadensursache: seitlich eindringende Feuchtigkeit

Herkunft und Transport der Salze:

- wasserführende Schichten, Sickerwasser, besonders bei Hanglage
- Eigensalze des Mauerwerks

**Formen von seitlich eindringendem Wasser:** Entsprechend der Norm für Bauwerksabdichtungen DIN 18195-4 [129] bzw. DIN 18195-6 [130] wird dabei unterschieden zwischen Bodenfeuchte, nichtstauendem und stauendem Wasser.

**Bodenfeuchtigkeit** ist charakterisiert durch kapillar gebundenes Wasser oder durch Kapillarkräfte fortleitbares Wasser. Außerdem ist darunter von Niederschlägen herrührendes, nichtstauendes Sickerwasser bei senkrechten und unterschrittenen Wandbauteilen zu verstehen. Abdichtungen gegen Bodenfeuchte sind auf nichtbindige Böden beschränkt, die einen Wasserdurchlässigkeitsbeiwert  $k > 10^{-4} \text{ m/s}$  haben.

Unter **nichtstauendem Wasser** wird nach dieser DIN tropfenförmiges Wasser verstanden, wie es z. B. aus Niederschlägen erzeugt wird, und das auf die Abdichtung keinen oder nur vorübergehend einen geringfügigen hydrostatischen Druck ausübt.

Stauendes oder drückendes Wasser übt einen hydrostatischen Druck aus.



## Nachweismethoden

**Bohrkernproben:** Der Durchfeuchtungsgrad wird an trocken gebohrten Bohrkernproben aus dem Mauerwerk unter GOK ermittelt.

- Außenmauerwerk:  
vertikales und horizontales Bohrprofil mit ca. gleichbleibenden Durchfeuchtungsgraden
- Innenmauern oder Außenmauern rechtwinklig zur durchfeuchteten Außenmauer:  
horizontales Bohrprofil mit abnehmenden Durchfeuchtungsgraden (mit größerer Entfernung von der Feuchtequelle), vertikales Bohrprofil mit abnehmenden Durchfeuchtungsgraden

**Bodenuntersuchung:** Um die Beanspruchung durch seitlich eindringendes Wasser festzulegen, sind entsprechend der DIN 18195 die Bodenart und der höchste Grundwasserstand am Bauwerk zu ermitteln. Der Durchlässigkeitsbeiwert ist für die Beurteilung von Bodenfeuchtigkeit, nichtdrückendem oder drückendem Wasser erforderlich.

## Sanierung

siehe Kapitel 1.4.8

- Vertikalabdichtung
- Innenabdichtung
- Dränung

## Schadensvermeidung

Für Neubauten sind die erforderlichen Abdichtungsmaßnahmen stets als Außenabdichtung in der DIN 18195 geregelt. Neben der Vertikalabdichtung ist mindestens eine Ebene der Horizontalabdichtung verlangt.

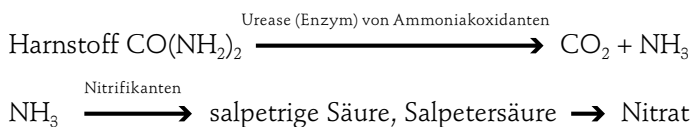
Darüber hinaus können Abdichtungen mit nicht in der DIN enthaltenen mineralischen Stoffen vorgenommen werden. Diese Stoffe sind in den Regeln des Handwerks und der Industrie festgelegt, wie z. B. in der RICHTLINIE FÜR DIE PLANUNG UND AUSFÜHRUNG VON ABDICHTUNGEN VON BAUTEILEN MIT MINERALISCHEN DICHUNGSSCHLÄMMEN der Deutschen Bauchemie [133] und der RICHTLINIE FÜR DIE PLANUNG UND AUSFÜHRUNG VON ABDICHTUNGEN ERDBERÜHRTER BAUTEILE MIT FLEXIBLEN DICHUNGSSCHLÄMMEN der Deutschen Bauchemie [134].

### 2.1.4.3 Schadensursache: Nutzung

Bezüglich der Salzbelastung müssen die jeweiligen Nutzungen der Gebäude berücksichtigt werden. Besonders zu beachten sind Lagerung bestimmter Materialien und landwirtschaftliche Nutzung.

#### Schadensmechanismen

- Gebäude, die zur Tierhaltung genutzt werden oder worden sind, weisen durch den anfallenden **Tierdung** eine erhöhte Nitratbelastung auf.



Verwesung von Leichen → Nitrate, bes.  $\text{KNO}_3$ , Ammoniumsalze und andere Stickstoffverbindungen

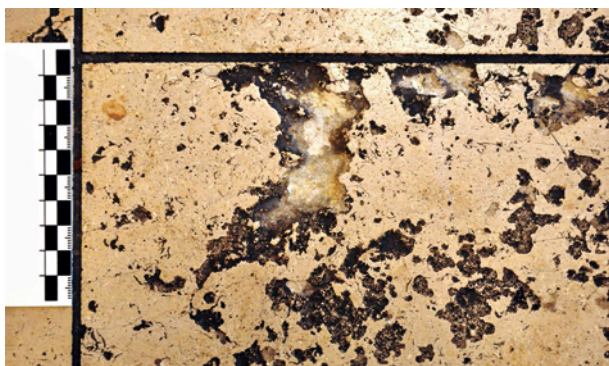
- Eine weitere Schadstoffquelle ist **Schießpulver** in historischen Festungsanlagen. Zusammensetzung: Kali-Salpeter/Holzkohle/Schwefel = 3/2/1

#### Sanierung

- Abstellung der Feuchtezufuhr (Kapitel 1.4.8)
- Sanierung des Natursteins: Entsalzung (Kapitel 1.4.9), Steinmetzarbeiten, objektabhängig (Kapitel 1.4.4 und 1.4.5)
- Auskratzen von Fugen, Neuverfugen (Kapitel 1.4.6)

### 2.1.4.4 Schadensursache: Tausalz

Tausalz wird besonders in Eingangsbereichen, auf Terrassen und Freitreppenanlagen verwendet. Auch an Brüstungen von Brücken sowie an den Brückenspeilern sind Tausalzschäden zu beobachten (Bild 42).



**Bild 42** ■ Bodenbelag aus dichtem Jurakalkstein mit Tausalzschäden

Mit Tausalz belastete Steine weisen Gefügauflockerung auf, die vor allem zu Absandungen oder Schalenbildungen führt.

## Untersuchung

siehe Kapitel 2.1.4 und 1.3.3.4

## Schadensmechanismen

NaCl kann je nach Übersättigung der Lösung erhebliche Kristallisationsdrucke aufbauen.  $\text{CaCl}_2$  hat eine relativ hohe Löslichkeit von 745 g/l bei 20 °C, kann also gut im durchfeuchteten Baustoff transportiert werden.

Chemisch reines NaCl ist nicht hygroskopisch. Am Bauwerk tritt jedoch immer verunreinigtes NaCl auf.  $\text{MgCl}_2$  und  $\text{CaCl}_2$  sind beides sehr hygroskopische Salze, d. h. diese Salze führen zu einer weitergehenden Durchfeuchtung der Bauteile (Kapitel 2.1.6.3).

**Einflussfaktoren:** Zustandsform, Lösungsgenossen, Luftfeuchte

## Sanierung

Sofern die weitere Verwendung von Tausalz ausgeschlossen ist, können die betreffenden Bereiche mit geeigneten Verfahren entsalzt werden (Vor- und Nachteile siehe Kapitel 1.4.9).

Im jeweiligen Schadensfall muss am Objekt entschieden werden, ob Natursteinarbeiten (Kapitel 1.4.4) und evtl. Restauriermörtelarbeiten (Kapitel 1.4.5) durchgeführt werden müssen. Eine Neuverfugung mit Entfernung des alten Mörtels ist erforderlich, wenn auch der Fugenmörtel erhöhte Salzgehalte, die sich aufgrund der höheren Wasseraufnahmefähigkeit gegenüber dem Stein ergeben, aufweist (Kapitel 1.4.6).

## Schadensvermeidung

- Vermeidung von Tausalz
- Hydrophobierung, um das Eindringen von Tausalzlösungen in den Stein zu verhindern: jedoch keine uneingeschränkte Empfehlung aufgrund der damit zusammenhängenden Risiken (Kapitel 1.4.11)

### 2.1.4.5 Schadensursache: Materialreaktion

Durch Lösungs- und Fällungsreaktionen innerhalb eines Materials oder zwischen verschiedenen Baustoffen können bauschädlich wirkende Salze entstehen.

- Kalksinterbildung → (Kapitel 2.1.3)
- Zementmörtel oder Betone → Lieferant von Alkalien und Carbonat

Häufige Mineralien:

Natrit  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$

Mirabilit  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$

Epsomit  $\text{Mg}_2\text{SO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$

Analyse der Salze: (Kapitel 1.3.4)

Durchfeuchtungsursache:

- aufsteigende Feuchtigkeit (Kapitel 2.1.4.1)
- seitlich eindringende Feuchtigkeit (Kapitel 2.1.4.2)
- durch konstruktive Mängel eindringendes Wasser

## Sanierung

- Abstellen der Feuchtigkeitzufuhr
- Salzentfernung:
  - Abbürsten
  - mechanisch mit Hammer und Meißel bei Sinterbildung
- Steinmetzarbeiten: nach Bedarf (Kapitel 1.4.4 und 1.4.5)

## Schadensvermeidung

Unterbindung von Feuchtezufuhr

### 2.1.5 Verfärbung

#### 2.1.5.1 Schadensursache: handwerkliche Mängel beim Aufbringen von Konservierungsmitteln

#### Erscheinungsbild

##### 1. Hydrophobierung

Hydrophobierungsmittel, die partiell eine ungenügende Eindringtiefe im behandelten Stein haben, werden infolge der UV-Strahlung und sonstiger atmosphärischer Einflüsse im Laufe der Zeit abgebaut und haben keine schützende Wirkung mehr. Sie setzen sich von dunkel gefärbten Bereichen mit wirksamer Wasserabweisung (Hydrophobie) ab, da dort häufiger ein Wasserfilm an der Oberfläche entsteht, in den sich Schmutzpartikel und Mikroorganismen einlagern [195] (Bild 43).

Die Ursache liegt in einem ungleichmäßigen Auftrag des Hydrophobierungsmittels. Nur bei sorgfältiger Applikation ist eine gleichmäßige Eindringtiefe



**Bild 43** ■ Fleckenartige Verfärbung durch unterschiedlich abgebautes Hydrophobierungsmittel

zu erzielen. Liegt ein zu großer zeitlicher Abstand zwischen den einzelnen Arbeitsgängen, so ist es nicht möglich, flächig die gleiche Materialmenge aufzubringen.

## 2. Festigung

- mögliche Farbtonvertiefung partiell gefestigter Steine
- Handwerkliche Mängel, z. B. Tropfnasen auf Steinoberfläche (Bild 44)

## Nachweis

- visuell
- Nachweis über die Eindringtiefe und Wirkung des Konservierungsmittels (Kapitel 1.3.3.6)
- Information aus Bauunterlagen über vorangegangene Hydrophobierung bzw. Festigung



**Bild 44** ■ Handwerkliche Mängel bei partieller Festigung

## Sanierung

Eine Sanierung fleckig verfärbter Steine ohne erheblichen Substanzverlust ist in der Praxis nicht möglich, da der im Porenraum abgeschiedene Wirkstoff nicht mehr zu entfernen ist. Generell wird eine Hydrophobierung im Laufe von ca. 20 Jahren abgebaut, abhängig von der Eindringtiefe und Konzentration, sodass eine Wiederholung der Maßnahme erforderlich wird. Dies ist jedoch nur bei gleichmäßig imprägnierten Steinen sinnvoll.

## Schadensvermeidung

Voruntersuchungen zur Hydrophobierung bzw. Festigung:

- Überprüfung der Parameter wie Eindringtiefe, Auftragsmenge und Konzentration des Konservierungsmittels im Labor (Kapitel 1.3.3.6),



- genaue und sorgfältige Durchführung der Maßnahme durch einen Fachbetrieb,
- keine Hydrophobierung von Teilbereichen eines Steines wegen Schäden durch unterschiedliche Durchfeuchtung sowie der unterschiedlichen Farbentwicklung im Laufe der Zeit,
- bei partieller Festigung:
  - Teilbereiche sollten nur ganze Werksteine oder Teilflächen umfassen, die von Fugen umgrenzt sind. Eine partielle Steinfestigung innerhalb eines Werksteines birgt Risiken hinsichtlich Festigkeitsprofil und Farbton.

### 2.1.5.2 Schadensursache: Durchfeuchtung

#### Erscheinungsbild

Aufgrund punktuell erhöhter Feuchtigkeit kommt es zu einem fleckigen Erscheinungsbild.

##### 1. Aufsteigende Feuchtigkeit

Fehlende Abdichtung führt zu erhöhter Feuchtigkeitsaufnahme insbesondere des Fugenmörtels von Bodenplatten oder Treppen

- Mobilisierung von Mineralen im angrenzenden Stein
- fugenparallele Verfärbung

##### 2. Hydratation des Verlegemörtels

Unvollständiges Abbinden des Verlegemörtels vor dem Verfugen

- Diffusion des überschüssigen Anmachwassers in Fugenmörtel oder Bodenplatten
- Verfärbung durch Abscheidung von Carbonat, evtl. Mobilisation von Fe-Mineralien

#### Untersuchungen

- Salzanalyse des Fugenmörtels (Kapitel 1.3.3.4)
- Ermittlung der Feuchtezufuhr (Kapitel 1.3.3.3)
- Überprüfung von Hydrophobierungsmaßnahmen (Kapitel 1.3.3.6.2)
- Überprüfung der Bodenabdichtung durch Bohrkernproben

#### Sanierung

##### 1., 2. Aufsteigende Feuchtigkeit und Hydratation des Verlegemörtels

Bodenplatten, die aufgrund einer fehlenden Untergrundabdichtung durchfeuchtet und verfärbt sind, werden im Zuge einer Sanierung des Untergrundes aufgenommen und ausgetauscht. Vorher muss die Abdichtung so wieder hergestellt werden, dass zukünftige Durchfeuchtungen unterbleiben.

## Schadensvermeidung

### 1. Aufsteigende Feuchtigkeit

Die Gefahr von aufsteigender Feuchtigkeit ist auszuschließen (Kapitel 2.1.4.1).

### 2. Hydratation des Verlegemörtels

Die Fugen sollen so lange offen bleiben und Migrationswege für überschüssiges Anmachwasser bilden, bis die Reaktion abgeschlossen ist.

Bei der Verlegung von Bodenplatten sind die Verlegerichtlinien zu beachten.

### 2.1.5.3 Schadensursache: Mobilisation von Mineralen

#### 1. Gesteinsminerale

Eisen- und Manganverbindungen, die als Minerale im Stein enthalten sind oder Kluftmineralisationen bilden, können durch verschiedene Agenzien gelöst werden und zeigen dann braune Verfärbungen, z. T. als Rostfahnen, an der Gesteinsoberfläche.

#### Nachweis:

- Rasterelektronenmikroskopie (Kapitel 1.3.3.1)
- quantitative Analyse (Kapitel 1.3.3.4)

**Schadensmechanismus:** Die als wasserunlöslich geltenden Metalloxide werden z. B. durch säurehaltige Reinigungsmittel oder durch die Lösemittel von Hydrophobierungen gelöst und transportiert. An dem alkalischen Fugenmörtel oder auch Restauriermörtel wird das gelöste Mn bzw. Fe als Mangan- bzw. Eisenoxid wieder ausgefällt.

#### 2. Kupferbleche

Eine grünliche Verfärbung kann durch das Oxidationsprodukt von Kupferblechen erfolgen, das durch Regenwasser an die Fassade gelangt. Je nach Standort bildet sich basisches Kupfercarbonat, -sulfat oder -chlorid. Dies gilt auch für verwitterte Kupfer- bzw. Bronzefiguren (Bild 45).

## Sanierung

Verfärbungen, die aufgrund von chemischen Umwandlungsreaktionen entstanden sind, können durch Reinigungsverfahren, wie z. B. das Rotationswirbelstrahlverfahren oder das Mikrotrockenstrahlen (Kapitel 1.4.1), entfernt werden. Hierbei ist je nach Intensität der Verfärbung ein Oberflächenabtrag der Fassade nicht auszuschließen. Die Wirkung und Einstellparameter der Verfahren sind an einer Musterfläche zu ermitteln.





**Bild 45** ■ Grünliche Verfärbung durch ablaufendes Wasser der oxidierten Kupferfigur

Verfärbungen durch Kupferbleche können durch schwach saure Lösungen wie verdünnte Zitronensäure oder Essigsäure entfernt werden. Bewährt hat sich auch die Anwendung von einer Paste mit Komplexbildnern [89], (Tabelle 10).

## Schadensvermeidung

### 1. Gesteinsminerale

Auf Naturstein sollten grundsätzlich keine chemischen Reinigungsmittel eingesetzt werden, da durch Säuren oder Laugen Salze entstehen, die abgesehen von der optischen Beeinträchtigung zu unerwünschten gesteinschädigenden Reaktionen führen.

Die Reaktion von Kluftbelägen mit Lösemitteln stellt einen Sonderfall dar, der vorab an einer Musterfläche zu überprüfen ist. Als Konservierungsmittel können lösemittelfreie Produkte eingesetzt werden, für die es jedoch noch keine langjährigen Erfahrungswerte gibt.

## 2. Kupferblech

Zur Vermeidung von Reaktionsprodukten aus Blechabdeckungen – im Wesentlichen Kupferblech – kann vorpatiniertes Kupferblech verwendet werden. Des Weiteren sollte auf ein geschlossenes Regenwasserableitungssystem geachtet werden, d.h. auf das Abdeckblech spritzendes Wasser muss in Rinnen bzw. Rohren abgeführt werden. Das Abdeckblech von Gesimsen oder Sohlbänken sollte einen ausreichenden Überstand von ca. 2 cm haben und eine min. 5 cm lange Abkantung zur Vermeidung von Ablaufspuren aufweisen (Kapitel 1.4.17).

## 2.1.6 Schimmelbildung und/oder Feuchteflecken

### 2.1.6.1 Schadensursache: Kondensation

#### Erscheinungsbild

Kondensation ist in Innenräumen besonders in Außenecken an Feuchteflecken, meist verbunden mit Schimmel- und/oder Moos- und Algenbewuchs, zu erkennen (Bild 46).

Die Ursache liegt in der Taupunktunterschreitung der Raumluft beim Auftreffen auf eine kältere Bauteiloberfläche.

#### Untersuchung

Um Kondensationsschäden nachweisen zu können, werden nach der DIN 4108-4 WÄRMESCHUTZ IM HOCHBAU, WÄRME- UND FEUCHTESCHUTZTECHNISCHE



**Bild 46** ■ Schimmelpilzbildung durch Kondenswasser in einer Raumecke

KENNWERTE feuchteschutztechnische Berechnungen durchgeführt (Kapitel 1.3.3.3.6).

Mithilfe von Temperatur- und Feuchtemessungen der Innen- und Außenluft sowie der Bauteiloberflächen kann ebenfalls nach den vorgenannten Gesetzmäßigkeiten festgestellt werden, ob Tauwasser ausfällt.

## Sanierung

Da auf Innenoberflächen von Bauteilen Tauwasser ausfällt, wenn die Temperatur dieser Flächen unter der Taupunkttemperatur der Raumluft liegt, gibt es für die Vermeidung von Tauwasserschäden folgende Möglichkeiten:

- Erhöhung der Raumtemperatur
- Lüften des Raumes, um Feuchtigkeit abzuführen
- Vermeiden von hoher Luftfeuchtigkeit
- Anordnung der Heizkörper unterhalb von Fenstern, um die Fenster mit geringeren Oberflächentemperaturen ausreichend zu erwärmen
- zusätzliche Wärmedämmung der Außenwände in Raumecken, da Ecken eine geringere Oberflächentemperatur haben
- Vermeidung von Möbeln an Außenwänden, da durch Möbel die Luftbewegung an den Wandflächen reduziert und die Oberflächentemperatur der Wände verringert wird
- Anbringen einer Wärmedämmung, da dadurch der Wärmedurchlasswiderstand erhöht wird (Kapitel 1.4.18)

Mindestwert des Wärmedurchlasswiderstands von Außenwänden nach DIN 4108-2:  $1,20 \text{ (m}^2 \cdot \text{K) / W}$

Dies entspricht einem Wärmedurchlässigkeitskoeffizienten  $U = 0,83 \text{ W / (m}^2 \cdot \text{K)}$

Als Höchstwert des Wärmedurchlässigkeitskoeffizienten gilt nach EnEV 2009  $U \leq 0,24 \text{ W / (m}^2 \cdot \text{K)}$

- Innendämmung (Kapitel 1.4.18.3)  
Gefahr von Kondenswasserausfall im Mauerwerk  
Lösung: kapillaraktive Innendämmung oder innen liegende feuchteadaptive Dampfsperre mit dampfdurchlässigen Dämmungen
- Außendämmung: bevorzugt einzusetzen, da kein Kondenswasserausfall im Wandquerschnitt

## Schadensvermeidung

Neue Bauteile müssen wärme- und feuchteschutztechnische Anforderungen nach DIN 4108 bzw. nach Energieeinsparverordnung erfüllen.

### 2.1.6.2 Schadensursache: konstruktiv

#### Schadensquelle

- defekte Regenfallrohre
- eingemauerte, defekte Wasserrohre
- durchfeuchtete Wärmedämmung

#### Erscheinungsbild

Fleckige Durchfeuchtung der Wand:

- im Verlauf der Regenwasserableitung, abhängig von Regenperioden,
- plötzliches Auftreten bei Rohrbruch, starke Vergrößerung,
- großflächig verteilte Flecken, evtl. auch fugenparallel, bei durchfeuchteter Wärmedämmung.

#### Sanierung

- Vermeiden der Feuchtezufuhr
- konstruktive Maßnahmen
- Ausbessern des Fugennetzes
- Natursteinarbeiten bzw. Erneuern der Fassadenbekleidung
- Ausbessern von Putz- und Anstrichschäden

#### Schadensvermeidung

- funktionstüchtige und konstruktiv einwandfreie Wirkung von Wasserrohren, Regenwassersystemen, Dachrandabdichtungen
- intaktes Fugennetz

### 2.1.6.3 Schadensursache: hygroscopische Feuchtigkeit und Hydratation

#### Erscheinungsbild

Unterschiedlich scharf begrenzte Feuchteflecken, die sich in Zeiten hoher Luftfeuchtigkeit einstellen.

#### Definition

Hygroscopische Stoffe wirken wasseranziehend, d. h. sie nehmen Wasser aus der Umgebung auf, indem sie in Lösung gehen.

Über jeder Phase stellt sich ein Dampfdruck ein. Es besteht erst dann ein stabiler Zustand, wenn der Wasserdampfpartialdruck der Luft mit dem Dampfdruck des Stoffes im Gleichgewicht steht. Hygroscopische Stoffe mit einer hohen Löslichkeit weisen einen geringen Dampfdruck über der gesättigten

Lösung auf, d.h. diese Salze sind bemüht, Wasser so lange aufzunehmen, bis der Sättigungsdampfdruck mit dem Partialdruck des Wassers im Gleichgewicht ist.

Andere Salze kristallisieren je nach Feuchtegehalt der Luft in verschiedenen Hydratstufen aus, indem Wasser in das Kristall eingebaut wird.

Auch Tonminerale können hydratisieren, indem Wasser in die Zwischenschichten eingebaut wird.

Damit können hygroskopische Salze ohne Mitwirken von aufsteigender oder seitlich eindringender Feuchtigkeit eine Durchfeuchtung bewirken.

Auch durch Hydratation wird Feuchtigkeit aufgenommen, die bei sinkender relativer **Luftfeuchtigkeit** nur langsam über den Porenraum abgegeben wird und damit zu einer Retention der Feuchtigkeit im Baustoff führt.

### **Einflussfaktoren**

Gleichgewichtsfeuchte, Löslichkeit, Anwesenheit anderer Salze, Porenraumgeometrie

### **Hygroskopische Salze**

z.B.  $K_2CO_3$ ,  $CaCl_2$ ,  $MgCl_2$ ,  $Ca(NO_3)_2$ ,  $Mg(NO_3)_2$ ,  $NaNO_3$ ,  $NH_4NO_3$

Bauschädlich sind vor allem Salze, die sich bei niedrigen Temperaturen in wasserhaltige Phasen umwandeln oder in Lösung gehen.

### **Untersuchung**

- quantitative Salzanalyse (Kapitel 1.3.3.4.2)
- qualitative Salzanalyse (Kapitel 1.3.3.4.1)
- Messung des hygroskopischen Durchfeuchtungsgrades (Kapitel 1.3.3.3.5)

Hygroskopischer Durchfeuchtungsgrad: verputztes Mauerwerk weist im Putz höhere Durchfeuchtungsgrade auf als im Mauerwerk, da sich im Putz aufgrund des größeren Porenraumes mehr Salze anreichern.

### **Sanierung**

- Vermeidung der Feuchtezufuhr (Kapitel 1.4.8)
- Entsalzung (Kapitel 1.4.9)  
Methoden: Entsalzung im Wasserbad, Kompressen, Injektionskompressen, elektrolytische Verfahren

Die Wirkung ist je nach Salzart, -konzentration und Gestein unterschiedlich, sodass keine generelle Empfehlung gegeben werden kann.

## Schadensvermeidung

Damit keine hygroskopischen Salze in den Baustoff gelangen, muss die Feuchtezufuhr und damit der Transport gelöster Salze in den Baustoff vermieden werden (Kapitel 2.1.4).

### 2.1.7 Absanden

#### Erscheinungsbild

##### Definition

Absanden tritt bei Sedimentgesteinen auf, bei denen die Körner durch eine Matrix oder Zement, im folgenden Bindemittel genannt, verkittet sind. Durch Verändern oder Auflösen des Bindemittels lockert sich der Gefügeverband auf und es kommt zum Abrieseln der einzelnen Körner. Auch durch Herabsetzen des Korn-Korn-Kontaktes können einzelne Gesteinspartikel herausgelöst werden. Beim Absanden kommt es nicht zu einer Oberflächenverdichtung. Der Materialabtrag kann wenige mm bis cm betragen (Bild 47).

##### Vorkommen

Carbonatisch und tonig gebundene Sandsteine sind durch Auflösung bzw. Veränderung des Bindemittels durch Wasser oder Salz bevorzugt von Absanden betroffen. Bei den Quarzen oder Silikaten der kieseligen Sandsteine finden nur in geologischen Zeiträumen Lösungs- und Umwandlungsprozesse statt. Hier setzt das Absanden durch Wegführen untergeordnet vorhandener anderer Komponenten des Bindemittels oder mechanisch durch Winderosion ein.



**Bild 47** ■ Unterschiedlich starke Rückwitterung der Steinoberflächen durch Absanden

In der Natursteinverwitterung wird bei magmatischen Gesteinen wie z.B. Graniten die Ablösung von mittel- bis grobkörnigen Partikeln als **Abgrusen** bezeichnet. Dabei handelt es sich um Aggregate aus mehreren Gesteinskomponenten.

## Untersuchung

- visuell
- Abtasten der Gesteinsoberfläche

### 2.1.7.1 Schadensursache: Wasser

Durch ständiges Herablaufen von Wasser kann das Absanden ausgelöst werden.

## Schadensmechanismen

- Lösen von Bindemittel
- Quellen von Tonmineralien → hygrische Dehnung, Gefügebelastrung
- im Wasser transportierte Salze → Hydratationsdruck, Kristallisationsdruck, Umwandlungsreaktion, Scherkräfte (Kapitel 2.1.4)

## Sanierung

- Abstellen von ablaufendem Wasser durch konstruktive Maßnahmen
- Schutzmaßnahmen: Blechabdeckung, Abdichten von Fugen
- bei starkem Absanden, mehrere cm Substanzverlust: Steinaustausch, Vorsetzen von Platten (Kapitel 1.4.4)
- Bei geringem Absanden: steinmetzmäßiges Abarbeiten durch Abschleifen oder Bearbeiten mit Steinmetzwerkzeugen
- Steinfestigung (Kapitel 1.4.10)

Wichtig: Erzielung eines gleichmäßigen Festigkeitsprofils, sowohl innerhalb des Steines als auch im Vergleich zu benachbarten Steinen der Fassadenoberfläche → Voruntersuchungen (Kapitel 1.3.3.6.1)

In Anbetracht der Gefahren, die von einer unangepassten Festigung ausgehen, wird jedoch bei geringfügigen Absandungen von dieser Maßnahme abgesehen.

## Schadensvermeidung

Vermeiden der Feuchtezufuhr, s. o.



### 2.1.7.2 Schadensursache: Versalzung (Bild 48)

Transportwege von Salzen (Kapitel 2.1.4 und 2.1.7.1):

- ablaufendes Wasser durch konstruktive Schäden
- aufsteigende Feuchtigkeit
- seitlich eindringende Feuchtigkeit
- Spritzwasser
- Niederschlag

#### Schadensmechanismen

siehe Kapitel 2.1.4 und 2.1.7

#### Sanierung und Schadensvermeidung

siehe Kapitel 2.1.7.1



**Bild 48** ■ Extreme Rückwitterung des versalzten Türgewändes



### 2.1.7.3 Schadensursache: Behinderung der Wasserdampfdiffusion

#### Erscheinungsbild

- Blasenförmiges oder ganzflächiges Ablösen der Beschichtung, oft unter Mitnahme von Gesteinspartikeln
- Absanden der freigelegten Gesteinsoberfläche

#### Schadensmechanismus

Durch Anstriche oder Beschichtungen mit einem höheren Diffusionswiderstand als dem des Gesteinsmaterials wird die Verdunstung behindert. Die längere Durchfeuchtung dieser Zone begünstigt Mineralumwandlungen und -neubildungen und führt zu einer Lockerung des Gesteinsverbandes. Der Wasserdampfdiffusionswiderstand eines aus verschiedenen Schichten bestehenden Bauteils soll von innen nach außen abnehmen (Kapitel 1.3.3.3.8).

#### Untersuchung

- visuell
- Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit nach DIN EN ISO 12572 WÄRME- UND FEUCHTE-TECHNISCHES VERHALTEN VON BAUSTOFFEN UND BAUPRODUKTEN – BESTIMMUNG DER WASSERDAMPFDURCHLÄSSIGKEIT [75] (Kapitel 1.3.3.3.8)

#### Sanierung

- steinmetzmäßiges Abarbeiten
- evtl. Abbeizen und Festigung

#### Schadensvermeidung

Keine Verwendung von Anstrichen oder Beschichtungen mit höherem Diffusionswiderstand als dem des Gesteins.

### 2.1.7.4 Schadensursache: Winderosion

Winderosion entsteht in unseren Breitengraden durch starke Verwirbelung von Luft, beispielsweise in schlotartigen Öffnungen zwischen zwei hohen Bauwerksteilen. Die abrasive Wirkung entsteht durch im Luftstrom transportierte Gesteinspartikel, die z.B. auf benachbarten Steinoberflächen lose haften und abgelöst werden.

Typisch sind bauchige, vom Windstrom modellierte Oberflächen (Bild 49).



**Bild 49** ■ Tiefe Rückwitterung durch Winderosion

## Sanierung und Schadensvermeidung

Steinaustausch, i. d. R. bei starker Rückwitterung (Kapitel 1.4.4)

Konservierung: Steinfestigung nach umfassenden Voruntersuchungen (Kapitel 1.3.3.6 und 1.4.10)

### 2.1.8 Reliefbildung

#### Erscheinungsform

##### 1. Schichtparallele Reliefbildung

Relief durch verstärktes Absanden von schichtparallelen, weniger verwitterungsresistenten Gesteinslagen, z. B. Tonlagen (Bild 50)

##### 2. Alveolarverwitterung (Bild 51)

- Relief durch einzelne Vertiefungen, z.B. durch Herauswittern von Tongallen
- Alveolen können auch durch starke Windverwirbelung entstehen, wenn das Porenwasser nicht an der Oberfläche verdunstet, sondern im Innern der Pore unterhalb der Oberfläche. Im Verdunstungsbereich wird das Gefüge stärker aufgelockert. Dies kann zu einem regelrecht wabenartigen Verwitterungsmuster an der Gesteinsoberfläche führen. Dies tritt besonders in inhomogenen Steinen auf.

##### 3. Rahmenverwitterung

Relief durch Vertiefung der Gesteinsoberfläche innerhalb eines Quaders, während der fugenparallele Bereich erhaben stehen bleibt. Durch die Fugen wird



**Bild 50** ■ Schichtparallele Reliefbildung durch Herauswittern weicherer, toniger Lagen



**Bild 51** ■ Alveolarverwitterung einer Gesteinsoberfläche

dem Stein verstärkt Wasser zugeführt, während in weiterer Entfernung von der Fuge eher die Verdunstung einsetzt und bei Schadstoffbelastung zum Absanden führt.

## Untersuchung

visuell

## Sanierung

- Festigung (Kapitel 1.4.10)  
Wichtig: Vorversuche, Musterfläche
- Steinaustausch: abhängig von Objekt, Verwitterungsgrad (Kapitel 1.4.4)

## Schadensvermeidung

Ausgesuchtes Steinmaterial mit hoher Verwitterungsbeständigkeit und homogenem Aufbau beugt der Reliefbildung vor.

### 2.1.9 Schuppen

#### Erscheinungsbild

Unter Schuppen werden kleine, zusammenhängende Steinpartikel in der Größe von wenigen mm<sup>2</sup> bis cm<sup>2</sup> verstanden, die noch mit einer Teilfläche an der Gesteinsoberfläche haften. Oft ist der Prozess der Schuppenbildung mit Absandungen verbunden (Bild 52).



**Bild 52** ■ Starke Schuppenbildung auf der Oberfläche eines Sandsteins

## Untersuchung

visuell

### 2.1.9.1 Schadensursache: Ablösung von Schalen

#### Schadensmechanismus

Gesteinsoberfläche stellt Lockerungszone dar, an der sich die Schale abgelöst hat (Kapitel 2.1.10)

#### Sanierung

- bei starker Auflockerung der Oberfläche und Substanzverlust durch die bereits abgefallene Schale → Steinaustausch (Kapitel 1.4.4)
- geringer Schädigungsgrad → Abschleifen oder Zurückarbeiten mit Steinmetzwerkzeugen, Festigung der aufgelockerten Oberfläche (Kapitel 1.4.10)

#### Schadensvermeidung

- regelmäßige, schonende Reinigung zur Vermeidung von Schadstoffanlagerung mit Schalenbildung (Kapitel 1.4.1)
- Vermeidung von ungeeigneten Konservierungs- oder Beschichtungsmitteln

### 2.1.9.2 Schadensursache: Versalzung

#### Schadensmechanismen

- Transport von Salzen an die Gesteinsoberfläche (Kapitel 2.1.4), Kristallisations- und Hydratationsdrucke führen zur Ablösung des Gesteinsverbandes und zur Ablösung einzelner Schuppen
- Durch langfristig erhöhte Feuchtezufuhr über porösen Fugenmörtel kommt es auch zur Ausbildung von Schuppen entlang der Fugenflanken.

#### Sanierung

siehe Kapitel 2.1.9.1; zu Entsalzung siehe Kapitel 1.4.9

### 2.1.10 Flächige Schalen

#### Schadensursachen

- salzinduzierte Volumenveränderungen

- Kompaktion von Tonmineralien
- Frostsprengung
- Verdichtung der Oberfläche durch Festigung oder filmbildende Beschichtung
- Hinterwanderung von Hydrophobierungen mit Feuchtigkeit
- hygrische Längenänderung
- thermische Längenänderung
- Brand
- Steinbearbeitung

Die verschiedenen Ursachen können sowohl gleichzeitig als auch zeitlich versetzt wirksam werden.

### 2.1.10.1 Schadensursache: salzinduzierte Volumenveränderung

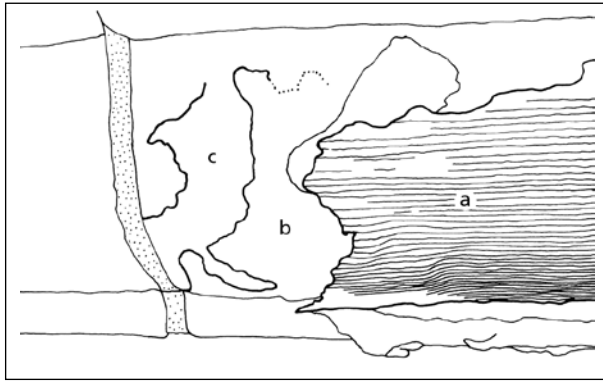
#### Schadensvorgang

- äußere Verdichtung (Kruste, Beschichtung mit Schutzsystemen, Salzanreicherung)
  - Behinderung der Wasserdampfdiffusion
- von innen wirksam werdende Verdichtung durch Auskristallisation und Porenraumverengung
  - Verlagerung der Verdunstungszone ins Gesteinsinnere
- Bildung einer Lockerzone durch Minerallösung und -neubildung, dadurch verursachte Volumenveränderung und Druckaufbau (Kapitel 2.1.4)
- Absprengung der Schale an der Lockerzone
- speziell bei Tonmineralien:
  - Kompaktion durch Salinität des Porenwassers, da die diffusen Doppelschichten schrumpfen
  - Kationenaustauschvorgänge an Tonmineralgrenzflächen
    - Umorientierung der Tonpartikel und Destabilisierung des Kornverbandes
    - Keilwirkung der Salze in Zwickelräumen der Poren
    - Schalenablösung

Entsprechend dem Schadensvorgang ergibt sich folgender Schalenaufbau (Bild 53):

- außen liegende Kruste
- Verdichtungszone
- Lockerungszone
- unveränderter Stein





**Bild 53** ■ Blasenförmige Ablösung einer Schale, unter der die Lockerungszone sichtbar ist  
a) Ablösung von außen liegender Kruste mit Verdichtungszone  
b) Ablösung weiterer Verdichtungszone  
c) Lockerungszone

## Erscheinungsbild

- blasig abgelöste Schale mit zusammenhängender Oberfläche, aber in Teilbereichen vom Untergrund abgelöst
- abgelöste Schale, d. h., die Gesteinsoberfläche fehlt in diesem Bereich, neu gebildete Steinoberfläche mit Schuppenbildung der Lockerungszone (Kapitel 2.1.9)
- mehrfache Schalen, die sich bei zyklischem Vorgang der Schalenbildung ergeben

Schalendicke: mm bis mehrere cm

Schalen aufgrund salzinduzierter Volumenausdehnung bilden sich oberflächenparallel, unabhängig von der Lage der Schichtung (Bild 54).

## Untersuchung

- visuell



**Bild 54** ■ Auskristallisation von Gips führte zur Schalenbildung

- Abklopfen zur Ermittlung von Hohlstellen
- quantitative Salzanalyse (Kapitel 1.3.3.4) zur Ermittlung eines Tiefenprofils der Salzverteilung als Auslöser der Schalenbildung
- Festigkeitsuntersuchung (Haftzug/Biegezug, Ultraschall) (Kapitel 1.3.3.6.1)
- Mikroskopie/Bildanalyse

## Sanierung

- Vorfestigen zum Vorbereiten der weiteren Restaurierung
- Fixieren der Schalenränder punktuell mit mineralischem Mörtel, Kieselsäureestermörtel oder Epoxidharzmörtel
- Unterfüttern und Anböschern der Schalen mit geeignetem Restauriermörtel, z. B. kieselsäureestergebundenem Mörtel
- Ausfüllen der Lockerbereiche unter den Schalen durch Injektion mit Kunstharz (Epoxidharz, Methacrylat) oder modifiziertem Kieselsäureester oder mineralisch, z. B. mit dispergiertem Weißkalkhydrat
- bei starker Ablösung aufgelockerter und gerissener Schalen → steinmetzmäßiges Zurückarbeiten: Ablösen der Schalen, Entfernen der pulvrigen Lockerschicht  
Steinfestigung zum Beenden der weiteren Schalenbildung
- tiefreichend geschädigte Steine mit mehrfacher Schalenbildung austauschen

## Schadensvermeidung

- bei Verdichtung der Oberfläche durch Krusten → regelmäßige Reinigung zur Erhaltung der Diffusionsfähigkeit
- Vermeidung der Salzzufuhr (Kapitel 2.1.4)



- intaktes Fugensystem
- intakte Oberfläche der Fassade
- regelmäßige Kontrolle der Entwässerung
- konstruktiv sinnvolle Entwässerung
- keine Verdichtung der Gesteinsoberfläche durch Behandlungsmaterialien

### 2.1.10.2 Schadensursache: Frostsprengung

**Vorkommen:** Gesteine mit schichtflächenparallel eingelagerten Tonmineralien, besonders bei parallel zur Steinoberfläche verlaufenden Tonschichten. Sonderform ist Schalenablösung an Rissen, die sich bei Frost aufweiten (Kapitel 2.1.17).

#### Schadensmechanismus

- Aufweitung von Mikroporen im Bereich der Tonmineralstruktur infolge Eisbildung. Beginn der Eisbildung in den Grobporen, wobei das Wasser aus den Mikroporen in die großen Poren diffundiert.
- Bei Frost-Tau-Wechsel wird durch das Auftauen der unter der Oberfläche liegenden Zone schlagartig Wärme entzogen
  - Gefrieren und Ausdehnung des Wassers der tieferen Zone,
  - schalenförmiges Abplatzen.

#### Einflussfaktoren:

- Häufigkeit der Frost-Tau-Wechsel
- Wassersättigung
- Porengeometrie
- Porenradienverteilung
- Abkühlungsgeschwindigkeit
- Salzmineralien

#### Schalenaufbau:

- bei einzelnen Tonlagen: abhängig von Gesteinsstruktur, Ablösen der Steinpartien oberhalb der Tonlage
- bei enger Schichtung: Übergang zu Aufblättern (Kapitel 2.1.12), schichtflächenparallel
- bei sehr feinkörnigem Gestein: oberflächenparallel

#### Sanierung

siehe Kapitel 2.1.10.1

## Schadensvermeidung

- Einbau von Werksteinen ›auf Spalt‹ vermeiden
- keine frostgefährdeten Steinsorten verwenden
- Wasserbelastung durch konstruktive Maßnahmen verhindern

### 2.1.10.3 Schadensursache: Verdichtung der Oberfläche durch Festigung oder filmbildende Beschichtung

#### Erscheinungsbild

Ablösung der Gesteinsoberfläche durch filmbildende Beschichtungen oder unzureichend tief eingedrungene Festigungsmittel. Die Dicke der Schale kann wenige mm bis mehrere cm betragen. Der Verlauf der Schale ist unabhängig von schichtungsbedingten Inhomogenitäten.

#### Schadensmechanismus

1. Ungenügende Eindringtiefe des Festigungsmittels
  - Verdichtung der Gesteinsoberfläche durch Porenverengung
  - Spannungsaufbau zwischen gefestigter Zone und nicht gefestigter Lockerzone
  - Ablösen der Zone erhöhter Festigkeit
2. Filmbildende Beschichtungen
  - Behinderung der Wasserdampfdiffusion durch die Beschichtung
  - Salzanreicherung hinter der Beschichtung durch Wasser, das über Fugen, Risse oder andere Transportwege eindringt
  - Bildung einer Lockerungszone durch Lösungs-, Fällungsreaktionen hinter der Beschichtung
  - Absprengung der Steinoberfläche durch salzinduzierte Volumenveränderung
  - Deformierung der Schalenränder durch unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten von Schale und unbehandeltem Stein

#### Schalenaufbau:

- Verdichtungszone durch Schutzsystem
- unterhalb der Verdichtungszone liegende Lockerungszone

#### Untersuchung

- visuell, abklopfen
- Information aus Archivunterlagen über durchgeführte Maßnahmen
- Überprüfung der Steinfestigungsmöglichkeit (Kapitel 1.3.3.6.1)
- Überprüfung der Wasserdampfdiffusionsfähigkeit (Kapitel 1.3.3.3.8)

## Sanierung

### 1. Ungenügende Eindringtiefe des Festigungsmittels

- bei mehrere cm tiefer Lockerungszone: Steinaustausch (Kapitel 1.4.4) korrekte Nachfestigung (Kapitel 1.4.10)
- evtl. Acrylharzvolltränkung (Kapitel 1.4.10), besonders bei kunsthistorisch wertvoller Bauzier, um die gelockerten Bereiche wieder am Stein zu fixieren

### 2. Filmbildende Beschichtung

- bei geringer Schädigung und organisch gebundenen Beschichtungen: Abbeizen der Beschichtung, Entsalzen der geschädigten Zone mittels Kompressen und Festigung der so vorbehandelten Partien
- steinmetzmäßiges Zurückerarbeiten
- Abheben der Schale und Reinigen der Oberfläche zum Entfernen der Lockerzone

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass es meist nicht möglich ist, die eingedrungenen Beschichtungsstoffe und Konservierungsmittel ohne Substanzverlust des Steins zu entfernen, sodass nur das Abtragen der Oberfläche verbleibt.

## Schadensvermeidung

Ausreichende Voruntersuchungen über Wirkung und Einfluss auf den Stein, Anwendungsbereich, Auftragsmenge, Eindringtiefe des Konservierungs- oder Beschichtungsmittels (Kapitel 1.3.3.6)

### 2.1.10.4 Schadensursache: Hinterwanderung von Hydrophobierungen mit Feuchtigkeit (Bild 55)

## Schadensmechanismen

- Behinderung der kapillaren Wasseraufnahme durch Hydrophobierung
- Hinterwanderung der Hydrophobierung durch Wasser, das über Risse, defekte Fugen oder Fehlstellen in das Mauerwerk eingedrungen ist
- Die wasserabweisende Wirkung der Hydrophobierung verlangsamt das Austrocknen.
- Scherspannungen treten durch unterschiedliche hygrische Dehnung von hydrophobierter und nicht hydrophobierter Schicht auf  
→ Ablösung von Schalen an Grenzschicht

**Vorkommen:** an allen Naturwerksteinen zu beobachten, besonders häufig an sehr saugfähigem Material



**Bild 55** ■ Ablösung der hydrophobierten Schale eines Schilfsandsteins

**Schalenaufbau:** keine Lockerungszone, Schalendicke entsprechend hydrophobierter Gesteinszone

### Sanierung

Flächiges steinmetzmäßiges Zurückarbeiten zur Entfernung der Hydrophobierungsschicht, die Tiefe ist abhängig von der Eindringtiefe des Präparates und der Schädigung des darunterliegenden Steines. Gegebenenfalls Erneuerung durch Steinaustausch bzw. Platten (Kapitel 1.4.4).

### Schadensvermeidung

- Überprüfung der Fassade auf Eindringmöglichkeiten von Wasser, das die hydrophobierte Oberfläche hinterwandern könnte, dabei sind auch die Möglichkeiten von minimalen Bauwerksbewegungen nach erfolgter Instandsetzung einzukalkulieren
- Durchführung von Versuchen, die die Wahl des Hydrophobierungsmittels, Wirkung, Eindringtiefe, Auftragsmenge und Anzahl der Auftragszyklen festlegen (Kapitel 1.3.3.6)

#### 2.1.10.5 Schadensursache: hygrische Dehnung

##### Schadensmechanismus

- Hygroskopizität oder Hydratation an der Steinoberfläche durch Anlagerung oder Einbau von Wassermolekülen (Kapitel 2.1.10.2, 2.1.6.3 und 2.1.4)
- Spannungsaufbau zwischen verwittertem und unverwittertem Stein

- Spannungsaufbau durch schnelle Quellung bei Durchfeuchtung und langsames Schrumpfen bei Austrocknung von Tonmineralen [196, S. 71–76]

#### **Einflussfaktoren:**

- Wassergehalt, Luftfeuchtigkeit, kapillare und hygroskopische Wasseraufnahme
- Gehalt an Tonmineralen, Verteilung im Porengefüge
- innere Oberfläche, Anzahl der Korn-Korn-Kontakte
- Gesteinsstruktur und -textur
- Behinderung des Spannungsabbaus durch starren Fugenmörtel

#### **Erscheinungsbild**

- Ablösung der Gesteinspartien an Tonlagen oder Inhomogenitäten
- Ablösung von durchfeuchteten und versalzten Gesteinspartien
- keine Ausbildung einer Lockerungszone
- bei feinschichtigem Aufbau Übergang zu Aufblättern

#### **Untersuchung**

- visuell
- Abklopfen der Hohlstellen
- Messmethoden der hygrischen Dehnung:
  - Feinmessuhr: Messung der Quellung bei Volltränkung
  - Dehnmessstreifen: Messung der Quellung bei unterschiedlichen Luftfeuchten und Feuchtigkeitsgehalten; als Kompensationsmessstab dienen Dehnmessstreifen aus Borosilikatglas

#### **Sanierung**

- wenige cm starke Schalen: Steinaustausch bzw. Platten (Kapitel 1.4.4)
- dünne Schalen: steinmetzmäßiges Zurückarbeiten
- denkmalwerte Objekte: Acrylharzvolltränkung, restauratorisches Fixieren der Schalen (Kapitel 1.4.10 und 2.1.10.1)

#### **Schadensvermeidung**

- Verwendung von möglichst homogenem Steinmaterial
- Verwendung von Fugenmörtel, der in seiner Festigkeit, kapillaren Wasseraufnahme und Diffusionsfähigkeit dem Stein angepasst ist
- Vermeidung von Versalzung, Durchfeuchtung (Kapitel 2.1.4)

### 2.1.10.6 Schadensursache: thermische Dehnung

#### Erscheinungsbild

- Ablösung der Gesteinspartien an Tonlagen oder Inhomogenitäten
- Ablösung von oberflächenparalleler Verwitterungszone
- keine Ausbildung einer Lockerungszone
- selten in gemäßigtem Klima
- Sonderform ist Frostsprengung (Kapitel 2.1.10.2)

#### Einflussfaktoren:

- Temperatur
- Feuchtigkeitsgehalt
- Mineralstruktur und -textur

#### Schadensmechanismus

Unterschiedlicher E-Modul und thermischer Ausdehnungskoeffizient von Verwitterungszone und unverwittertem Stein → Spannungsaufbau → Schalenablösung an Grenzschicht

#### Untersuchung

- visuell
- Abklopfen der Hohlstellen
- Messung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$ : Messung der Längenänderung bei verschiedenen Temperaturen mit Dehnmessstreifen und Kompensationsmessstreifen aus Borosilikatglas

#### Sanierung

siehe Kapitel 2.1.10.5

#### Schadensvermeidung

- Verwendung von möglichst homogenem Material
- keine Feuchtigkeits- oder Salzbelastung des Mauerwerks

### 2.1.10.7 Schadensursache: Brand

#### Erscheinungsbild

Ausbildung und/oder Ablösung oberflächenparalleler Schalen (Bild 56)



**Bild 56** ■ Brand hat zur Abplatzung der Stein-oberfläche und Rissbildung geführt

## Schadensmechanismus

schlagartige Erhöhung der Temperatur an der Oberfläche → Spannungsaufbau  
→ Schalenablösung an Grenzschicht zum Steinkern

## Untersuchung

- visuell
- Abklopfen der Hohlstellen
- mikroskopische Analyse von Mineral- und Gefügerstörungen

## Sanierung

- dünne Schalen: steinmetzmäßiges Zurückarbeiten
- Schalen > 1 cm Dicke bzw. abhängig von Brandeinwirkung: Neuaufmauern, da Schädigung der Werksteine noch in die Tiefe geht, makroskopisch jedoch nicht sichtbar.

### 2.1.10.8 Schadensursache: Steinbearbeitung

## Erscheinungsbild

Ablösung der obersten, mm-dicken Gesteinszone, die steinmetzmäßig bearbeitet ist. Unterhalb der Schale sind die Einkerbungen des Steinmetzwerkzeugs, z. B. Scharriereisen, sichtbar.

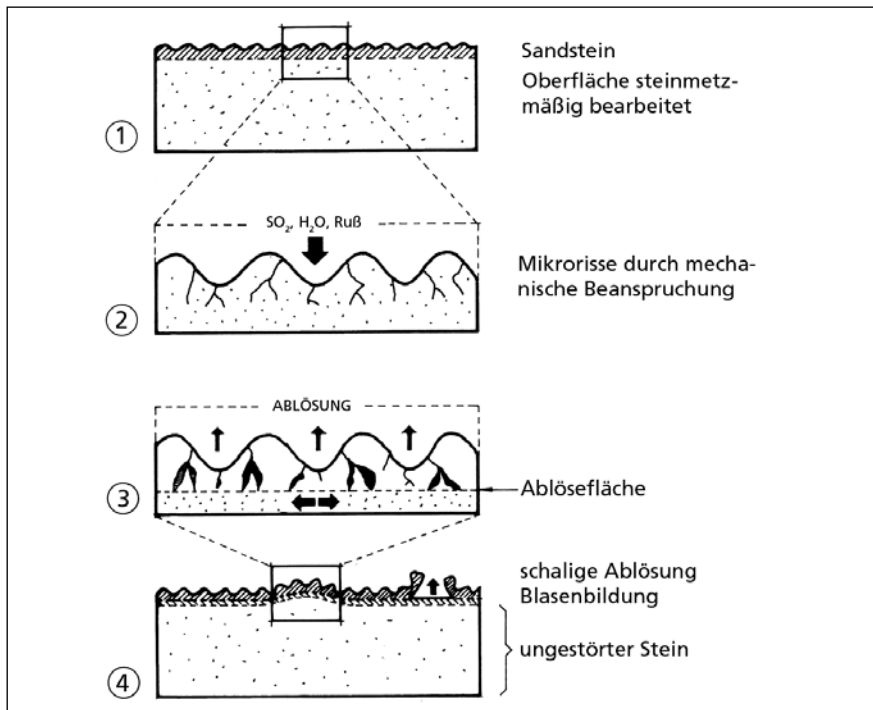
## Schadensmechanismus (Bild 57)

- Mikrorisse durch die mechanische Beanspruchung beim Bearbeiten des Werksteins
- Eindringen von Schadstoffen in die Risse
- Verdichtung der Oberflächenzone
- Änderung der physikalischen Kennwerte und chemischen Struktur dieser Zone
- Schalenablösung

## Sanierung

- Acrylharzvolltränkung (Kapitel 1.4.10)
- restauratorisches Fixieren (Kapitel 2.1.10.1)
- steinmetzmäßiges Zurückarbeiten der Oberfläche

Die Auswahl eines der angegebenen Verfahren ist abhängig vom Ausmaß des Schadens und vom Wert des betroffenen Werksteins. Restauratorische Verfahren finden ausschließlich bei denkmalwerten Stücken Anwendung, da sie mit sehr hohem Aufwand verbunden sind.



**Bild 57** ■ Mikrorisse und Schalenbildung durch Steinmetzbearbeitung



## Schadensvermeidung

Jede Bearbeitung des Steins bedeutet eine potenzielle Gefährdung, sodass diese Schäden auch nach einer Instandsetzung nicht auszuschließen sind.

Verwendung von ›steingerechten‹ Bearbeitungsmethoden.

### 2.1.11 Kantenparallele Schalen

#### Erscheinungsbild

Beim Abklopfen hohl klingende Bereiche parallel der Fugenflanken. Mit dem Auge oft nicht erkennbar. Die Entstehung erfolgt ausgehend von oberflächenparallelen Rissen entlang der Fugen.

#### 2.1.11.1 Schadensursache: hygrische und thermische Längenänderung

Durch Längenänderungen infolge von Temperatur- und Feuchtigkeitsunterschieden entstehen Spannungen im Werkstein, die die Eigenfestigkeit des Materials übersteigen können (Kapitel 2.1.10.5 und 2.1.10.6).

#### Materialparameter:

- hygrischer und thermischer Ausdehnungskoeffizient
- E-Modul
- Zugfestigkeit
- Hydratation von Mineralien
- hygroskopische Wasseraufnahmefähigkeit

#### Einflussgrößen:

- Qualität von Stein und Mörtel
- Feuchtigkeit
- Temperatur
- Anteil neu gebildeter Salze

#### Schadensmechanismus

Durch Temperatur- und/oder Feuchtigkeitsänderungen kommt es zu Volumenveränderungen des Werksteins. Bei Verwendung von hartem Fugenmörtel oder zu enger Fugenbreite bzw. knirsch versetzten Steinen können die wirksam werdenden Spannungen nicht mehr über den Fugenmörtel abgeleitet werden. Es entstehen fugenparallele Risse, aus denen sich Schalen entwickeln.

#### Untersuchung

Abklopfen

## Sanierung

- Neuverfugung mit Mörtel, der spannungsarm abbindet und in Festigkeit, Wasseraufnahmekoeffizient und Wasserdampfdiffusionsvermögen dem Gestein angepasst ist
- bei engen Fugen: Aufschneiden der Fugen mit Diamantscheibe, Neuverfugung mit größerer Fugenweite (ca. 10 mm) zum Abbau der vorhandenen Spannungen
- steinmetztechnische Maßnahmen: Zurückarbeiten der Kanten, Einsetzen von Vierungen, Steinaustausch
- Konservierung der Schalen durch Hinterfüllen der Schalen, Anböschern der Schalenränder, Verkleben und Injizieren der Risse; vor allem angewendet bei denkmalwerter Substanz, bei der kein Austausch des geschädigten Steins gewünscht ist

## Schadensvermeidung

- Fugennetz mit ausreichender Fugenbreite von ca. 10 mm (nach überkommenen Regeln der Technik beträgt die Fugenbreite ca. 10 mm, abhängig von der Art des Mauerwerks, siehe auch VOB/C DIN 18332 [10])
- Fugenmörtel von herabgesetzter Festigkeit, zum Vermeiden von Spannungen

### 2.1.11.2 Schadensursache: Bauwerksbewegungen

Überbeanspruchung vor allem im Bereich der Quaderkanten durch Belastungsspitzen. Diese können auch die Folge von unzureichenden Sanierungsmaßnahmen sein. Weitere Ursachen: dynamische Belastungen, wie starker Straßen- oder Schienenverkehr (Brückenbauwerke) bzw. Bauwerksschwingungen durch Glockengeläut.

## Sanierung und Schadensvermeidung

Dauerhafte Instandsetzung nur durch Behebung der Schadensursachen möglich. Diese werden in Zusammenarbeit von Tragwerksplaner und Fachplaner für Bauwerksinstandsetzung ermittelt.

Sanierung nach Kapitel 2.1.11.1.

## 2.1.12 Aufblättern

### Erscheinungsbild

Blättrig aufgelöster Gesteinsverband, zahlreiche eng gescharte Risse, z. T. an der Oberfläche, oft auch steindurchschlagend, häufig zum totalen Verlust des betroffenen Steines führend

**Vorkommen:** Eng geschichtete Steine mit oberflächenparallelen oder spitzwinklig zur Oberfläche verlaufenden Schichtflächen

### Schadensursache

- Eindringen von Wasser → Hydratation der Tonminerale oder Einlagerung von hygroskopischen Salzen vor allem auf Schichtflächen und Aufweitung zu schichtflächenparallelen Rissen
- Schäden durch hygrische Dehnung (Kapitel 2.1.11.1) oder Frostsprengung (Kapitel 2.1.10.2)

### Sanierung

In Abhängigkeit vom Wert des Objektes:

- **Injektion** der Einzelblätter mit Kunstharz zum Wiederherstellen eines einheitlichen Körpers. Anböschern von aufstehenden Blättern mit feinkörnigem Mörtel. Gefahr der Verminderung der Dampfdiffusionsfähigkeit. Anzuwenden bei denkmalwerter Substanz. Sehr aufwendig.
- **Steinaustausch** des geschädigten Quaders, vollständig oder teilweise, abhängig vom Schadensausmaß
- **Blechabdeckung** oder Schutzdach je nach Lokalität zum Schutz des Steins vor eindringendem Wasser (Kapitel 1.4.17)

### Schadensvermeidung

- Verarbeitung von möglichst homogenem, nicht lagig aufgebautem Stein
- Ausschließlich Einbau mit horizontal gelagerten Schichtflächen
- Prüfung der Natursteine vor dem Einbau auf Frost-Tau-Wechsel-Beständigkeit

## 2.1.13 Bröckeln

### Erscheinungsbild

Durch regellos oder parallel und senkrecht zur Lagerung verlaufende Risse wird der Stein in einzelne Brocken zerlegt. Dieser Schaden führt zu einer intensiven Zerstörung (Bild 58).



**Bild 58** ■ Aufbröckeln eines Steins durch unregelmäßig verlaufende Risse

## Ursachen

- Frostsprengung ausgehend von Rissen und Inhomogenitäten (Kapitel 2.1.10.2)
- Salzsprengung (Kapitel 2.1.4)
- hygrische und thermische Dehnung (Kapitel 2.1.10.5 und 2.1.10.6)
- konstruktiv (Kapitel 2.1.13.2)

## Untersuchung

visuell

### 2.1.13.1 Schadensursache: Überlagerung mehrerer Schalen- und/oder Rissysteme

## Schadensmechanismus

Bei Vorhandensein sich überlagernder Schalen- und/oder Rissysteme, beispielsweise kantenparallele Schalen, flächige Schalen und schichtflächenparallele Risse, wird der Werkstein in einzelne Brocken zerlegt.

## Sanierung

Steinaustausch

## Schadensvermeidung

- Verwendung von möglichst homogenem Steinmaterial
- Vermeidung von flächigen Schalen (Kapitel 2.1.10)
- Vermeidung von kantenparallelen Schalen (Kapitel 2.1.11)

### 2.1.13.2 Schadensursache: konstruktiv

#### Schadensmechanismus

Bauwerksbewegungen, zu starke Belastung von Bauteilen → Spannungen → Zerbröckeln, besonders Außenecken der Quader

#### Sanierung

Steinaustausch, evtl. statisch-konstruktive Veränderungen

#### Schadensvermeidung

statische Überprüfung der Baumaßnahme

### 2.1.14 Ausbruch

#### Ursachen

- mechanische Ausbrüche durch Prallschäden
- Kriegsschäden
- Brandschäden, Risse durch thermische Spannung (Bild 59)
- Rostsprengung (Kapitel 2.1.15)

#### Untersuchung

visuell



**Bild 59** ■ Massive Ausbrüche und Bauwerkschäden nach Brandeinwirkung

### 2.1.14.1 Schadensursache: mechanisch

Entstehung durch unterschiedliche mechanische Einwirkungen, z.B. Wurzeldruck, Korrosion, Anprallschäden, bewusste Zerstörung oder Schädigung durch Umbaumaßnahmen (Bild 60).

#### Sanierung

Steinaustausch oder Vierungen, je nach Größe des Ausbruchs

#### Schadensvermeidung

Konstruktiv durch Anbringen von Prallhemmern, wie z.B. Pfosten oder anderen Schutzvorrichtungen



**Bild 60** ■ Ausbrüche an einem mittelalterlichen Kapitell

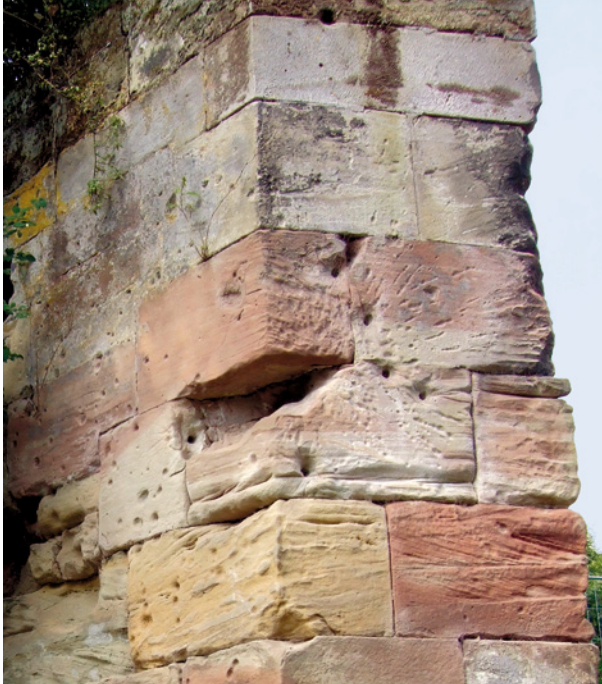
### 2.1.14.2 Schadensursache: Kriegsschäden

#### Erscheinungsbild

Deutlicher Hinweis auf Kriegsschäden sind Einschusslöcher, die oft über große Flächen der Bauwerks Oberfläche verteilt sind. Sie führen im Bereich der Einschüsse zu Ausbrüchen mit unterschiedlich starker Zerstörung der Quader (Bild 61).

#### Sanierung

Steinaustausch oder Vierungen (Kapitel 1.4.4)



**Bild 61** ■ Ausbrüche durch Einschusslöcher

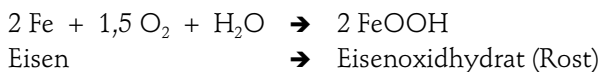
### 2.1.15 Rostsprengung

#### Erscheinungsbild

Steindurchschlagende Risse; meist radialstrahlig von einem korrodierenden Metallteil ausgehend (Bild 62)

#### Ursache

Korrosion bei Verwendung von nicht rostbeständigem Material, meist Eisen oder Stahl. Bei eisenhaltigen Metallen bilden sich zunächst an einzelnen Körnchen, dann auf dem ganzen Metall Überzüge aus Fe(III)-Oxidhydrat.



Rostsprengung entsteht durch die mit dieser Reaktion verbundene Volumenvergrößerung. Da Rost ein 3,6-fach größeres Molvolumen gegenüber Eisen hat, erhöht sich das Volumen durch Korrosion mindestens um diesen Faktor.





**Bild 62** ■ Risse durch  
korrodierte Verklamm-  
erung

Rostende Metallteile:

- Eisendübel zur Befestigung von Zierteilen
- Dübel oder Klammern zur Sicherung von Steinen mit geringer Einbautiefe
- Geländereinlassungen, Tür- bzw. Klappladenaufhängungen
- Maueranker

## Untersuchung

- visuell
- Aufsuchen der Eisenteile mit Bewehrungssuchgeräten bzw. Metalldetektoren

## Sanierung

- Steinaustausch (Kapitel 1.4.4)
- Ausbau und vollständiges Entrosten des Metallteils
- Korrosionsschutzanstrich (Kapitel 1.4.14)



- Verankerung durch zementhaltigen Mörtel wg. Korrosionsschutz, durch kunststoffmodifizierten Mörtel, Reaktionsharzmörtel oder durch Bleiverguss
- bei Einbau neuer Metallteile: Verwendung von hoch legiertem Stahl, z. B. CrNiMo-Stahl (Werkstoffnr. z. B. 1.4404 oder 1.4571)
- zusätzliche Verankerung von vorgehängten Fassadenplatten und Abdichtung aller Risse, Fehlstellen, Fugen etc.

## Schadensvermeidung

- sorgfältige Einbindung und Abdichtung der Metallteile durch ausgewählten Mörtel, Bleiverguss oder Verstemmen mit Bleiwolfe
- Verwendung von rostfreiem Stahl, s. o.
- rostanfälliges Material mit Korrosionsschutzanstrich versehen, aber Gefahr des Weiterrostens bei Beschädigung des Anstrichs
- Bei älteren Fassadenplatten, die mit korrosionsanfälligem Material verankert sind, sollte ein intaktes Fugennetz vorhanden sein.
- Kontrolle von Zierteilen, die mit rostanfälligem Metall

### 2.1.16 Schichtparallele Risse

#### Erscheinungsbild

Schichtparallele Risse bilden sich entlang von schichtparallelen Inhomogenitäten im Gestein. Hierzu zählen vor allem auf Schichtflächen angereicherte Tonminerale sowie Glimmerschüppchen (»Silberlager«), die zu Trennflächen führen (Bild 63).



**Bild 63** ■ Gesteinszerstörung durch schichtflächenparallele Risse

**Einflussfaktoren:**

- Feuchtigkeit
- Hydratation von Tonmineralien
- Verwitterung von Glimmermineralen (Serizitisierung, Chloritisierung)
- salzinduzierte Gefügebelastrung
- Frostsprengung
- hygrische und thermische Längenänderung

**Weitere Schäden:**

- Schalen (Kapitel 2.1.10)
- Bröckeln (Kapitel 2.1.13)

**Untersuchung**

visuell

**Sanierung**

- Steinaustausch, bei partieller Schädigung evtl. Platten oder Vierungen (Kapitel 1.4.4)
- bei wertvollen Objekten: Verschließen der Risse durch Injektion mit Kunstharz (Kapitel 2.1.10.1)

**Schadensvermeidung**

- möglichst homogenes Steinmaterial
- lagerechter Einbau

**2.1.17 Steindurchschlagende Risse****2.1.17.1 Schadensursache: konstruktiv****Erscheinungsbild**

Druck- oder Zugspannungen durch Bauwerksbewegungen erzeugen steindurchschlagende Risse (Bilder 64 und 65).

**Ursachen**

- Baugrundsenkung durch mangelnde Untergrundkonsolidierung, Bergbauschäden, Auswirkung von im Umkreis erfolgtem Eingriff in den Boden, Grundwasserabsenkung
- punktuelle Überbelastung



**Bild 64** ■ Auflagernder Druck hat zur Durchschlagung des Kapitells geführt



**Bild 65** ■ Markante Risse des Turmbauwerks durch Baugrundsenkung

- Schwingungsschäden in Glockentürmen
- Gewölbeschub

### Untersuchung

- Feststellung des Rissverlaufs, der Rissbreite, der Rissbreitenänderung, des Feuchtezustands des Risses
- Kontrolle von Rissbewegungen: Mörtelplomben, Gipsmarken (Bild 66), Messpunkte, zweiteilige Messbänder mit Mikrometerschraube, Datenlogger (Erfassung der Rissbewegung durch Messung der Längenänderung von Dehnungsmessstreifen, auch in Kombination mit Messung von Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur, Zeitpunkt, ggf. mit Sendeeinrichtung)
- Messung der Rissbreite: Risslupe, Linienstärkenmaßstab
- ggf. Überprüfung des statischen Systems durch Tragwerksplaner

### Sanierung

**Voraussetzung:** Die Bewegung von Rissen muss abgeschlossen sein. Daher ist es zunächst erforderlich, Bauwerksbewegungen abzustellen.



**Bild 66** ■ Kontrolle von Rissbewegungen mit Rissmarken

- Rissverfüllung (Kapitel 1.4.15)
- Verklammern von Bauteilen (Kapitel 1.4.15)
- Vernadelung (Kapitel 1.4.16.2)
- Verankerung (Kapitel 1.4.16.3)
- Verpressen (Kapitel 1.4.16.1)
- Steinaustausch: bei durchschlagenden Rissen durch einzelne Steine, wie z.B. Fensterstürze (Kapitel 1.4.4)
- Konsolidierung des Baugrundes

Schwingungsschäden durch **Glockenschwingung**: Entstehung von Rissen durch Überlagerung der Eigenschwingungszahl des Glockenträgers von der Schwingungszahl der Glocken [197].

#### Sanierung:

- Kröpfen der Glockenaufhängung → Verringerung der Horizontalkräfte durch Verkürzung des Schwingungsweges → Verringerung der Lautstärke des Glockenschlages
- Einbau einer Gegenschwinganlage → platzaufwendig, teuer

### Schadensvermeidung

- statische Überprüfung von Bauvorhaben
- ausreichende Fundamentierung
- Einbau von Dehnungsfugen bei Mauern

#### 2.1.17.2 Schadensursache: Treibmineralbildung

Bei der Reaktion von Zement mit Gips in Anwesenheit von Wasser entsteht Ettringit, der durch erhebliche Volumenvergrößerung die Bildung von Rissen und Abplatzungen hervorruft. Wesentlich ist hierbei der innere Sulfatangriff, z.B. durch Injektionsmörtel, da an den Kontaktflächen zwischen historischen Gipsmörteln und hydraulisch gebundenen Instandsetzungsmörteln der Sulfatgehalt in wässriger Lösung immer in hoher Konzentration vorkommt [111, S. 9]. Ettringit wandelt sich unter Carbonat- und Silikataufnahme in Thaumassit um. Thaumassit ist zwar mit einer geringeren Volumenausdehnung verbunden, bewirkt aber zusätzlich eine Entfestigung des Mörtelgefüges [111, S. 10].

#### Chemische Zusammensetzung:

- Ettringit:  $\text{Ca}_6\text{Al}_2 [(\text{OH})_4/\text{SO}_4]_3 \cdot 24 \text{H}_2\text{O}$
- Thaumassit:  $\text{Ca}_3 [\text{CO}_3/\text{SO}_4/\text{Si}(\text{OH})_6] \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$

#### Beispiele für Ettringitbildung:

- Zementinjektion bei Verpress-, Vernadelungs- und Verankerungsarbeiten in sulfathaltigem Mauerwerk
- Versetzen von Steinen mit Zementmörtel in sulfathaltigem Mauerwerk

**Voraussetzung:** Feuchtigkeit, Vorliegen von Aluminat, Sulfat, Calciumhydroxid

## Sanierung

Abriss und Neuaufbau des Mauerwerks  
Mauerwerksaustausch bei begrenzten Schadensbereichen

## Schadensvermeidung

Bei erhöhten Sulfatgehalten des Mauerwerks, speziell bei Verwendung von gipshaltigem Mörtel oder Gipsmörtel, darf kein Kontakt mit zementgebundenem Material stattfinden, das CAH-Phasen enthält (Calciumaluminathydrat, entstanden aus den  $C_3A$ -Phasen-Tricalciumaluminat – des Zementklinkers von CEM I). Maßnahmen wie z. B. Verpressen, Injizieren, Vermörteln sind nur mit speziellen Mörteln durchzuführen.

Nach WTA-Merkblatt 2-11-2007 GIPSMÖRTEL IM HISTORISCHEN MAUERWERKSBAU UND AN FASSADEN [111] wurden bei den bisher eingesetzten Sanierungsmörteln (HS-Zement [Zement mit hohem Sulfatwiderstand], Trasskalkmörtel) erneut Schäden durch Treibmineralbildung festgestellt [177, S. 215, 216].

Daher sollten stattdessen gips- bzw. anhydritgebundene Mörtel verwendet werden, z. B. der in einem DBU-Forschungsprojekt als Instandsetzungsmörtel für sulfathaltiges Mauerwerk entwickelte Gipsmörtel [108] bzw. ein HAZ-Mörtel (siehe Kapitel 1.4.6). Die Wasserlöslichkeit dieser Mörtel beschränkt sich durch die Rückwitterung meist auf die Oberfläche und kann durch konstruktive Maßnahmen zur Wasserableitung vermieden werden.

Weitere Maßnahmen: Vermeidung der Feuchtezufuhr

### 2.1.17.3 Schadensursache: Brand

Bei Brand werden durch die schlagartigen Temperaturerhöhungen Spannungen wirksam, die die Festigkeit des Gesteins überschreiten und zur Rissbildung führen. Dieser Vorgang kann auch mit Schalenbildung durch thermische Längenänderung (Kapitel 2.1.11.1) verbunden sein (Bild 67).

## Sanierung

- Steinaustausch oder auch Austausch von Mauerwerksteilen und ganzen Flächen, wegen Zerstörung von Mauerwerksgefüge und Stabilität
- Rissanierung (Kapitel 1.4.15)





**Bild 67** ■ Steindurchschlagende Risse nach Brandeinwirkung

## 2.1.18 Verformung von Mauerwerk

### Erscheinungsbild

Verformungen von Mauerwerk können sich als Ausbeulung, Kippen der Mauer in Zusammenhang mit fugenparallelen Rissen und/oder Verschiebungen der Quader sichtbar machen (Bild 68). Ursachen sind:

- Erddruck,
- Setzung des Bodens,
- Konstruktionsfehler der Mauer.

### Untersuchung

- Rissaufnahme
- Verformungsmessung, auch Langzeitmessung
- Baugrunduntersuchung
- statische Berechnung

### Sanierung

- statische Sicherungsmaßnahmen
- Rissbehandlung: Vernadeln, Verankern, Verpressen, Schließen von Rissen (Kapitel 1.4.15 und 1.4.16)
- Teilaufmauerung oder Neuaufmauerung
- Abstützen



**Bild 68** ■ Deutlich sichtbare Verformung des Mauerwerks

## Schadensvermeidung

- Voruntersuchung des Baugrundes
- detaillierte Tragwerksplanung
- ausreichende Mauerwerksbemessung nach DIN 1053 zur Gewährleistung der Standsicherheit

### 2.1.19 Hohlräume in Mauerwerk

#### Erscheinungsbild

offene Fugen, hohl liegende einzelne Quader oder ganze Mauerwerksbereiche



## Ursachen

- mangelhafter Verbund beim Aufbau des Mauerwerks, besonders bei mehrschaligem Mauerwerk
- Ausspülen des Mörtels durch Wasser
- chemische Lösung des Mörtels
- Bauwerksbewegung

## Untersuchung

zerstörend (Kapitel 1.3.1.5):

- Spiralbohrung zur Erkundung des Mauerwerksaufbaus
- Kernbohrung

zerstörungsfrei: z. T. schwierige bis fragliche Interpretation der Messergebnisse (Kapitel 1.3.1.3):

- Endoskopie
- Ultraschall
- Seismik
- Georadar
- Geoelektrik

## Sanierung

- Verpressen (Kapitel 1.4.16)
- Vernadeln (Kapitel 1.4.16)
- Neuaufmauern
- hohlraumfreies Versetzen

## Schadensvermeidung

- hohlraumfreier Aufbau des Mauerwerks
- Vermeidung von Lösungsprozessen durch Feuchtigkeit

## 2.1.20 Mangelhafter Austausch geschädigter Quader

### Erscheinungsbild

Beim Austausch geschädigter Quader müssen die handwerklichen Richtlinien und Vorschriften beachtet werden (Tabelle 34).

Abgesehen von Schäden, die durch fehlerhaften Steinaustausch entstehen, wird auch die Ästhetik des Bauteils, z. B. durch nicht angepasste Oberflächenbearbeitung oder falsche Abmessung des Werkstücks, beeinflusst.

**Tabelle 34** ■ Schäden durch fehlerhaften Steinaustausch

Fehler	Wirkung	mögliche Schäden
Nichtbeachtung des Fugen-schnittes	statische Instabilität Veränderung der Lastverteilung	Lockerung Verformung
Nichtbeachtung der Materialkennwerte	veränderte Wasseraufnahme, Festigkeit, Porosität, Dichte	Schalen Risse, Bröckeln
falsche Abmessung des Steins	Eindringen von Feuchtigkeit	Schalen Lockerung des Fugenmörtels Kantenrundung
fehlende Einbindetiefe	mangelhafter Verbund	Lockerung Verminderung der Tragfähigkeit
kein hohlraumfreies Verfugen und Versetzen	mangelhafter Verbund	Lockerung
fehlendes Vornässen beim Einsetzen des Werkstücks	mangelhafter Verbund durch nicht ausreichend erhärteten Mörtel	Ablösen des Werkstücks
fehlende Abstützmaßnahmen	mangelnde Tragfähigkeit	Ausbrechen der darüberliegenden Quader

## Untersuchung

- visuell
- Spiralbohrung zur Erkundung der Einbindetiefe

## Sanierung

Steinaustausch

## Schadensvermeidung

Beachtung der Regeln der Technik

### 2.1.21 Falsch eingesetzte Vierungen oder Platten

#### Erscheinungsbild

Fehler beim Einsetzen von Vierungen und Platten dokumentieren sich im Wesentlichen in optischen Beeinträchtigungen der Fassade, Rissen und Aus-

brüchen (Bilder 69 und 70). Schadensursachen und Auswirkung sind in den Tabellen 35 und 36 aufgelistet.



**Bild 69** ■ Durch unpassende Färbung von Gestein und Fugenmörtel heben sich die Vierungen stark vom Umgebungsmaterial ab.



**Bild 70** ■ Die Vierungen sind deutlich an der Oberflächenbearbeitung erkennbar

**Tabelle 35** ■ Fehler beim Einsetzen von Vierungen

handwerkliche oder planerische Mängel	Wirkung
Einsetzen von Vierungen über das vorhandene Fugennetz hinweg	Veränderung des Fassadenbildes Funktionsfähigkeit der Fugen wird eingeschränkt, Rissbildung
Einbau von vielen unterschiedlichen Vierungen	Störung des einheitlichen Fugenschnittes
Einschneiden von Scheinfugen in die Vierungen	Scheinfugen besitzen keine Funktion
Einsetzen von falsch dimensionierten Vierungen an statisch wichtigen Bauteilen	Kantenpressungen führen zu Rissen und Zerstörungen
Nichtbeachtung der Materialkennwerte, z. B. Wasseraufnahme, Porosität, Festigkeit, Dichte	Fugenrisse, Bröckeln
zu breite Fugenausbildung	Veränderung des Fassadenbildes
unzureichendes Auflager bei fehlender Verankerung, z. B. an Gesimsen	Ausbruchgefahr
falsche Oberflächenbearbeitung der Vierung	Veränderung des Fassadenbildes

**Tabelle 36** ■ Fehler beim Einsetzen von Platten

handwerkliche oder planerische Mängel	Wirkung
zu geringe Plattendicke	je nach Größe Ausbruchgefahr
Kreuzfugen innerhalb des Verbandes	Beeinträchtigung der Stabilität und ungehinderten Wasserabführung
falsche Verankerung	Ausbruchgefahr, ggf. Rostsprengung
falsches Material	(Tabellen 34 und 35)
falsche Oberflächenbearbeitung	(Tabelle 35)

## Sanierung

Ausbauen von mangelhaften Vierungen und Platten, Neuversetzen entsprechend den Regeln der Technik (Kapitel 1.4.4)

### 2.1.22 Fehlerhafte Restauriermörtelergänzungen

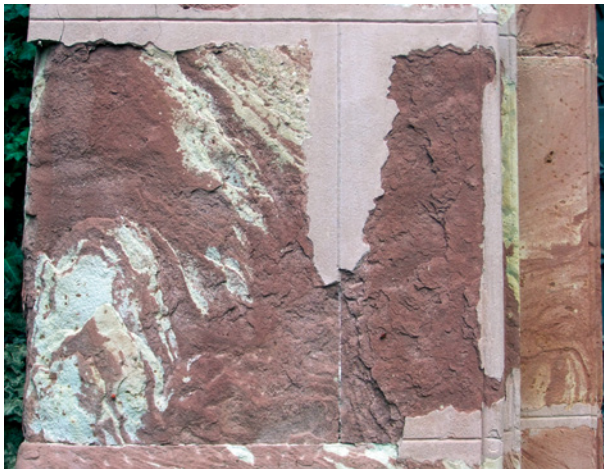
#### Erscheinungsbild

Häufigste Mängel im Bereich von Restauriermörtelergänzungen sind Verfärbungen, Risse sowie starkes Absanden im direkt an den Mörtel angrenzenden

den Stein (Bilder 71 bis 73). Schadensursachen und Auswirkungen sind in Tabelle 37 aufgelistet.



**Bild 71** ■ Abplatzung und Verfärbung von Restauriermörtelergänzungen



**Bild 72** ■ Verwitterter Sandstein infolge zu hoher Festigkeit und zu hohen E-Moduls des ehemaligen Überzugs aus Restaurierungsmörtel



**Bild 73** ■ Unbearbeitete Oberfläche von farblich nicht angepassten Restauriermörtelergänzungen

**Tabelle 37** ■ Material- und Ausführungsfehler bei der Restauriermörtelergänzung (in Anlehnung an [115, S. 173 ff.])

Fehler bei der Restauriermörtelergänzung	Wirkung
Überziehen des Restauriermörtels über die eigentliche Fehlstelle hinweg auf die angrenzende Steinoberfläche	optische Beeinträchtigung durch Bindemittelschleier, verminderte Haltbarkeit der dünnen Mörtellagen
Antragen des Restauriermörtels über Fugen hinweg	Risse, Abplatzen
Bearbeitung des feuchten Mörtels mit ungeeignetem Werkzeug	optische Beeinträchtigung
Ausspitzen auf zu geringe Tiefe, nicht untergriffig, Auslaufenlassen auf null	Abplatzen, Risse
Ausstemmen mit ungeeigneten Werkzeugen	optische Beeinträchtigung
nicht rostfreies Armierungsmaterial	Rostsprengung
Übergreifen der Armierung über Fugen	Abplatzen, Risse
nicht an den Stein angepasste Materialkennwerte	Abplatzen, randliche Salzausblühung

## Sanierung

- Antragen von Restauriermörtel entsprechend den Regeln der Technik (Kapitel 1.4.5)
- Steinaustausch (Kapitel 1.4.4)

## Schadensvermeidung

- Beachtung der handwerklichen Regeln
- Reduzierung von Restauriermörtelarbeiten auf ein Minimum, nur kleine Fehlstellen werden damit ausgebessert. Verwendung von farbechtem Mörtel, möglichst mit farbigem Zuschlag, geringer Anteil von Pigmenten.



## 2.2 Schäden an Fugen

### 2.2.1 Mörtelrisse

#### 2.2.1.1 Schadensursache: materialspezifisch

##### Erscheinungsbild

Bedingt durch eine falsche Zusammensetzung des Mörtels können sowohl Quer- als auch Flankenabrissse gebildet werden (Bild 74, Tabelle 38).

##### Ursache

- zu hoher Bindemittelgehalt
- zu hoher Anteil an Feinanteilen
- zu hohe Festigkeit
- zu hoher E-Modul

##### Untersuchung

- visuell
- Analyse des Bindemittelgehalts (Kapitel 1.3.3.7)
- Siebanalyse nach DIN EN 13139]
- quantitative Bestimmung der Feinanteile
- Ermittlung des Bindemittel-Zuschlag-Verhältnisses, Einordnung in eine Mörtelgruppe nach DIN 1053-1 [1]
- chemische Bestimmung der Bindemittelart
- Mörteldruckfestigkeit



**Bild 74** ■ Quer- und Flankenabrissse des harten Fugenmörtels, der gegenüber den Natursteinen eine zu hohe Festigkeit aufweist

**Tabelle 38** ■ Vorgaben für Fugenmörtel, um der Rissbildung vorzubeugen

Eigenschaften	Vorgaben	Nichtbeachtung der Richtwerte/ Schadensursachen
Druckfestigkeit	angepasst an Stein oder kleiner	Spannungsaufbau zwischen Mörtel und Stein
dynamischer E-Modul	gering, Verhältnis Mörtel/Stein ca. 0,2–1,0	hoher E-Modul → geringe Elastizität
Quell- und Schwindvermögen	gering, $\leq 2 \text{ mm/m}$	hoher Mehlkornanteil, d. h. Bindemittel und Feinstanteile des Zuschlags $\leq 0,25 \text{ mm}$ → höherer Wasseranspruch
Frostempfindlichkeit	gering, keine wesentlichen Schäden bei Frost-Tau-Wechsel-Versuch siehe DIN EN 12371 [36]	hoher Mehlkornanteil → höherer Wasseranspruch
thermische Dehnung	möglichst klein, angepasst an den Stein	Spannung durch ungleiches Ausdehnungsverhalten
Kornverteilung des Zuschlags	möglichst hohlraumfrei, aber nicht zu feine Körnung, Größtkorn ca. 1/3–1/5 der Fugenbreite	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Zuschlagzusammensetzung mit größeren Hohlräumen → hoher Wasser- und Bindemittelbedarf</li> <li>■ zu feine Körnung → hohe Verdichtung</li> </ul>
Haftzugfestigkeit	möglichst hoch, $\geq 0,1 \text{ N/mm}^2$ , < Haftzugfestigkeit des Steins	Verringerung der Haftung
Wasserrückhaltevermögen	hoch bei stark saugfähigen Steinen	Absaugen des Anmachwassers durch den Stein

## Sanierung

- Öffnen des Fugennetzes durch Aufschneiden bzw. Aufstemmen mit feinem Steinmetzwerkzeug
- Neuverfugen mit geeignetem, an das Steinmaterial angepasstem Fugenmörtel (Tabelle 38)

## Schadensvermeidung

Beachtung der o. g. Richtwerte



2.2.1.2    Schadensursache: handwerkliche Mängel

Durch zu starke Verdichtung beim Einbau des Fugenmörtels, unzureichenden Verbund von Mörtel und Stein bzw. einzelner Mörtellagen miteinander oder vorzeitiges Austrocknen des frischen Mörtels können Flanken- oder Quer-  
risse entstehen (Tabelle 39).

**Tabelle 39** ■ Handwerkliche Richtlinien für das Verfugen mit mineralischem Mörtel zur Vermeidung von Rissbildung

Maßnahme	erforderliche Durchführung	Nichtbeachtung der Regeln
Vorbehandlung	Vornässen, matt/feuchter Verfuggrund	Entzug von Anmachwasser → keine Haftung
Nachbehandlung	<ul style="list-style-type: none"><li>■ Schutz des frisch aufgetragenen Mörtels vor Austrocknen durch Wind und Sonne → Abplanen des Gerüstes</li><li>■ 7–14 tägliches Feuchthalten</li><li>■ Schutz vor Regen</li><li>■ Temperatur von Luft und Mauerwerk während und ca. 7 Tage nach den Verfugarbeiten nicht unter +5 °C</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>■ vorzeitiges Austrocknen durch Wind, Sonne und niedrige Temperaturen fördert Rissbildung, da Abbinde- und Erhärtungsvorgang gestört wird</li><li>■ Regen und übermäßiges Wässern → Auswaschen des Bindemittels</li></ul>
Ausräumen der Fugen	<ul style="list-style-type: none"><li>■ frei von Mörtelresten</li><li>■ raue Fugenflanken, d. h. kein Glattschleifen</li></ul>	verminderte Haftung durch Mörtelreste, glatte Flanken
Reinigen der Fugen	mit Druckluft	verminderte Haftung durch Schmutzreste
Einbringen des Mörtels	<ul style="list-style-type: none"><li>■ lagenweises Einbringen bei tief ausgeräumten Fugen</li><li>■ Aufrauen der vorigen Lage</li><li>■ sorgfältige Verdichtung</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>■ mehrlagiges Verfugen ohne Aufrauen → Sinterhautbildung auf Trennschichten → fehlende Haftung</li><li>■ übermäßiges »Einbügeln« → Verdichtung durch Bindemittelanreicherung</li></ul>
Fugenabschluss	<ul style="list-style-type: none"><li>■ bündig zu den Steinflanken oder als Hohlkehle</li></ul>	nicht zurückspringend, um Eindringen von Wasser zu vermeiden
Fugengröße	<ul style="list-style-type: none"><li>■ Fugenbreite ca. 10 mm</li><li>■ Fugentiefe: 2-facher Wert der Fugenbreite</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>■ zu enge Fugen → begrenzte Spannungsaufnahme von angrenzenden Steinquader</li><li>■ zu geringe Fugentiefe → verminderte Haftungsfläche des Mörtels am Stein, erhöht Austrocknungsgefahr</li></ul>

## Untersuchung

visuell

## Sanierung

Neuverfugen nach den Regeln der Technik

### 2.2.1.3 Schadensursache: konstruktiv

1. Bei Bewegungen des Mauerwerks wird die Haftzugfestigkeit des Mörtels zum Stein überschritten. Der Fugenmörtel reißt an den Flanken ab und bricht aus (Bild 75).

## Untersuchung

- visuell
- Feststellung des Rissverlaufs
- Messung von Risslänge, Rissbreite (Kapitel 2.1.17)
- Verformungsmessungen am Bauwerk
- Überprüfung des Baugrundes

## Sanierung

- Abstellen der Schadensursache
- bei Stillstand der Bewegung: Neuverfugen, ggf. Neuversetzen

2. Flankenabrisse an vorgehängten Fassaden

Ursache: fehlende bzw. nicht ausreichend wirksame Verankerung

Schaden: eindringende Feuchtigkeit



**Bild 75** ■ Ausbruch des Fugenmörtels durch Abscherung der Gesteinsquader

Untersuchung

- visuell
- Abnahme von Platten zur Erkundung der Konstruktion bzw. des Zustands von Ankern

Sanierung und Schadensvermeidung

Befestigung von Fassadenplatten gemäß DIN 18516, Teile 1 und 3 AUSSEN-WANDBEKLÄDUNGEN, HINTERLÜFTET [8], [6]

2.2.2 Absanden

2.2.2.1 Schadensursache: materialspezifisch

Ein Fugenmörtel mit einem ungeeigneten Bindemittel-Zuschlag-Verhältnis, falscher Sieblinie und zu geringem Wasserrückhaltevermögen weist einen unzureichenden Verbund zwischen Bindemittel und Zuschlag auf. Daraus entstehende Festigkeitsverluste führen häufig zum Absanden, also dem Herabrieseln einzelner Partikel von der Oberfläche (Tabelle 40).

Untersuchung

- visuell
- Abtasten der Mörteloberfläche
- Mörtelanalyse (Kapitel 1.3.3.7)

Tabelle 40 ■ Materialspezifische Ursachen des Absandens

Mängel	Wirkung
zu wenig Bindemittel	mangelnder Kornverband
zu hoher Gehalt an Feinanteilen	Entzug von Anmachwasser durch den Mehlkornanteil
zu viel organische Bestandteile	Schwinden oder Quellen, Störung des Erhärtungsvorgangs
zu grobe Körnung	mangelnder Kornverband, erhöhter Wasser- und Bindemittelbedarf
zu geringes Wasserrückhaltevermögen	Entzug von Anmachwasser durch die Saugfähigkeit des Steins

## Sanierung

- Ausräumen der Fugen
- Neuverfugen mit einem geeigneten Fugenmörtel (Kapitel 1.4.6)

### 2.2.2.2 Schadensursache: handwerkliche Mängel

Auch handwerklich falsche Ausführung von Verfugungsarbeiten führt zu Absandungserscheinungen, besonderen Einfluss haben dabei Vor- und Nachbehandlung von Fuge und Mörtel:

- zu schnelles Austrocknen → Störung des Abbindeprozesses
- übermäßiges Wässern → Auswaschen des Bindemittels
- kein Vornässen → Wasserentzug des Mörtels durch den Untergrund
- Verfugen bei Frost → Frieren des noch nicht abge bundenen Mörtels, Störung des Abbindeprozesses, Gefügezerstörung

## Untersuchung

- visuell
- Abtasten der Mörteloberfläche
- Kontrolle der Klimaaufzeichnungen vom Zeitpunkt der Verfugung
- Bautagebuch

## Sanierung und Schadensvermeidung

Ausräumen und Neuverfugen nach den handwerklichen Richtlinien

### 2.2.2.3 Schadensursache: Versalzung

Häufig durchnässte Mörtel reichern sich vielfach mit den eingetragenen bauschädlichen Salzen an. Als schadensverursachende Faktoren kommen sowohl leichte lösende Effekte durch das Wasser selbst als auch die Volumenveränderungen bei Auskristallisieren und Hydratation der Salze infrage. Herkunft der Salze: (Kapitel 2.1.4)

Art der Salze: (Kapitel 2.1.4)

Untersuchung: qualitative und quantitative Salzanalyse (Kapitel 1.3.3.4)

## Schadensmechanismen

siehe Kapitel 2.1.4

## Sanierung

- Abstellen der Feuchtezufuhr
- Auskratzen der Fugen und Neuverfugen mit einem geeigneten, mit dem Gestein verträglichen Mörtel

### 2.2.2.4 Schadensursache: Feuchtigkeit

Die Belastung der Fugen durch Oberflächenwasser, beispielsweise Spritzwasser, oder defekte Wasserableitung, kann zum Auflösen des Kalkes im Mörtel durch Kohlensäure bzw. im Wasser enthaltene Salze führen (Kapitel 2.1.3 SINTERKRUSTEN und Kapitel 2.1.4).

## Untersuchung

- visuell
- Abtasten

## Sanierung

- Spritzwasserschutz durch Anlegen eines Kiesstreifens
- Unterbinden der Feuchtezufuhr
- Auskratzen der Fugen und Neuverfugen

### 2.2.3 Rahmenartig vorstehender Fugenmörtel

Eine erhöhte Festigkeit des Fugenmörtels gegenüber dem Naturstein führt zu einem ungleichen Verwitterungsverhalten beider Baustoffe (Bild 76).

## Untersuchung

visuell

## Sanierung und Schadensvermeidung

- Auskratzen des Fugenmörtels
- Neuverfugen mit einem in Druckfestigkeit und E-Modul an den Naturstein angepassten Fugenmörtel (Kapitel 1.4.6).

**Bild 76** ■ Skelettartig  
vorstehender Fugenmörtel  
bei zurückgewitterten  
Steinoberflächen



## 2.2.4 Fehlstellen

Für den teilweisen oder vollständigen Materialausbruch aus Fugen können verschiedene Ursachen verantwortlich sein.

Das Bindemittel kann durch ständig einwirkendes Wasser gelöst werden, sodass keine ausreichende Festigkeit mehr besteht. Starke Rückwitterung des angrenzenden Werksteins führt zur Ablösung von Mörtelstücken. Risse infolge von Bauwerksbewegungen folgen meist dem Fugennetz, sodass zunächst eine Fugenflanke abreißt und dadurch die Stabilität des Mörtels so weit reduziert wird, dass es zu Ausbrüchen kommen kann (Kapitel 2.2.1.3).

Als Folge der zerstörten Fugen kann zunächst Niederschlagswasser in das Mauerwerk eindringen. Eine Auflockerung und Destabilisierung des gesamten Mauerwerksverbundes ist die Folge.

## Untersuchung

visuell

## Sanierung

Je nach Zustand des Fugenmörtels teilweises oder vollständiges Ausräumen der Fugen, Neuverfugen

## 2.3 Schäden an Putz und Schlämme

Speziell bei Schlämmen auftretende Schäden:

- Ablösung, meist blasenförmig
- Risse

Die folgenden Ausführungen gelten für Putze gleichermaßen wie für Schlämmen.

### 2.3.1 Ablösung

#### Erscheinungsbild

Eine Putzablösung kann sich sowohl aufgrund mangelnder Haftung zwischen Ober- und Unterputz als auch zwischen Putz und Stein einstellen. Dies gilt auch für die i. d. R. mehrlagig aufgebraachte Schlämme.

#### 2.3.1.1 Schadensursache: handwerkliche Mängel

Handwerkliche Mängel als Ursache für Putzablösung:

- zu glatter Putzgrund bzw. Unterputz → ungenügende Haftung, da keine Verbindung des Mörtels mit dem Untergrund möglich
- zu niedrige Luft- und Bauteiltemperatur ( $< +5^{\circ}\text{C}$ ) beim Verarbeiten → Frieren des Anmachwassers, fehlende Haftung und zu geringe Putzfestigkeit
- zu nasser Putzgrund, Unterputz oder Spritzbewurf → ungenügende Haftung, da der Wasserfilm auf dem Untergrund trennend wirkt
- zu stark saugender Putzgrund bei ungenügendem Vornässen → zu hoher Wasserentzug des Mörtels
- Staub oder sonstige Verschmutzung von Putzgrund, Unterputz oder Spritzbewurf → Beeinträchtigung der Haftung
- fehlender oder ungenügend deckender Spritzbewurf → ungenügende Haftung
- zu geringe Festigkeit des Putzgrundes → falsches Festigkeitsgefälle, ungenügende Haftung
- zu große Schichtdicken einzelner Putzlagen → »Absacken« frischer Putzflächen durch zu hohes Eigengewicht des Putzmörtels, Ablösungen und Rissbildung
- fehlende Nachbehandlung, d. h. kein Schutz vor Wind, Sonne → Wasserentzug
- zu kurze Standzeit zwischen den einzelnen Putzlagen → min. 1 Tag/mm Putzdicke → kein ausreichendes Abbinden

## Untersuchung

- visuell
- Abklopfen der Putzoberfläche zur Feststellung von Hohlstellen
- Kontrolle der Witterungsbedingungen bei der Verarbeitung anhand von Bautagebuch und Klimaaufzeichnungen

## Sanierung

- Abschlagen des Altputzes
- Reinigen des Putzgrundes
- Neuverputzen nach handwerklichen Richtlinien
- restauratorisches Fixieren bei kunsthistorisch wertvollen Objekten, wenn der geschädigte Putz noch an einer Teilstelle haftet (Kapitel 1.4.12.5)

### 2.3.1.2 Schadensursache: materialspezifisch

Zu den Materialfehlern, die für eine Putzablösung verantwortlich sind, zählen:

- zu hohe Festigkeit, d. h. falsches Festigkeitsgefälle zwischen Stein und Putz sowie zwischen den einzelnen Putzlagen → Verringerung der Spannungsaufnahme, z. B. durch hygrische und thermische Dehnung
- zu hoher Wasserdampfdiffusionswiderstand des Putzes → Durchfeuchtung und Salzabscheidungen zwischen Putz und Mauerwerk
- zu großer E-Modul → zu geringe Elastizität, zu geringe Aufnahme von Spannungen
- zu hohes Schwind- oder Quellvermögen → Ablösung an den Grenzflächen zum Stein
- zu hoher Anteil von wasserabweisenden Zusatzmitteln beim Unterputz → fehlende Haftung des Oberputzes
- zu hoher Anteil an organischen Bestandteilen → Quellen, Störung des Erhärtungsvorgangs

## Untersuchung

- visuell
- Abklopfen der Putzoberfläche zur Feststellung von Hohlstellen
- Mörteldruckfestigkeit nach DIN EN 1926 [17] (Kapitel 1.3.3.2.1)
- Biegefestigkeit nach DIN EN 12372 und/oder DIN EN 13161 [23] (Kapitel 1.3.3.2.3)
- Wasserdampfdiffusion nach DIN EN ISO 12572 [75] (Kapitel 1.3.3.3.8)
- Mörtelanalyse (Kapitel 1.3.3.7)
- Kontrolle der verwendeten Materialien anhand von Unterlagen, Bautagebuch



## Sanierung

siehe Kapitel 2.3.1.1

### 2.3.1.3 Schadensursache: Feuchtigkeit (Bilder 77 und 78)

#### Schadensmechanismen

- Eintrag von Salzen durch Niederschlag, Spritzwasser (Kapitel 2.1.4) → beim Verdunsten Auskristallisation der gelösten Salze im Putz oder an der Grenzfläche zwischen Putz und Stein (Kapitel 2.1.10) → Ablösen von Putzschalen
- Transport von Eigensalzen des Mauerwerks oder Salzen aus dem Erdreich durch Mauerwerksfeuchtigkeit (Kapitel 2.1.4) → Gefügezerstörung, Kristallisation von Salzen an Grenzschicht Putz/Mauerwerk oder im Putz selbst → Ablösen des Putzes
- Ettringitbildung durch Reaktion von Zement mit Gips unter Volumenausdehnung und nachfolgender Abplatzung der Putzschale (Kapitel 2.1.17.2) (Bilder 79 und 80)

#### Untersuchung

- visuell
- Überprüfung von Wasserwegen, konstruktiven Details
- Mörtelanalyse (Kapitel 1.3.3.7)
- quantitative Salzanalyse (Kapitel 1.3.3.4)
- Feuchteuntersuchung (Kapitel 1.3.3.3)

#### Sanierung und Schadensvermeidung

- Vermeiden der Feuchtezufuhr, z. B. durch:
  - konstruktive Maßnahmen
  - Anlegen eines Kiesbettes als Spritzwasserschutz
  - Horizontalabdichtung (Kapitel 1.4.8)
  - Vertikalabdichtung (Kapitel 1.4.8)
- Abschlagen des geschädigten Putzes, Neuverputz bzw. Ausbessern des Putzes
- bei Ettringit: nach Abschlagen des geschädigten Putzes und Ausstemmen des Fugenmörtels Neuverfugung und Neuverputz mit Mörtel für gipshaltiges Mauerwerk (Kapitel 2.1.17.2)

**Bild 77** ■ Ablösung der Putzlage durch Gipsbildung und Feuchtigkeit



**Bild 78** ■ Ablösung der Putzlage an dem durchfeuchteten und versalzten Mauerwerk





**Bild 79** ■ Typisches Rissbild bei Vorhandensein von Ettringit



**Bild 80** ■ Mehrere mm dicke Salzschrift aus Epsomitkristallen ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ ) unter der Putzschale

#### 2.3.1.4 Schadensursache: Rostsprengung

##### Schadensmechanismus

Rostbildung an Bewehrung, Streckmetall oder Nägeln bei Durchfeuchtung des Putzes (Kapitel 2.1.15) → punktuelle oder flächige Putzablösung

##### Untersuchung

visuell

##### Sanierung

- Abstellen der Feuchtezufuhr

- Putzsanierung:
  - Abklopfen des Putzes auf Hohlstellen
  - 1. Abschlagen aller Putzlagen des geschädigten Putzes, Ausbessern des Putzes mit Einbau einer Armierung aus rostfreiem Material
  - 2. Abschlagen des hohl liegenden Putzes
  - Rostumwandlung und Passivierung der Metallteile (Kapitel 1.4.14)
  - Aufbringen des Oberputzes

## Schadensvermeidung

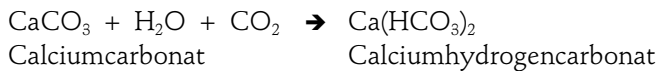
Verwendung von rostfreiem Edelstahl

Ersatz von metallischer Bewehrung durch Kunststoff- oder Glasfasergewebe

### 2.3.2 Absanden

#### 2.3.2.1 Schadensursache: Feuchtigkeit

Durch ständiges Einwirken von Wasser auf die Putzoberfläche wird das kalkige Bindemittel des Mörtels mithilfe des im Wasser enthaltenen Kohlendioxids gelöst.



## Schadensmechanismen

- Spritzwasser
- fehlerhafte Wasserableitung, konstruktive Mängel
- Salze (Kapitel 2.3.2.2)

## Untersuchung

- visuell
- Abtasten der Putzoberfläche

## Sanierung

- Spritzwasser:
  - Anlegen eines Kiestreifens als Spritzwasserschutz
  - Anstrich mit Siloxanfarbe, Dispersionssilikatfarbe
- konstruktive Mängel: ausbessern

### 2.3.2.2 Schadensursache: Salzbildung

Herkunft der Salze: (Kapitel 2.1.4)

Voraussetzungen:

- Mauerwerksfeuchte
- von außen eindringende, schadstoffbelastete Feuchte
- Luftfeuchte bei hygroskopischen Salzen

Wirkung: (Kapitel 2.4.1, Tabelle 33)

- Gefügezerstörung durch auskristallisierte Salze,
- Umkristallisation und Lösung von  $\text{CaCO}_3$  und  $\text{Ca(OH)}_2$  des Bindemittels
- Auskristallisation unter Bildung von Salzbelägen

#### Untersuchung

- Abtasten der Putzoberfläche, Kratzprobe
- quantitative und qualitative Analyse der Salze (Kapitel 1.3.3.4)
- Feuchteuntersuchung (Kapitel 1.3.3.3)
- Mörtelanalyse (Kapitel 1.3.3.7)

Ziel der Analysen:

- Kenntnis über Höhe, Herkunft der Durchfeuchtung
- Anwendbarkeit von Entsalzungsmaßnahmen
- Haltbarkeit des Putzes
- Rezeptur des Neuputzes

#### Sanierung

- Abstellen der Feuchtezufuhr, soweit möglich und erforderlich (Kapitel 1.4.8)
- Abschlagen des Putzes

Reinigen des Untergrundes

- Neuverputzen oder Ausbessern des Putzes (Kapitel 1.4.12)
- Aufbringen von **Sanierputz** bei Gefahr von verbleibenden Salzen im Mauerwerk (Kapitel 1.4.12.2)
- **Opferputz**: Das Aufbringen eines Kalkputzes als Opferputz zur Salzaufnahme ist nach neuesten Erkenntnissen nicht zu empfehlen, da der Kalkputz nicht über das ausreichende Porenvolumen und die erforderlichen Porenradien verfügt, sodass die sehr engen Poren durch die Auskristallisation der Salze verengt werden → ein Einwandern der Salze in den Putz ist dadurch kaum möglich, die Funktion eines ›Opferputzes‹ besteht damit nicht.

Weitere Maßnahmen:

Entsalzen (Kapitel 1.4.9)

- Anlegen von **Kompressen**, z.B. bei denkmalpflegerisch wertvollen Objekten
- Aufbringen einer **Salzumwandlerlösung**  
Ziel: Umwandeln der Salze in unlösliche oder schwer lösliche Verbindungen, ggf. in Zusammenhang mit Sanierputz  
Mittel:  $\text{Ba}(\text{OH})_2$ ,  $\text{PbSiF}_6$   
Probleme: geringe Eindringtiefe, Nachwanderung der Salze an die Oberfläche ist zu erwarten  
Gefahr: hoch giftig
- **Hydrophobieren** des Putzgrundes bei Vorliegen von Nitraten

**Festigen:** Erhöhen der Mörtelfestigkeit durch organische oder anorganische Festigungsmittel (Kapitel 1.4.12.4)

### Schadensvermeidung

- Vermeiden von Feuchtezufuhr durch aufsteigende oder seitlich eindringende Feuchtigkeit, konstruktive Mängel (Kapitel 2.1.4)
- Vermeiden von chemischen Reaktionen zwischen Mörtel und Stein aufgrund nicht aufeinander abgestimmter Materialien
- Vermeiden der Salzzufuhr, z.B. durch Tausalz

#### 2.3.2.3 Schadensursache: materialspezifisch

Eine falsche Zusammensetzung des Putzmörtels kann analog zum Fugenmörtel (Kapitel 2.2.2) Ursache des Absandens sein, wobei die Oberputzlage oder der gesamte Putz betroffen sein kann (Tabelle 40).

### Sanierung

Anforderungen an die Zusammensetzung von Putzmörteln sind in DIN V 18550 [65] und DIN EN 998-1 [77] genannt (Tabelle 41).

**Tabelle 41** ■ Anforderungen an Putzmörtel zum Vermeiden von Absandungen

Eigenschaft	Anforderung
Kornzusammensetzung	möglichst geringe Hohlräumigkeit, gemischtkörnige Sande, Anteil an Körnung 0–0,25: 10–30 %
Feinanteile	$\leq 3,5 \%$
Wasserrückhaltevermögen	hoch bei stark saugenden Steinen, Prüfung nach DIN EN 413-2

- Neuverputz: Der zur Sanierung verwendete Putz sollte den Anforderungen in Tabelle 41 entsprechen.
- Festigung: (Kapitel 1.4.12.4)

### Schadensvermeidung

- ausreichendes Vornässen des Untergrundes und Nachbehandeln durch Schutz vor Wind- und Sonneneinwirkung, um Wasserentzug zu vermeiden
- Verwendung von **Werktrocknemörteln** zur Vermeidung von Mischungsfehlern, die leicht bei baustellengemischten Mörteln auftreten können, und zur Gewährleistung einer gleichmäßigen Qualität  
Nachteil: Werktrocknemörtel sind meist feinkörnig zur Vermeidung von Entmischungen und zur Maschinengängigkeit

#### 2.3.2.4 Schadensursache: Frost

### Schadensmechanismus

Das Einwirken von Frost während des Abbindevorgangs des Mörtels stört das Abbindeverhalten und den Festigkeitsaufbau im Putz und führt zu Ablösungen von Zuschlagskörnern.

### Untersuchung

- Abtasten der Putzoberfläche
- Wetterdaten
- Bautagebuch

### Sanierung

- Festigen des Putzes (Kapitel 1.4.12.4)
- Abschlagen des Putzes und Neuverputz

#### 2.3.3 Schwindrisse

### Erscheinungsbild

Schwindrisse sind netzartige oder nicht zusammenhängende Risse mit unterschiedlichen Rissweiten, die an der Oberfläche verlaufen oder die gesamte Putzfläche durchschlagen (Bild 81).

### Definition:

Im Zuge des Erhärtungsvorgangs und durch die Verdunstung des Überschusswassers schwindet der Mörtel und es können Schwindrisse entstehen.





**Bild 81** ■ Schwindrisse  
an der Putzoberfläche

Sie sind auf ungeeignete Mörtelzusammensetzung und handwerkliche Mängel zurückzuführen.

- zu hoher Bindemittelgehalt oder Bindemittelanreicherung an der Oberfläche durch zu langes Glätten → erhöhter Wasserbedarf
- zu hoher Mehlkornanteil → erhöhter Wasserbedarf
- fehlender Schutz vor Wind und Sonne → Wasserentzug
- ungleichmäßig dicker Putzauftrag oder zu dicke Putzlagen

Damit sind Schwindrisse abhängig von der

- Menge des Anmachwassers,
- Luftfeuchtigkeit.

## Untersuchung

- visuell (Hinweise auf tonige Bestandteile: Gelbbraunfärbung und Quellung bei Benetzung mit Wasser)
- Mörtelanalyse → Bindemittelgehalt, Feinanteile (Kapitel 1.3.3.7)
- Kontrolle der klimatischen Bedingungen durch Bautagebuch bzw. Bauüberwachung

## Sanierung

Oberflächliche Risse:

- Anstrich mit gefüllter oder fasermierter Farbe. Dabei ist auf einen niedrigen Wasseraufnahmekoeffizient ( $w = 0,1\text{--}0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ ) und Diffusionswiderstand ( $s_d = 0,1\text{--}0,5 \text{ m}$ ) zu achten.



Durchschlagende Risse:

- Aufbringen einer zusätzlichen bewehrten Oberputzlage nach den Regeln der Technik
- Abschlagen des Putzes und Neuverputzen

## Schadensvermeidung

Beachtung der Regeln der Technik

### 2.3.4 Putzdurchschlagende Risse

#### Schadensmechanismen

Durch mehrere Putzlagen gehende Risse entstehen, wenn der Putz auftretende Spannungen nicht mehr aufnehmen kann und die Zugfestigkeit des Putzes überschritten wird.

- Temperatur- und Feuchtigkeitsveränderung infolge Bewitterung → unterschiedliche thermische und hygrische Ausdehnungskoeffizienten verschiedener Materialien → Risse
- Schwindrisse (Kapitel 2.3.3)
- konstruktive Risse

#### 2.3.4.1 Schadensursache: thermische Spannung

Beim Überputzen von Materialien mit stark unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten stellen sich Risse ein. Dies gilt für Holz, Metall und andere Materialien.

#### Untersuchung

- visuell
- Messung von Risslänge, Rissbreite (Kapitel 2.1.17)
- Feststellen der Risttiefe durch Aufstemmen
- Feststellung des Rissverlaufs

#### Sanierung

Der Anschluss eines Blechs an eine Putzfläche erfolgt üblicherweise mit einer Putzleiste (Kapitel 1.4.17).

Wenn Abdeckbleche, z.B. bei historischen Gebäuden, überputzt werden müssen, ist über der zugbelasteten Zone eine Bewehrung zu verwenden, die in den Unterputz eingearbeitet wird (Bild 82).



## Untersuchung

- visuell
- Messung von Risslänge, Rissbreite (Kapitel 2.1.17)
- Feststellen der Risttiefe durch Aufstemmen
- Feststellung des Rissverlaufs
- Feststellen des Untergrundes durch Aufstemmen

## Sanierung

- bei schwierigem Putzgrund wie Mischmauerwerk: Einbau eines Putzträgers (Kapitel 1.4.12)
- Risse des Putzgrundes: Schließen der Risse (Kapitel 1.4.15), Aufbringen einer Putzbewehrung (Kapitel 1.4.12)
- putzdurchschlagende Schwindrisse: (Kapitel 2.3.3)

### 2.3.4.3 Schadensursache: konstruktiv

Ursachen für bauldynamische Risse (Kapitel 2.1.17):

- Bewegung des Baugrundes durch Setzung, Bergbau, Verkehrserschütterung (Bild 83)
- punktuelle Überbelastung des Mauerwerks

## Untersuchung

- visuell
- Messung von Risslänge, Rissbreite (Kapitel 2.1.17)
- Messung der Rissbewegung (Kapitel 2.1.17)
- Feststellen der Risttiefe durch Aufstemmen
- Feststellung des Rissverlaufs
- Untersuchung des Baugrundes

## Sanierung

- Abstellen der ursächlichen Rissbewegung, wenn möglich
- Aufbringen einer Putzbewehrung (Kapitel 1.4.12)  
Voraussetzung für eine Sanierung ist das Ruhen der Risse. Da der Riss aber weiterhin z.B. durch thermische Änderung Bewegungen ausgesetzt ist, kann die Rissbildung bei größeren Rissen nicht durch eine Bewehrung verhindert werden. Die Gefahr der Rissbildung wird aber reduziert.
- bei andauernder Rissbewegung: Ausbildung einer Bewegungsfuge, verschlossen mit elastischem Material, Fugenband oder Fugenprofil



**Bild 83** ■ Risse im Putz durch Baugrundbewegungen aufgrund einer angrenzenden Tiefbaumaßnahme

## 2.3.5 Verfärbung

### 2.3.5.1 Schadensursache: Durchfeuchtung

#### Erscheinungsbild

Feuchtigkeit führt zu Farbveränderungen des Putzes, meist fleckenartig in dunkleren Farbtönen.

Vorkommen: Außenputz, Innenputz

## Ursache

- defekte Wasserableitungen, Dachabdichtungen, Dachziegel, Rohrleitungen
- Spritzwasser
- Erhöhung der Ausgleichsfeuchte durch flächige oder punktuelle Belastung mit hygroskopischen Salzen

## Schäden

- optische Beeinträchtigung
- Feuchteintrag in Putz und Mauerwerk → Salzbildung (Kapitel 2.1.4), Putzablösung (Kapitel 2.3.1), Absanden (Kapitel 2.3.2)

## Untersuchung

visuell

## Sanierung

- konstruktiv
- Abstellen der Feuchtezufuhr
- Spritzwasser: Anlegen eines Kiesstreifens
- Ausbessern des Putzes
- ggf. Reinigung: Druckwasserstrahlen, 50 bis 80 bar, ca. 50 °C
- Anstrich des ausgetrockneten Putzes

### 2.3.5.2 Schadensursache: materialspezifisch

Vorkommen: Außenputz, Innenputz

## Ursache

- Reaktion des alkalischen, feuchten Putzes mit Mineralien des Putzgrundes, z. B. Mobilisierung von Fe-Verbindungen → Gelb- oder Braunfärbung
- Gerüstlagen sind als etwas dunklere Bereiche im Putz erkennbar: tritt vor allem bei Silikatputzen auf, die bei niedrigen Temperaturen und direkter Sonneneinstrahlung erhärten
- wolkiges Erscheinungsbild bei eingefärbtem Putz:  
nicht ausreichende Durchmischung des Trockenmörtels,  
unterschiedliches Austrocknungsverhalten einzelner Bereiche

## Untersuchung

- visuell
- qualitative und quantitative Salzanalyse (Kapitel 1.3.3.4)

## Sanierung und Schadensvermeidung

- Anstrich:
  - chemisch neutral reagierender Anstrich, z. B. Siliconharzemulsion
- Putz:
  - Auftragen einer hydrophobierenden Grundierung → Reduzierung des kapillaren Wassertransports, sofortiger Auftrag des Putzes oder Spritzbewurfs zur Gewährleistung der Haftung
  - Auftrag eines porenhydrophoben Putzes
- Abhängen des Gerüsts
- Vermeidung von dunkleren Farbtönen bei eingefärbten Putzen

### 2.3.5.3 Schadensursache: Verunreinigung

#### Schadensmechanismus

Anlagerung von Ruß, Staub und Mikroorganismen (Kapitel 2.1.3 und 2.1.1) (Bild 84)

#### Untersuchung

visuell

#### Sanierung

Reinigung:

- Druckwasserstrahlen, je nach Beschaffenheit des Putzes 50 bis 80 bar, ca. 50 °C
- mechanisch mit Wasser und Bürste bei kleineren Flächen
- Fungizid- und/oder Algizidbehandlung des Putzes



**Bild 84** ■ Vergrünung  
des Putzes

## 2.4 Schäden an Anstrichen

### 2.4.1 Ablösung

#### Erscheinungsbild

Bei einer Ablösung besteht lokal oder großflächig keine Haftung der Anstrichschicht am Untergrund. Hohlstellen können einzelne kleinere Blasen oder zusammenhängende Flächen betreffen und bis zur vollständigen Entfernung der Beschichtung führen.

#### 2.4.1.1 Schadensursache: materialspezifisch

Hat der Anstrich eine geringere Wasserdampfdurchlässigkeit als der Untergrund, wird eine Verdunstung von Wasser bei Durchfeuchtung des Baustoffs behindert.

#### Schäden

- Frostabsprengung (Kapitel 2.1.10)
- Verfärbung durch Durchfeuchtung (Kapitel 2.4.3; Bild 85)
- Ablösung durch Salzbildung, wenn mittransportierte Salze an der Grenzschicht zwischen Untergrund und Anstrich auskristallisieren (Kapitel 2.1.4)

#### Untersuchung

- visuell
- Messung der Wasserdampfdiffusion (Kapitel 1.3.3.3.8)

#### Sanierung

- Entfernung des Anstrichs (Kapitel 1.4.3)
- Neuanstrich mit Farbsystemen, die einen geringeren Wasserdampfdiffusionswiderstand ( $s_d$ -Wert) als der Untergrund aufweisen



**Bild 85** ■ Aufsteigende Feuchtigkeit führt neben dem Absanden des Gesteins auch zur Ablösung des wasserdampfdichten Anstrichs

### 2.4.1.2 Schadensursache: handwerkliche Mängel

- Verarbeitung bei zu geringer Untergrundtemperatur bringt die Gefahr von Frostschäden mit sich
  - ➔ fehlende Haftung bei wässrigen Farben
  - ➔ Behinderung der Polymerisation bei Farben mit organischen Anteilen
- Der Untergrund ist nicht ausreichend tragfähig ➔ Ablösung des Anstrichs
- fehlende Grundierung ➔ die Haftung des Anstrichs ist bei sandenden Untergründen und unterschiedlicher Saugfähigkeit eingeschränkt, Anhaften von Resten des Untergrundes an der Beschichtung

### Untersuchung

- Bautagebuch, Wetterdaten
- visuell, auch Unterseite der Beschichtung



## Sanierung und Schadensvermeidung

- Entfernen des Anstrichs (Kapitel 1.4.3) und Neuanstrich nach den Regeln der Technik (Kapitel 1.4.13)
- Reinigung zur Entfernung von losen Bestandteilen (Kapitel 1.4.1)
- ggf. Herstellen eines tragfähigen Untergrundes
  - ➔ Zurückarbeiten
    - Festigen (Kapitel 1.4.10)
    - Grundieren

### 2.4.1.3 Schadensursache: Feuchtigkeit

#### 1. konstruktive Mängel

starke Beaufschlagung mit Wasser durch z. B. fehlenden Dachüberstand, mangelndes Gefälle oder durch Spritzwasser

- ➔ kapillares Eindringen von Feuchtigkeit, Durchfeuchten des Untergrundes, verlangsamtes Entweichen des Wassers  
Gefügebrauchlockerung der Baustoffoberfläche, ggf. verbunden mit Salzkristallisation (Kapitel 2.1.4)
- ➔ Verminderung der Haftung des Anstrichs

#### Sanierung

- Behebung konstruktiver Mängel
- Anlegen eines Kiesstreifens als Spritzwasserschutz
- Entfernen des Anstrichs (Kapitel 1.4.3)
- Neuanstrich mit Dispersionssilikatfarbe, Siliconharzemulsionsfarbe

#### 2. Taupunktunterschreitung

- ➔ feuchter Untergrund (Kondensation auf Mauerwerk, Kapitel 1.3.3.3.6)
- ➔ Verzögerung der Filmbildung bei organischem Anteil bzw. ungenügende Verankerung

#### Sanierung

- Farbentfernung (Kapitel 1.4.3)
- Aufbringen des Anstrichs bei entsprechenden Klimabedingungen, s. u.

#### Schadensvermeidung

- Aufbringen des Anstrichs bei fallenden Temperaturen
- Verringerung der Wasseraufnahme der Luft mit geringerer Temperatur
- Verringerung der Kondensation

### 3. Anstrichauftrag auf feuchten Untergrund

- Verzögerung der Filmbildung bei Dispersionsfarben
- Verhinderung der Anstrichverankerung, da organisches Lösemittel bzw. Wasser nicht von wassergefüllten Poren des Untergrundes aufgenommen werden kann

#### Sanierung

- Trockenlegung (Kapitel 1.4.8)
- Austrocknen des frisch aufgetragenen Putzuntergrundes
- Entfernen des Anstrichs (Kapitel 1.4.3), Neuanstrich (Kapitel 1.4.13)

#### 2.4.1.4 Schadensursache: schadhafter Untergrund

- Schäden im Untergrund setzen sich ebenfalls im Anstrich weiter fort, z. B. Putzablösung (Kapitel 2.3.1)  
Absanden des Natursteins → Ablösen des Anstrichs (Kapitel 2.1.7 und 2.4.1.2)
- Der Untergrund kann für einen nachfolgenden Anstrich nicht geeignet sein und zu Ablösungen führen.
  - ▣ Putzeinschlüsse, z. B. Kalktreiben: Aktivierung von ungelöschten oder nicht vollständig abgelöschten Kalkteilchen in Kalkputzen durch wässrigen Anstrich → punktuell Ablösen

#### Untersuchung

qualitative Analyse der Putzeinschlüsse (Kapitel 1.3.3.2)

#### Sanierung

Wenn möglich, vollständiges Entfernen des Putzes, um weitere Schäden bei später eindringender Feuchtigkeit zu verhindern.

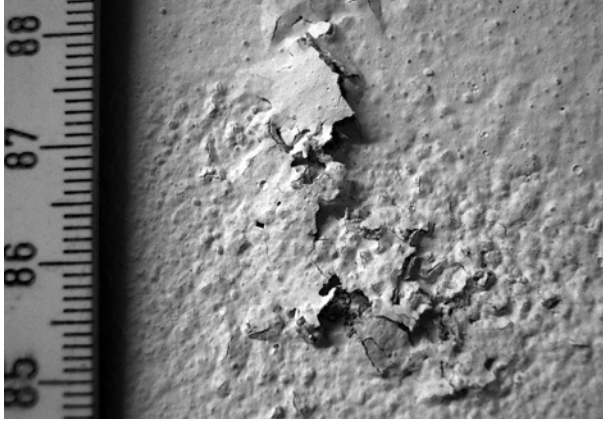
#### 2.4.1.5 Schadensursache: Salzbildung

Voraussetzung: Feuchtigkeit

##### Herkunft der Salze:

Eigensalze des Mauerwerks, durch aufsteigende Feuchtigkeit eingetragene Salze oder durch atmosphärische Einflüsse neu gebildete Stoffe

- Auskristallisation zwischen Mauerwerk und Anstrich
- Ablösen des Anstrichs (Bild 86)



**Bild 86** ■ Salze drücken den Anstrich vom Untergrund ab

## Sanierung

- Abstellen der Feuchtezufuhr (Kapitel 1.4.8)
- Entsalzung (Kapitel 1.4.9)
- Entfernung des Anstrichs (Kapitel 1.4.3)
- Neuanstrich (Kapitel 1.4.13)

## 2.4.2 Risse

### 2.4.2.1 Schadensursache: Risse im Untergrund

Risse im Untergrund setzen sich auch im Anstrich fort.

- Putzrisse (Kapitel 2.3.3 und 2.3.4)
- Risse im Naturstein (Kapitel 2.1.15, 2.1.16 und 2.1.17)

## Untersuchung

- visuell: Aus dem Rissverlauf bzw. den typischen Rissbildern kann auf Risse im Untergrund geschlossen werden.
- visuell und mechanisch zur Beurteilung, ob der Riss nur in der Beschichtung verläuft oder auch in den Untergrund reicht

## Sanierung

- Neuverputzen mit Aufbringen einer Putzbewehrung (Kapitel 1.4.12)
- Rissanierung (Kapitel 1.4.15)
- Bei Rissen mit einer Rissweite  $< 0,1$  mm kann eine gefüllte, ggf. auch faser-armierte Farbe verwendet werden.

Voraussetzung: Entfernen von lose haftenden Bestandteilen

### 2.4.2.2 Schadensursache: thermische Längenänderung

Besonders **dunkle** Farben können viel Wärme speichern und haben eine höhere Oberflächentemperatur. Nachteilig wirkt sich vor allem der Temperaturwechsel auf Beschichtungen aus:

- höhere thermische Ausdehnungskoeffizienten vor allem von organischen Beschichtungen gegenüber mineralischen Baustoffen
  - Spannung zwischen Baustoff und Anstrich bei Temperatureinwirkung
  - Risse (Bild 87)

### Untersuchung

visuell

### Sanierung

Entfernen des Anstrichs (Kapitel 1.4.3) und Neuanstrich mit hellen Farbtönen



**Bild 87** ■ Farbablösung mit krakeleeartigen Rissen eines dampfdichten Anstrichs

### 2.4.2.3 Schadensursache: hygrische Längenänderung

Anstriche auf Untergründen mit starker hygrischer Längenänderung erhalten Risse, da die Verformung des Untergrundes nicht vom Anstrich aufgenommen werden kann.

### Sanierung

- Farbentfernung (Kapitel 1.4.3), Neuanstrich (Kapitel 1.4.13)
- bei vereinzelt Rissen ggf. Entfernen loser Anstrichteile, Aufbringen eines zusätzlichen Anstrichs

## Schadensvermeidung

- Beachten der Austrocknungszeit des Untergrundes
- Beachten der Herstellervorschriften

### 2.4.3 Verfärbung

#### 2.4.3.1 Schadensursache: Mobilisation von Mineralen

1. Fe- und Mn-Verbindungen des Anstrichuntergrundes, z.B. Eisenoxide, Eisenhydroxide bzw. -oxidhydrate des Sandsteins, werden in saurem Milieu gelöst und fallen im alkalischen Bereich von Anstrichen wieder aus → gelbbraune bis braune Flecken auf Anstrichoberfläche

#### Sanierung

- Entfernen des Anstrichs (Kapitel 1.4.3)
- Aufbringen eines chemisch neutral reagierenden Anstrichsystems
- Aufbringen einer absperrenden Grundierung (DIN 18363 [167]), um die weitere Einwanderung der färbenden Substanzen zu verhindern. Dies ist an Außenwänden wegen der starken Verringerung der Wasserdampfdiffusionsfähigkeit jedoch nur in Einzelfällen anwendbar.

2. Mobilisation von Kupferverbindungen (Kapitel 2.1.5)

#### Erscheinungsbild

Grüne Verfärbung an Fassadenoberfläche im Spritzwasserbereich von Kupferblechen oder durch Ablaufspuren von Wasser, das auf Kupferbleche auftrifft.

#### Sanierung

- Reinigung mit schwach sauren Lösungen, wie verdünnte Essigsäure oder Zitronensäure, ggf. Bleichmittel, Vorversuch an Musterfläche
- Entfernen des Anstrichs (Kapitel 1.4.3)
- Neuanstrich

#### Schadensvermeidung

- funktionstüchtige Regenwasserableitung
- ausreichender Überhang von Gesims- oder Sohlbankblechen
- Beschichtung von Blechen mit farblosem Lack
- Verwendung von vorpatiniertem Kupferblech
- Verwendung von anderen Materialien, z. B.
  - Zink
  - Blei
  - Titan-Zink-Legierung

### 3. Rostfahnen von korrodierten Eisenteilen

#### Sanierung

- Reinigung mit schwach sauren Lösungen, wie verdünnte Essigsäure oder Zitronensäure, ggf. Bleichmittel, Vorversuch an Musterfläche
- Entfernen des Anstrichs (Kapitel 1.4.3)
- Neuanstrich (Kapitel 1.4.13)
- Korrosionsschutz an Eisenteilen (Kapitel 1.4.14)

#### Schadensvermeidung

- Verwendung von korrosionsbeständigem Material, z. B. hochwertiger Edelstahl
- Korrosionsschutzanstrich

### 2.4.3.2 Schadensursache: handwerkliche Mängel

1. Auftrag von Dispersionsfarben bei zu niedrigen Untergrundtemperaturen führt zu unterschiedlicher Farbwirkung

#### Sanierung und Schadensvermeidung

- Beachten der Regeln der Technik
- Beachtung der Herstellervorschriften

2. Abzeichnen von Gerüstlagen, Verstrebungen etc. durch starkes Abkühlen oder Aufheizen von Silikatanstrichen

#### Sanierung

Neuanstrich (Kapitel 1.4.13), dabei Abplanen des Gerüsts zur Vermeidung von extremen Lichtverhältnissen

#### Schadensvermeidung

Abplanen s. o., Durchführung der Arbeiten bei geeigneten Wetterbedingungen

3. Unterschiedlicher Abbau des Hydrophobierungsmittels von hydrophobierten Silikatfarben (Kapitel 2.1.5)

#### Sanierung

- Reinigung des Anstrichs (Kapitel 1.4.1), Erneuerung der Hydrophobierung (Kapitel 1.4.11)
- Entfernung des Anstrichs (Kapitel 1.4.3)  
Neuanstrich (Kapitel 1.4.13)

#### Schadensvermeidung

Handwerklich sorgfältige Ausführung der Hydrophobierung

### 2.4.3.3 Schadensursache: materialspezifisch

1. Nachdunkeln von Dispersionsfarben: Ursache liegt in der Verringerung der Lichtbrechung mit zunehmender Verfilmung, die längere Zeit andauern kann  
→ bei flächigem Auftrag keine optische Beeinträchtigung, bei Ausbesserungen ist die unterschiedliche Färbung jedoch zu beachten.

Sanierung

Ausbesserung von zusammenhängenden Flächen

### 2.4.3.4 Schadensursache: Feuchtigkeit

#### Erscheinungsbild

Die Durchfeuchtung von Anstrichflächen führt zu einer Dunkelfärbung.

#### Ursache

- konstruktive Mängel
- starke Beaufschlagung mit Feuchtigkeit an Wetterseite
- Spritzwasser
- Durchfeuchtung des Untergrundes (Kapitel 2.1.4)

#### Sanierung

- Beseitigung konstruktiver Mängel
- Anlegen eines Kiesstreifens als Spritzwasserschutz
- Horizontal- bzw. Vertikalabdichtung (Kapitel 1.4.8)
- Aufbringen eines wasserdampfdiffusionsfähigen Anstrichsystems mit geringer kapillarer Wasseraufnahmefähigkeit

## 2.4.4 Abkreiden

#### Erscheinungsbild

Durch Zersetzung des Bindemittels des Anstrichs freigelegte Partikel, die einen abwischbaren Belag bilden.

#### Schadensmechanismen

- oxidativer Abbau von Pigmenten und Bindemittel durch UV-Strahlen
- Entzug von Bindemittel durch zu saugfähigen Untergrund → Anreicherung von nicht eingebundenen Pigmenten an der Oberfläche

Damit verbundene **Schäden**: Nutzungsbeeinträchtigung, Schichtdickenverminderung, Glanzverlust

Durch Alterungsprozesse ist eine gewisse Kreidung unvermeidlich, sie lässt sich jedoch durch spezielle Rezeptierung der Inhaltsstoffe reduzieren.

## Untersuchung

Klebebandmethode: relative Beurteilung der am Klebeband haftenden kreidenden Substanz nach DIN EN ISO 4628-6 [198]

## Sanierung

- Reinigung, ggf. mit Warmwasserstrahlen, ca. 50 bar, 80 °C
- Neuanstrich mit Dispersionssilikatfarbe → organischer Anteil erforderlich zur Haftung auf kreidendem Untergrund
- Neuanstrich verträglich mit Altanstrich

## Schadensvermeidung

Grundierung bei stark saugfähigem Untergrund

### 2.4.5 Bewuchs

#### Erscheinungsbild

Bewuchs in Form von Algen, Flechten, Mikroorganismen findet Nährboden besonders auf organischen, durchfeuchteten Anstrichen (Kapitel 2.1.1)

#### Sanierung

- mechanische Bewuchsentfernung mit Bürste und Wasser an kleineren Flächen
- Warmwasserstrahlen, ca. 50 bar, 80 °C

#### Schadensvermeidung

- biozide Einstellung der Anstriche
- Auftrag eines Biozids auf den Anstrich, an bewuchsgefährdeten Stellen  
Vorsicht: u. U. Auffangvorrichtungen erforderlich, wenn nicht biologisch abbaubar



## 2.4.6 Salzausblühung

### Erscheinungsbild

Sind durchfeuchtete, versalzene Steine mit einem porösen, kapillar leitfähigen Anstrich (z.B. Silikatanstrich) beschichtet, können die Salze auf der Anstrichoberfläche auskristallisieren. Sie bilden meist einen weißgefärbten Kristallrasen (Kapitel 2.1.4 und 2.3.2).

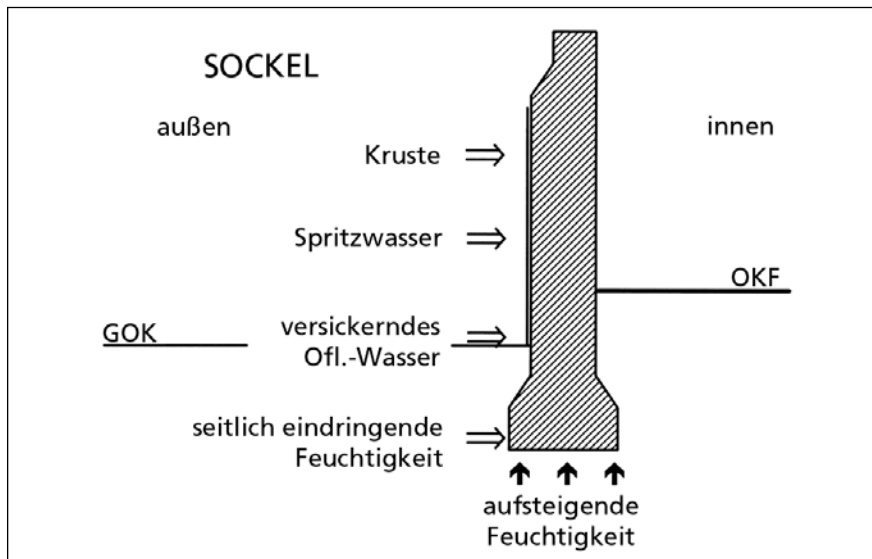
### Sanierung

- Trockenlegung (Kapitel 1.4.8)
- Entfernen des Anstrichs (Kapitel 1.4.3)
- Reinigen des Anstrichgrundes von losen, nicht haftenden Bestandteilen (Kapitel 1.4.1)
- Neuanstrich (Kapitel 1.4.13)

## 2.5 Schäden an Bauteilen

### 2.5.1 Sockel

Erscheinungsbild und Schadensursache (Bild 88), (Tabelle 42)



**Bild 88** ■ Schadensbereiche an Sockeln

**Tabelle 42** ■ Typische Schäden an Sockeln

Schadensursache	Schaden	Sanierung Verweis auf Kapitel
Spritzwasser	■ Gefügebrauflockerung durch Tausalz	2.1.4.4
	■ Absanden	2.1.7
	■ Verfärbung	2.1.5
	■ Bewuchs	2.1.1
	■ Schuppen	2.1.9
	■ Schalen	2.1.10
	■ Aufblättern	2.1.12
	■ Farbablösung	2.4.1
Feuchtigkeit (aufsteigend, seitlich eindringend, Oberflächenfeuchtigkeit)	■ Salzbildung	2.1.4
	■ Putzablösung	2.3.1
	■ weitere Schäden wie bei Spritzwasser	
Schmutzanlagerung	Kruste	2.1.3

## Sanierung und Schadensvermeidung

### Spritzwasser

- Spritzwasserschutz durch Kiesbett
- Verwendung von wasserabweisendem Putz bzw. Sanierputz (Kapitel 1.4.12.2)

### versickerndes Oberflächenwasser

- Dränung (Kapitel 1.4.8.4)
- von der Fassade weggerichtetes Gefälle des angrenzenden Bodenbelags

### aufsteigende Feuchtigkeit

- Einbau einer Horizontalabdichtung, begleitende Maßnahmen (Kapitel 1.4.8 und 2.1.4)
- Horizontal- und Vertikalabdichtung bei seitlich eindringender Kellerfeuchtigkeit (Kapitel 1.4.8)

### Kruste

- regelmäßige Reinigung (Kapitel 1.4.1)

## 2.5.2 Tür

### Schadensbereiche (Bild 89)

#### a) Sturz

Schäden: Risse (Kapitel 2.1.15)

Ursache:

- konstruktiv, geringe Dimensionierung, ungeeignetes Material → zu hohe Auflast
- Bewegung des Baukörpers → Rissbildung im Bereich von Schwachstellen

Untersuchung: statische Berechnung, Druckfestigkeitsbestimmung

Sanierung:

- Steinaustausch (Kapitel 1.4.4)
- Verklammern (Kapitel 1.4.15)

#### b) Anschluss Gewände/Mauerwerk bzw. Gewände/Rahmen

Schäden: defekte Fugen, Abdichtung

Ursache:

- Fehlstellen (Kapitel 2.2.4)
- Risse (Kapitel 2.2.1)
- Versprödung von elastischem Fugenmaterial → Eindringen von Feuchtigkeit

Untersuchung: visuell

Sanierung: Neuverfugen (Kapitel 1.4.6)

#### c) Gewände

Schäden: Rostsprengung der Türaufhängung (Kapitel 2.1.15), (Bild 90)

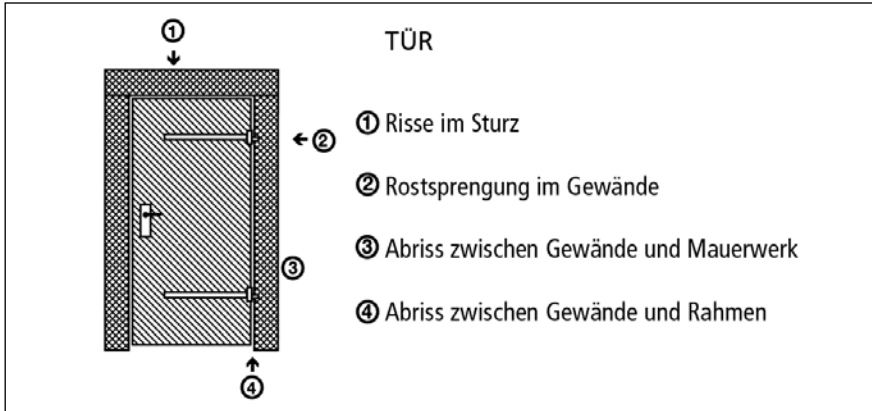
Ursache: Einbau von nicht korrosionsgeschütztem Material, defekte Einlassung der Aufhängung im Stein

Untersuchung: visuell

Sanierung:

- Steinaustausch (Kapitel 1.4.4)
- Einbau einer Aufhängung aus rostfreiem Material, z. B. Cr-Ni-Mo-Stahl
- Einlassung der Verankerung mit Blei oder Zement
- Ausbau, Entrosten und Korrosionsschutzanstrich (Kapitel 1.4.14)

Schadensvermeidung: (Kapitel 2.1.15)



**Bild 89** ■ Mögliche Schäden im Bereich von Türen



**Bild 90** ■ Rostsprengung  
an den Kloben der Türauf-  
hängung

## 2.5.3 Treppe

### Schadensbereiche (Bild 91)

#### a) Anschluss Treppe/Mauerwerk

Schäden und Schadensursachen:

- Spritzwasser → Salzbildung (Kapitel 2.1.4), Bewuchs (Kapitel 2.1.1), Putzabsanden (Kapitel 2.3.2)
- defekte Fugen → Eindringen von Feuchtigkeit: Salzbildung (Kapitel 2.1.4), Putzablösung (Kapitel 2.3.1), Frostsprengung (Kapitel 2.1.10)
- defekte oder fehlende Entwässerung → Eindringen von Feuchtigkeit, s. o.

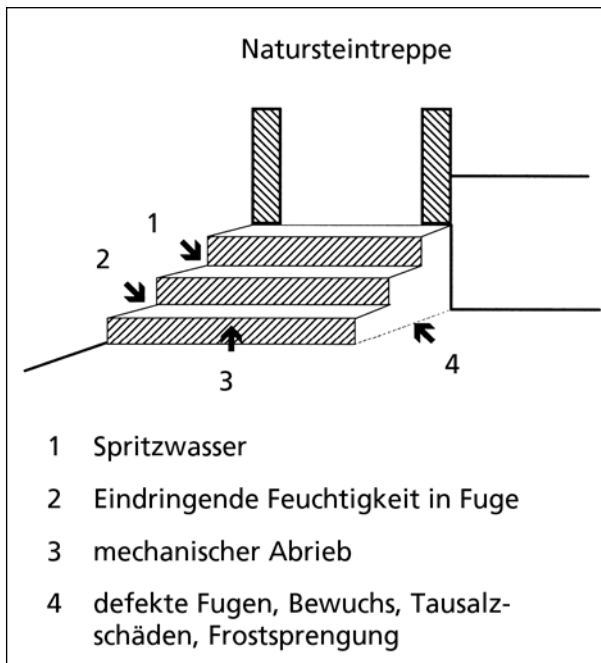
Sanierung:

- Fugen: Neuverfugen (Kapitel 1.4.6)
- Entwässerung: Anlegen einer Entwässerung, siehe b)
- Spritzwasserschäden, Feuchtigkeitsschäden: Kapitel s. o.

#### b) Treppenstufe

Schäden und Schadensursachen:

- Moos- und Algenbewuchs (Kapitel 2.1.1)
- Substanzverlust durch ausgetretene Stufen (Bild 92)



**Bild 91** ■ Mögliche Schadensbereiche einer Treppe

- Risse: Überbelastung durch mangelndes oder falsch dimensioniertes Fundament (Kapitel 2.1.17)
- Feuchtigkeitsschäden → Frostsprengung (Kapitel 2.1.10), Eindringen in Fugen, siehe c)
- Verfärbung: aufsteigende Feuchtigkeit, Hydratation des Verlegemörtels (Kapitel 2.1.5), (Bild 93)



**Bild 92** ■ Materialverlust  
an den Trittflächen



**Bild 93** ■ Salzschiiden  
und Verfärbung durch von  
der Treppe ablaufendes  
Wasser

### Sanierung:

- Bewuchs: Reinigung (Kapitel 2.1.1)
- Substanzverlust: evtl. Steinaustausch (Kapitel 1.4.4)
- Risse: Steinaustausch, Fundamentierung
- Verfärbung: horizontale Abdichtung, Reinigung oder Steinaustausch
- Entwässerung → Anlegen eines leichten Gefälles (ca. 1 % nach überkommenen Regeln der Technik)  
Verlegen der Stufen mit Anschlag

### c) Fuge

#### Schäden und Schadensursachen:

- Fehlstellen des Fugenmörtels zwischen den Stufen (Kapitel 2.2.4) → Eindringen von Feuchtigkeit → Frostsprengung (Kapitel 2.1.10)
- Flankenabrisse des Fugenmörtels:
  - Schwinden des Verlegemörtels oder Fugenmörtels
  - konstruktiv: Flankenabrisse des Mörtels durch Bewegung des Baukörpers → (Kapitel 2.2.1) → Eindringen von Feuchtigkeit, s. o.
  - fehlerhafte Zusammensetzung des Verlegemörtels

### Sanierung:

- Neuverfugen mit elastischem, schwindarmem Material, z.B. Trasskalkzement oder kunststoffmodifiziertem Mörtel

## 2.5.4 Fenster

### Schadensbereiche (Bild 94)

#### a) Sturz

#### Schäden und Schadensursachen

- Risse:  
Überlastung des Fenstersturzes durch fehlenden oder unzureichenden Entlastungsbogen → steindurchschlagende Risse im Sturz (Kapitel 2.1.17), (Bild 95)

### Sanierung

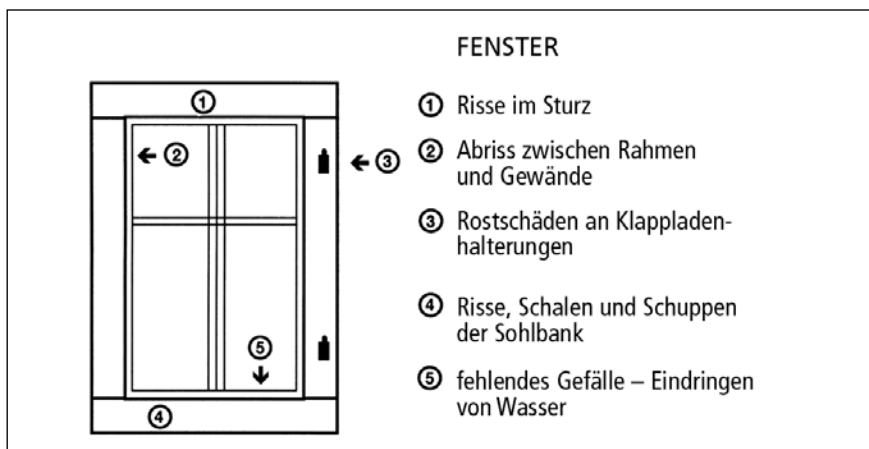
- Instandsetzung des Entlastungsbogens
- Steinaustausch (Kapitel 1.4.4)
- Verklammern, Verfüllen des Risses (Kapitel 1.4.15)

#### b) Sohlbank

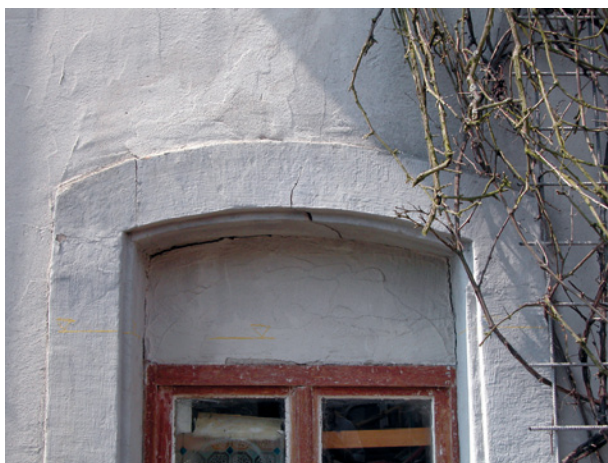
#### Schäden und Schadensursachen (Bild 96)

- Risse infolge Überbelastung oder durch schichtparalleles Aufblättern





**Bild 94** ■ Mögliche Schäden an Fensterumrahmungen



**Bild 95** ■ Risse im Sturz des Fensters

- Schuppen, Schalen an Untersicht durch fehlende oder falsche Ausbildung einer Tropfnase (Kapitel 2.1.9 und 2.1.10)
- fehlendes oder zu gering ausgebildetes Gefälle → keine Wasserableitung, Eindringen von Feuchtigkeit in Fassade
  - Verfärbung (Kapitel 2.1.5)
  - Schalen (Kapitel 2.1.10)
  - Putzablösung (Kapitel 2.3.1)
  - Farbablösung (Kapitel 2.4.1)

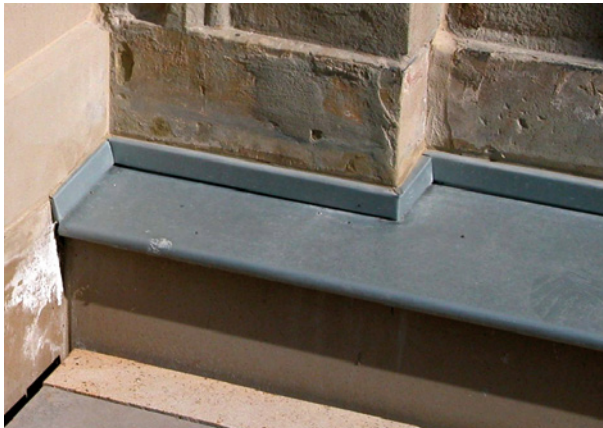
#### Sanierung (Bild 97)

- Risse: Verklammern, Verfüllen der Risse (Kapitel 1.6.15), Steinaustausch mit Tropfnase und Gefälle, ca. 10°





**Bild 96** ■ Mehrfache Schädigung einer Sohlbank durch Schalenbildung an der Oberfläche, Risse entlang von Tonlagen und Korrosion am Auflager des Gewändes



**Bild 97** ■ Die Blechabdeckung einer Fenstersohlbank ist in der Mauwerksfuge eingelassen

- Schuppen, Schalen:
  - steinmetzmäßiges Abarbeiten
  - Kombination von Festigung und Blechabdeckung: Sanierung des Steins und Schutz vor weiterem Eindringen von Niederschlag (bei alleiniger Festigung besteht die Gefahr, dass Feuchtigkeit durch Fugen oder Risse eindringt)
  - bei starker Schalenbildung: Steinaustausch s. o.
- Verfärbung, Putzablösung, Farbablösung: s. o.

### c) Gewände

#### Schäden und Schadensursachen

- Rostsprengung: Korrosion der Aufhängung von Fensterläden (Kapitel 2.1.15), (Bild 98)



**Bild 98** ■ Korrosionsrisse durch die Aufhängung des Fensterladens

### Sanierung

- Austausch des gesamten Gewändes bzw. Einsetzen von Vierungen in kleinere Fehlstellen
- Ausbau, Entrostung, Korrosionsschutz (Kapitel 1.4.14), Einlassung mit Zement oder Bleiverguss (Kapitel 1.4.6)
- Ersatz der Aufhängung durch korrosionsbeständigen Edelstahl

### d) Anschluss Fensterrahmen/Mauerwerk

#### Schäden und Schadensursache

- Abrisse der Verfugung zwischen Fensterrahmen und Gewände

### Sanierung

- Neuverfugen mit mineralischem Fugenmörtel oder elastischer Fugenmasse  
 Einer Verfugung mit mineralischem Fugenmörtel ist der Vorzug zu geben, weil elastisches Material nur sehr schwer vom Naturstein zu entfernen ist.

## 2.5.5 Balkon

### Schadensbereiche (Bild 99)

#### a) Balkonboden

##### Schäden und Schadensursachen

- Durchfeuchtung: fehlende Entwässerung → Ansammlung von Wasser, Eindringen von Feuchtigkeit in Bodenplatte und Mauerwerk
  - Absanden (Kapitel 2.1.7)
  - Verfärbung durch Feuchteflecken (Kapitel 2.1.5)
  - Schalen (Kapitel 2.1.10)
  - Putzablösung (Kapitel 2.3.1)
  - Farbablösung (Kapitel 2.4.1)

##### Sanierung

- Herstellen eines ausreichenden Gefälles zum Wassereinfluss bzw. nach außen, Wasserableitung in Regenrohren
- Einbau einer Horizontalabdichtung mit min. 15 cm hoher Aufkantung am Wandanschluss, siehe d)
- Naturstein-, Putz- und Anstrichsanierung: siehe entsprechende Kapitel

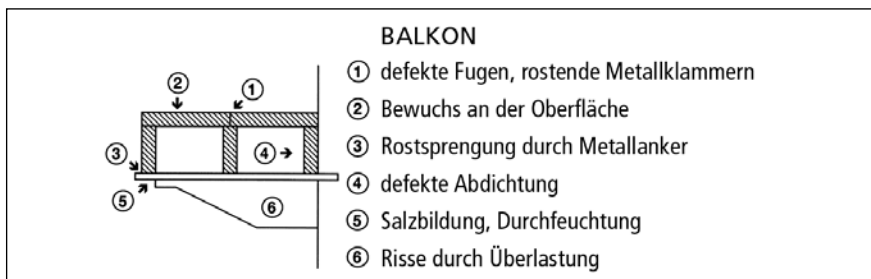
#### b) Untersicht des Balkons

##### Schäden und Schadensursachen (Bilder 100 und 101)

- Schuppen, Schalen:
  - fehlende oder defekte Tropfnase → Auftreffen und Eindringen von Feuchtigkeit
  - Verwitterung (Kapitel 2.1.9 und 2.1.10)

##### Sanierung

- Anbringen einer Abdeckung zur Wasserableitung oder Einschneiden einer Tropfnase
- steinmetzmäßiges Abarbeiten
- bei starker Schädigung → Steinaustausch (Kapitel 1.4.4)



**Bild 99** ■ Schadensbereiche am Balkon

**Bild 100** ■ Schalenbildung, Korrosion, Verfärbung der Balkonunterseite durch die entlang des Risses eingedrungene Feuchtigkeit



**Bild 101** ■ Ausbruch durch Korrosion der Bewehrung und Schalenablösung an der Unterseite der Balkonplatte





### c) Brüstung

#### Schäden und Schadensursache

- defekte Fugen:  
Eindringen von Feuchtigkeit → Salzbildung (Kapitel 2.1.4), Absanden (Kapitel 2.1.7)  
Lockerung der Einbindung in Bodenplatten
- konstruktive Risse: (Kapitel 2.1.17.1), (Bild 102)
- Rostspaltung: Korrosion der Verankerung (Kapitel 2.1.15)

#### Sanierung

- Fugen: Neuverfugen, Bleiverguss (Kapitel 1.4.6), Blechabdeckung der Brüstung zum Schutz der Fugen (Kapitel 1.4.17)
- Rostspaltung: Neuverankern mit korrosionsbeständigem Material, z. B. rostfreiem Edelstahl
- Rissbehandlung (Kapitel 1.4.15)

### d) Einbindung in die Fassade

#### Schäden und Schadensursache

- Defekte Abdichtung: Eindringen von Feuchtigkeit → siehe a) Balkonboden
- Spritzwasser (Kapitel 2.5.1)
- Risse zwischen Einbindung und Mauerwerk: unzureichende Dimensionierung des Tragwerks

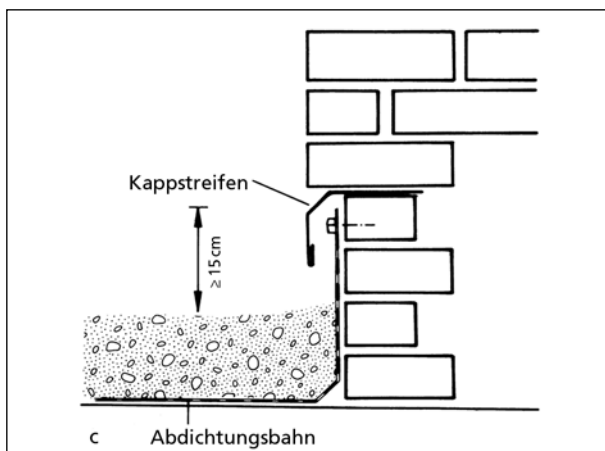
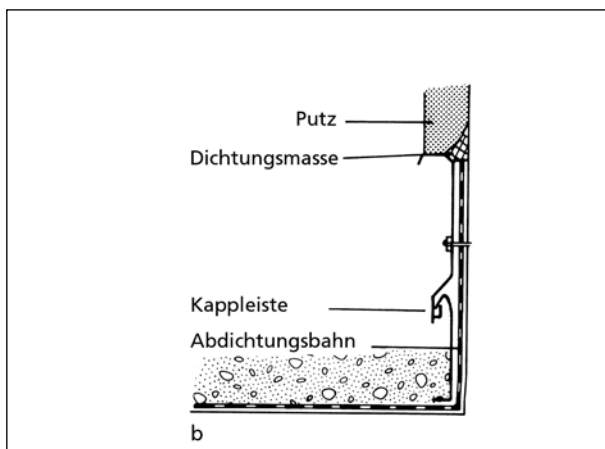
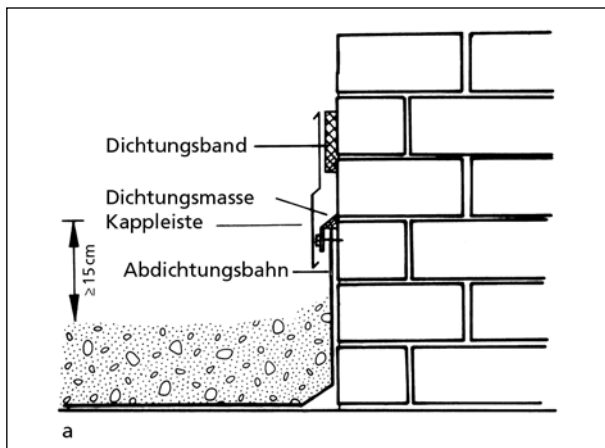
#### Sanierung

##### 1. Abdichtung:

Neuverfugen mit mineralischem oder elastifiziertem Mörtel (Kapitel 1.4.6), Einbindung der Horizontalabdichtung in der Fassade (Bild 103 a–c)



**Bild 102** ■ Risse in Handlauf und Baluster durch Bauwerksbewegungen



**Bild103 a–c** ■ Verschiedene Darstellungen für den Wandanschluss einer Balkonabdichtung (in Anlehnung an [199, S. 85, 87])

Arbeitsgänge:

- Aufkantung der Abdichtung → 15 cm über Oberkante Bodenoberfläche
- Einlassung der Abdichtung in eingeschnittene Fuge  
oder: Befestigung einer Kappleiste mit Dichtungsband
- Schutz der Einbindung mit Wandanschlussprofil, Kappleiste, Dichtungsmasse

2. Spritzwasser (Kapitel 2.5.1)

3. Risse: Prüfung der Standsicherheit durch einen Tragwerksplaner

## 2.5.6 Dach

### Schadensbereiche (Bild 104)

a) Wasserableitung

1. Traufe

Schäden und Schadensursache

- defekte Traufe → Löcher, undichte Nähte: Korrosion, Materialermüdung
- verstopfte Traufe → mangelnde Bauunterhaltung

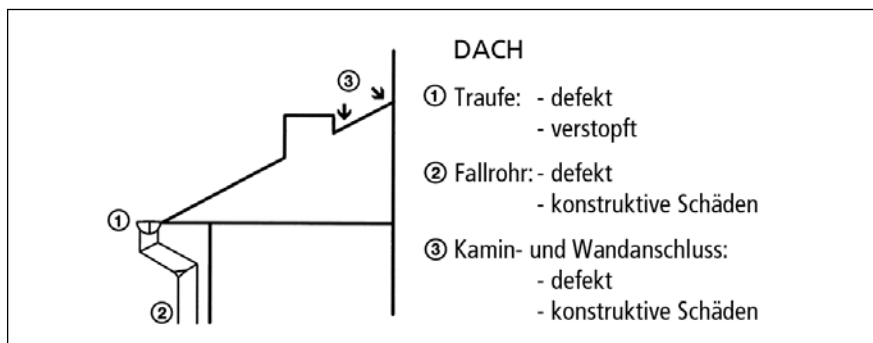
Sanierung

- Ansammlung von Unrat → Reinigung: mechanisch (Kapitel 1.4.1)
- Traufschäden → Neueinbau einer Traufe nach DIN 18339 [200] und den Regeln der Technik

2. Fallrohr

Schäden und Schadensursache

- zu geringe Dimensionierung → ungenügende Fassung der Wassermassen
- Materialschäden → Spritzwasser, s. o.



**Bild 104** ■ Mögliche Schadensquellen an Dachrändern und -anschlüssen

## Sanierung

Neueinbau nach den Regeln des Klempnerhandwerks, DIN 18339 [200]

### b) Anschluss Dach an senkrechte Bauteile

#### Schäden und Schadensursachen (Bild 105)

- defekter oder mangelhafter Wandanschluss → Eindringen von Feuchtigkeit

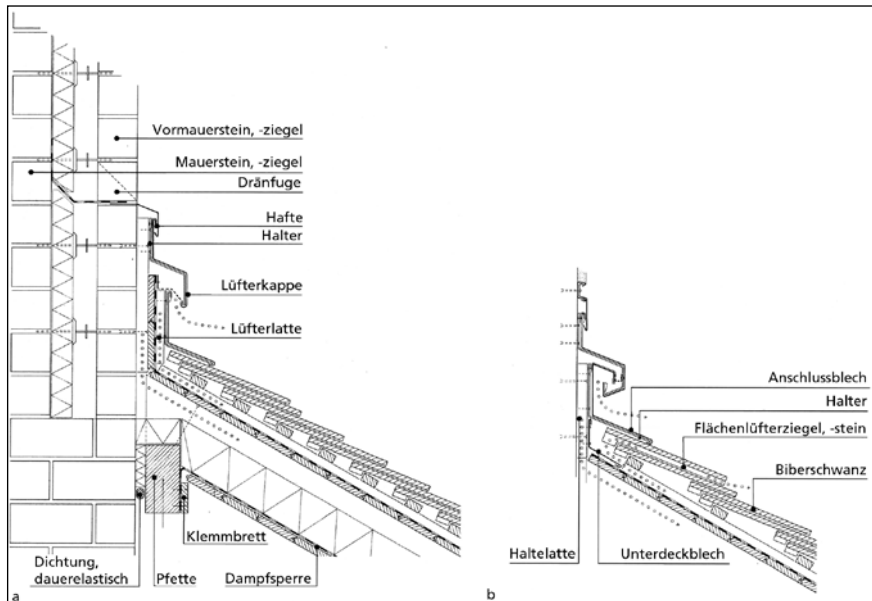
#### Sanierung

- Wandanschluss von Ziegeldächern (Bild 106)
  - z. B. mit abgewinkeltem Brustblech, unterer Abschluss mit umgekan- tetem Walzbleistreifen, oberer Anschluss mit in den Putz eingelassener Profilschiene
  - z. B. mit Überhangstreifen an unterer Putzkante, unterer Abschluss mit umgekan- tetem Walzbleistreifen, der auf Wandanschlussziegel aufliegt
  - z. B. mit einfacher Lüftung über Lüfterkappe und Kappleiste, die in das Mauerwerk eingelassen wird bzw. mit einer Putzleiste an den Putz an- schließt (Bilder 106 a + b).



**Bild 105** ■ Fehler am Dachanschluss zum Turmmauerwerk haben zu Feuchteschäden des Putzes geführt





**Bild106 a+b** ■ Beispiel für den Wandanschluss von Ziegeldächern [201, S. 241]

a: Wandanschluss mit einfacher Lüfterkappe

b: Wandanschluss mit Kappleiste, Lüftung über Lüftungsziegel

## 2.5.7 Vorgehängte Fassade bzw. Schale

### Ausführungsformen

1. Angemörtelte Fliesen oder Platten → DIN 18515-1 [5]

Plattengröße: max. 0,12 m<sup>2</sup>

Seitenlänge: max. 0,4 m

Dicke: 0,015 m

Befestigung:

- direktes Anmörteln auf Außenwand
- Anbringen auf Wärmedämmschichten mit bewehrtem Unterputz

2. Angemauerte Verblender auf Aufstandsflächen → DIN 18515-2 [7]

Dicke der Anmauerung: ≥ 5 und ≤ 9 cm

Befestigung: 5 Drahtanker/m<sup>2</sup>, Ø 3 mm, Einbindung 50 mm tief in die Außenwand und 2/3 in die Bekleidung

3. Hinterlüftete Außenwandbekleidung → DIN 18516-1 [8] und DIN 18516-3 [6]

Dicke: ≥ 30 bzw. 40 mm je nach Neigung der Platte gegen die Horizontale  
Befestigung: 4, min. 3 Punkte

direkt an Außenwand oder an Unterkonstruktion

Einbindetiefe der Ankerdorne in die Platten:  $\geq 25 \text{ mm}$

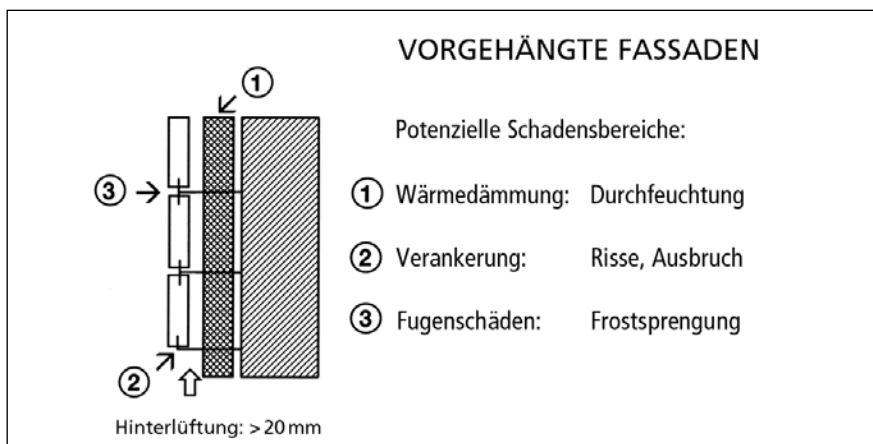
Dicke der Luftschicht:  $\geq 20 \text{ mm}$

Ausbruchfestigkeit, Biegefestigkeit: Für die Ermittlung der Biegefestigkeit und Ausbruchlast am Ankerdornloch ist ein statischer Nachweis zu führen.

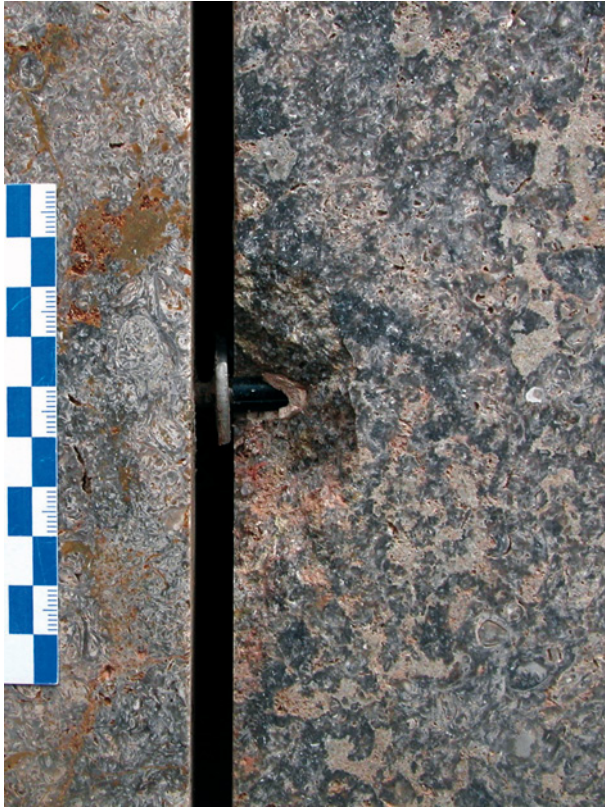
Verfugung: offene Fugen oder Verfugung mit elastoplastischen Dichtungsmassen

### Schäden und Schadensursache (Bild 107)

- Risse: Korrosion der Verankerung
- Ausbruch (Bild 108):
  - Korrosion der Verankerung
  - zu geringe Bemessung der Ausbruchfestigkeit
- Feuchteflecken, Verfärbung und Ablösung des Innenanstrichs und Innenputzes:
  - Durchfeuchtung der Wärmedämmung → Eindringen der Feuchtigkeit über Risse und Fehlstellen in Fugen,
  - ungenügender Schlagregenschutz bei angemörtelter Bekleidung
- Frostsprengung:
  - Durchfeuchtung s. o.
  - Hohlräume im Verlegemörtel führen zu Ansammlungen von Wasser, das über Risse oder Fehlstellen eingedrungen ist (Kapitel 2.1.10).
- Fugenrisse oder Ausbruch von Fugen:
  - fehlende oder zu geringe Dimensionierung von Trag- und Halteankern,
  - Versprödung von elastischem Fugenmaterial
- Verformung von elastischem Fugenmörtel → s. o.



**Bild 107** ■ Mögliche Schäden an einer hinterlüfteten Außenwandbekleidung



**Bild 108** ■ Ausbruch an einer Fassadenplatte durch Korrosion der Verankerung

## Sanierung

Risse → Austausch der Steinplatte, Erneuern der Verankerung nach DIN 18515 für angemörtelte Platten, nach DIN 18516, Teile 1 und 3 [63] [8] für hinterlüftete Außenwandbekleidung aus Naturwerkstein

Ausbruch → s. o.,

Austausch der Steinplatte s. o.

Feuchteflecken → (Kapitel 2.1.6)

bei starker Schlagregenbeanspruchung → Wahl von hinterlüfteten Bekleidungen, Ausführung entsprechend der Schlagregenbelastung nach DIN 4108-3 [69]

Frostsprengung → das Mörtelbett muss vollflächig ausgeführt werden,

- intakte Verfugung zur Vermeidung von Wasserwegen
- Beachtung der Schlagregenbeanspruchung s. o.
- Verwendung frostbeständiger Natursteine

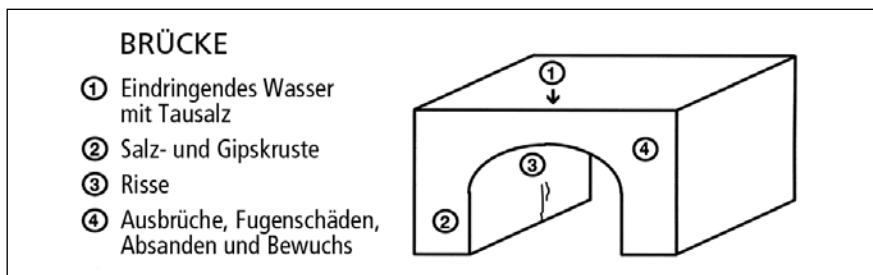
### Fugenschäden →

- Beachtung der Befestigung bzw. der Verankerung von Fassadenplatten nach DIN 18515 bzw. 18516
- Verwendung von elastischem Fugenmaterial mit 20 bis 25 %-Dehnfähigkeit bezogen auf die Fugenbreite nach DIN 18516-3 [6]

## 2.5.8 Brückenbauwerke

### Schäden und Schadensursache (Bild 109)

- a) **Salzbildung:** Einwanderung von Chloriden durch Verwendung von Tausalz auf der Fahrbahndecke bei fehlender oder defekter Abdichtung → (Kapitel 2.1.4)
- b) **Kalksinterkrusten:** infolge defekter oder fehlender Fahrababdichtung eindringendes Wasser → Lösung von Ca-Carbonat des Fugenmörtels → (Kapitel 2.1.3), (Bild 110)
- c) **Gipskrusten:** Emission von früherem Dampflokbetrieb → (Kapitel 2.1.3)
- d) **Durchfeuchtung:** aus den Widerlagern und von der Fahrbahn her in das Bauwerk eindringende Feuchtigkeit
- Schalen (Kapitel 2.1.10)
- Absanden (Kapitel 2.1.7)
- Bewuchs (Kapitel 2.1.1)
- Salzbildung (Kapitel 2.1.4)
- Sinter (Kapitel 2.1.3)
- e) **Ausbrüche:** mechanische Prallschäden → (Kapitel 2.1.14)
- f) **Risse** (Kapitel 1.4.15), (Bild 111)



**Bild 109** ■ Mögliche Schäden an einer Natursteinbrücke



**Bild 110** ■ Brückenuntersicht mit starker Sinterung entlang der Fugen



**Bild 111** ■ Durch die Korrosion der Metalleinbindung entstanden Risse, Verfärbung der Gesteinsoberfläche und Fugenausbrüche

## Sanierung

a, b, d: Abstellen der Feuchtigkeitzufuhr

- Herstellen einer funktionsfähigen Abdichtung durch Einbau von Dichtungsfolien, Ableiten des Wassers durch Entwässerungsröhre, ggf. Dränung an den Widerlagern
- ggf. Außenabdichtung entlang der Widerlager über Bohrlochinjektion mit Silica-vergütetem Mörtel, Polyurethan oder Acrylatgelen → (Kapitel 1.4.8)

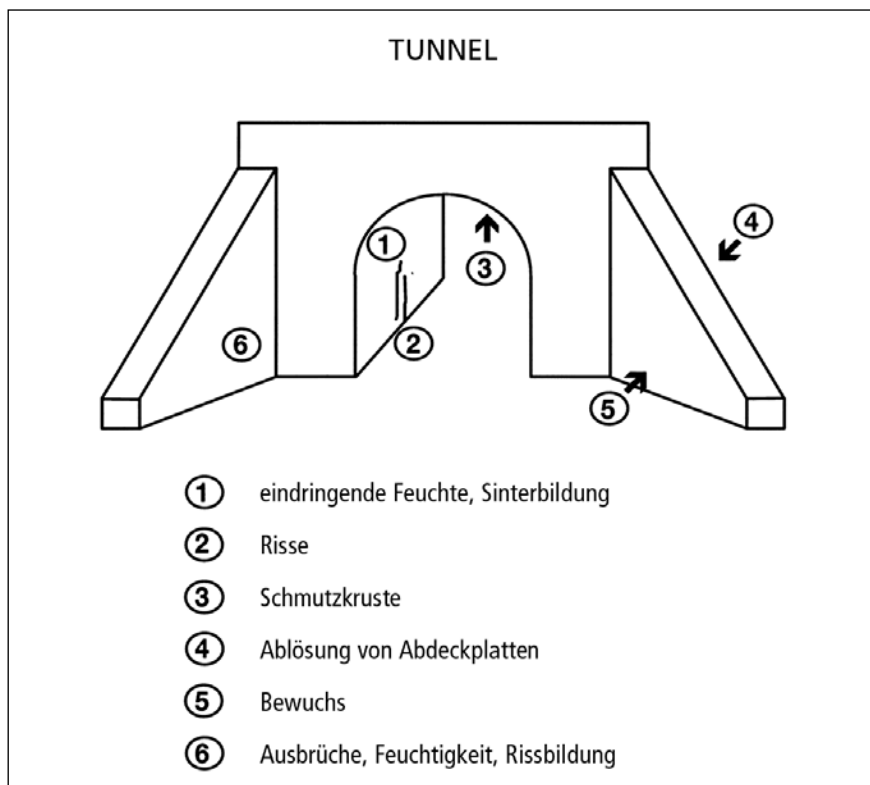
Weitere Maßnahmen: Reinigung (Kapitel 1.4.1), Entsalzung (Kapitel 1.4.9), Rissanierung (Kapitel 1.4.15)

## 2.5.9 Tunnel

### Schäden und Schadensursache (Bild 112)

1. Schäden am Tunnelgewölbe:

- Feuchtigkeit aus dem umgebenden Erdreich führt im Gewölbe zu
  - **Sinterkrusten**, meist entlang von Rissen und Fugen: Lösung des Ca-Carbonats aus Fugenmörtel und Hintermauerung → (Kapitel 2.1.3), (Bild 113)
  - **Krusten und Belägen** bauschädlicher Salze durch Lösungsprozesse im Mauerwerk und Erdreich → (Kapitel 2.1.4)
  - **Verfärbung** der durchfeuchteten Zonen → (Kapitel 2.1.5)
  - **Moos- und Algenbewuchs** der durchfeuchteten Zonen → (Kapitel 2.1.1)
  - **Schalenbildung** durch Salzbelastung und Frostsprengung → (Kapitel 2.1.10)
- früherer Dampflokbetrieb kann zu Schalen und Krustenbildung im Gewölbe führen infolge schwefelhaltiger Emissionen



**Bild 112** ■ Mögliche Schäden an einem Tunnelbauwerk





**Bild 113** ■ Starke Durchfeuchtung der Tunnel-schale mit Salz-bildung

## 2. Risse:

- Parallel der Tunnelportale,
- Entlastungsrisse, bedingt durch Hangschub und Setzungen des Baugrundes (Kapitel 2.1.17)

## 3. Schäden an Flügelmauern:

Bewuchs (Kapitel 2.1.1)

Kruste (Kapitel 2.1.3)

Risse: durch Hangschub, Setzungsrisse (Kapitel 2.1.17)

Ausbruch: durch Risse, Prallschäden (Kapitel 2.1.14)

## Sanierung

Abdichtung der Tunnelschale gegen seitlich eindringende Feuchtigkeit:

- Freilegen des Gewölbes und ganzflächige Abdichtung mittels Kunststoffbahnen
- Außenabdichtung über Bohrlochinjektion (Kapitel 1.4.8)
- Materialien: Zementleim, Silica-vergüteter Mörtel, Polyurethan, Acrylatgel
- Nachteil: zahlreiche Bohrlöcher in der Tunnelschale erforderlich
- Dränung (Kapitel 1.4.8.4)

Sonstige Maßnahmen: Reinigung (Kapitel 1.4.1), Steinaustausch (Kapitel 1.4.4), Riss-sanierung (Kapitel 1.4.15), Entsalzung nach Abdichtung (Kapitel 1.4.9)

# Literaturverzeichnis

- [1] DIN 1053-1:1996-11 Mauerwerk – Teil 1: Berechnung und Ausführung
- [2] Warth, O.: Die Konstruktionen in Stein. Leipzig: J.M. Gebhardt's Verlag, 1903. Nachdruck. Hannover: Th. Schäfer, 1981
- [3] Funk, P. (Hrsg.): Mauerwerk-Kalender 1993. Taschenbuch für Mauerwerk, Wandbaustoffe, Schall-, Wärme und Feuchtigkeitsschutz. 18. Jg. Berlin: Ernst&Sohn, 1992
- [4] Meisel, U. et al.: Naturstein. Erhaltung und Restaurierung von Außenbauteilen. Wiesbaden: Bauverlag GmbH, 1987
- [5] DIN 18515-1:1998-08 Außenwandbekleidungen – Teil 1: Angemörtelte Fliesen oder Platten; Grundsätze für Planung und Ausführung
- [6] DIN 18516-3:2011-11 Außenwandbekleidungen, hinterlüftet – Teil 3: Naturwerkstein; Anforderungen, Bemessung
- [7] DIN 18515-2:1993-04 Außenwandbekleidungen; Anmauerung auf Aufstandsflächen; Grundsätze für Planung und Ausführung
- [8] DIN 18516-1:2010-06 Außenwandbekleidungen, hinterlüftet – Teil 1: Anforderungen, Prüfgrundsätze
- [9] Krauth, T.; Meyer, F. S.: Das Steinhauerbuch. Die Bau- und Kunstarbeiten des Steinhauers. Leipzig, 1896. Nachdruck. Hannover: Th. Schäfer, 1982
- [10] DIN 18332:2010-04 VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Naturwerksteinarbeiten
- [11] Fitzner, B.; Heinrichs, K.: Kartierung und Bewertung von Verwitterungsschäden an Natursteinbauwerken. ZDGG Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften (2005), Bd. 156, Nr. 1, S. 7–24
- [12] Philipps, G.; Stollhoff, F.; Wieck, J.: Die vorsorgliche Beweissicherung im Bauwesen. 2., überarb. Aufl. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2010 (Schadenfreies Bauen; 31)
- [13] Patitz, G.: Zerstörungsfreie Untersuchungen an Skulpturen und Säulen mit Radar und Ultraschall. Naturstein-sanierung Stuttgart 2010. Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen sowie Sanierungsbeispiele. Tagung am 26. März 2010 in Stuttgart. 2010
- [14] Patitz, G.: Zerstörungsfreie Untersuchung an altem Mauerwerk. Anwendung von Radar, Ultraschall und Seismik in der Baupraxis. Berlin: Beuth, 2009
- [15] Henrich, G.: Zerstörungsfreie Mess- und Prüfverfahren im Bauwesen. Der Bausachverständige 4(2008), Nr. 2, S. 19–23
- [16] Fouad, N. A.; Richter, T.: Infrarot-Thermographie zur Schadensdiagnostik im Bauwesen. Der Bausachverständige 4(2008), Nr. 2, S. 10–18
- [17] DIN EN 1926:2007-03 Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der einachsigen Druckfestigkeit; Deutsche Fassung EN 1926:2006
- [18] Grimm, W.-D.: Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland. München: Bayrisches Landesamt für Denkmalpflege. 1990 (Arbeitsheft; 50)
- [19] Unterderweide, K.; Rigo, E.; Wobst, M.; Schmidt-Döhl, F.: Moderne physikalische Methoden bei Bauschadensuntersuchungen. Der Bausachverständige 5(2009), Nr. 4, S. 12–16



- [20] DIN EN 1542:1999-07 Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Prüfverfahren – Messung der Haftfestigkeit im Abreißversuch; Deutsche Fassung EN 1542:1999
- [21] Snethlage, R.: Leitfaden Steinkonservierung, Planung von Untersuchungen und Maßnahmen zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein. 3., überarb. Aufl. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2008
- [22] DIN EN 12372:2007-02 Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Biegefestigkeit unter Mittellinienlast; Deutsche Fassung EN 12372:2006
- [23] DIN EN 13161:2008-08 Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Biegefestigkeit unter Drittelinienlast; Deutsche Fassung EN 13161:2008
- [24] Deppisch, J.; Krug, R.: Neue Normen für Produkte aus Naturwerkstein. Naturstein 59(2004), Nr. 2, S. 38–42
- [25] DIN EN 14157:2005-01 Bestimmung des Widerstandes gegen Verschleiß; Dt. Fassung EN 14157:2004
- [26] DIN 52108:2010-05 Prüfung anorganischer nichtmetallischer Werkstoffe – Verschleißprüfung mit der Schleifscheibe nach Böhme – Schleifscheiben-Verfahren
- [27] DIN EN 14580:2005-07 Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls; Deutsche Fassung EN 14580:2005
- [28] DIN EN 14146:2004-06 Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des dynamischen Elastizitätsmoduls (durch Messung der Resonanzfrequenz der Grundschwingung); Deutsche Fassung EN 14146:2004
- [29] Alfes, C.: Physikalisch-mechanische Eigenschaften von Sandsteinen. Werkstoffwissenschaften und Bausanierung. Tl. 3. Ehningen: Expert Verlag, 1993, S. 1741–1762
- [30] Schubert, P. et al.: Mauerwerk aus Tuffstein. Empfehlungen für Erhaltungsmaßnahmen an historischen Gebäuden. Aachen: Landesinstitut für Bauwesen und angewandte Bauschadensforschung NRW, 1992
- [31] DIN EN 13364:2002-03 Prüfung von Naturstein. Bestimmung der Ausbruchlast am Ankerdornloch; Deutsche Fassung EN 13364:2001
- [32] Linke, K. P. et al.: DNV1 und DNV2 ein-drucksvoll bestätigt. Naturstein 60(2005), Nr. 5, S. 94–95
- [33] DIN EN 1458:2005-03 Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten; Deutsche Fassung EN 14581: 2004
- [34] DIN EN 13009:2000-04 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung des hygri-schen Dehnkoeffizienten; Deutsche Fassung EN 13009:2000
- [35] Pühringer, J.: Ein Modell zur Beschreibung der Mineralzerstörung durch Frost-Tauwechsel – eine Literaturstudie. Werkstoffwissenschaften und Bausanierung. Tl. 3. Ehningen: Expert Verlag, 1993, S. 1532–1551
- [36] DIN EN 12371:2010-07 Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des Frostwiderstandes; Deutsche Fassung EN 12371:2010
- [37] DIN 52008:2006-03 Prüfverfahren für Naturstein – Beurteilung der Verwitterungsbeständigkeit
- [38] Deppisch, J.: Technische Anforderungen für die Verwendung von Naturstein. URL: <http://rohrschacher-stein-fachgespraech.ch/portal/downloads/2008> [Zitat vom 19.07.2011]
- [39] Krug, R.: Planung und schadensfreie Ausführung von Natursteinarbeiten. URL: <http://rohrschacher-stein-fachgespraech.ch/portal/downloads/2008> [Zitat vom 19.07.2011]
- [40] DIN EN 12370:1999-06 Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des Widerstandes gegen Kristallisation von Salzen; Deutsche Fassung EN 12370:1999

- [41] VDI 3797 Blatt 1:1980-02 Prüfung des zu erwartenden Resistenzverhaltens von konservierten und nicht konservierten Natursteinen gegenüber Immissionen; Salzsprengtest (bestätigt 2010-10)
- [42] DIN EN 13755:2008-08 Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Wasseraufnahme unter atmosphärischem Druck; Deutsche Fassung EN 13755:2008
- [43] Ettl, H.; Sobott, R.: Ultraschallmessungen an in-situ konservierten Marmorreliefs des Siegestores in München. Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung 13(1999), Nr. 1, S. 92–102
- [44] Pfefferkorn, S.: Zerstörungssarme Diagnose. Voruntersuchungen entscheiden über Konservierungserfolg. Stoneplus (2000), Nr. 5, S. 37 f.
- [45] DIN EN 1936:2007-02 Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der offenen Porosität und der Gesamtporosität; Deutsche Fassung EN 1936:2006
- [46] Frössel, F.: Lehrbuch der Kellerabdichtung und -sanierung. Renningen: Expert Verlag, 2006
- [47] Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. -WTA- (Hrsg.): WTA-Merkblatt 4-11-02/D Messung der Feuchte bei mineralischen Baustoffen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2003
- [48] Buss, H.: Aktuelles Tabellenhandbuch Feuchte, Wärme, Schall – mit Formeln und Erläuterungen. Kissing/Zürich/Paris/Mailand/Amsterdam/Wien/London: WEKA-Fachverlage, 1987
- [49] DIN EN ISO 12571:2000-04 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften (ISO 12571:2000); Deutsche Fassung EN ISO 12571:2000
- [50] Künzel, H.: Mauerwerk und Außenputz. Tl. 3: Feuchtigkeit im Mauerwerk. Der Bausachverständige 4(2008), Nr. 6, S. 13–15
- [51] Köneke, M.: Schimmel im Haus – erkennen – vermeiden – bekämpfen. 3. überarb. u. erw. Aufl. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2008
- [52] Göller, A.: Messen im Kopf. Feuchtemessung im Raster – neues Diagnosekonzept in Bauwerken. Bautenschutz und Bausanierung 22(1999), Nr. 6, S. 22–27
- [53] Krus, M.: Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken. Dissertation Universität Stuttgart, 1995
- [54] Rucker, P.; Krus, M.; Holm, A.: Einsatz einer kombinierten Messmethode zur Untersuchung von Salztransportvorgängen. Bauphysik 25(2003), Nr. 5, S. 296–302
- [55] Wolter, B. et al.: Neue Anwendungsmöglichkeiten der NMR-Aufsatztechnik. DGZfP-JAHRESTAGUNG 2002. URL: <http://www.ndt.net/article/dgzfp02/papers/p30/p30.htm> [Datum des letzten Zugriffs: 2002]
- [56] Krus, M.; Künzel, H. M.; Kießl, K.: Feuchtemessung und Feuchteverteilung in Stein und Mauerwerk. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Verbundforschungsprojekt Steinerfall und Steinkonservierung. Denkmalpflege und Naturwissenschaft. Natursteinkonservierung II. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 1998
- [57] Plagge, R.; Ishizaki, T.; Renner, E.: Feuchte- und Salzkartierung mit TDR. Anwendungsbeispiel vom historischen Mauerwerk der Finca Marina-Manresa auf Mallorca. In: Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. -WTA- (Hrsg.): WTA-Almanach, 2007
- [58] Hecht, C.; Steiner, T.: Die Kontaktwinkel-messung für den Bausachverständigen. Tl. I – Grundlagen. Der Bausachverständige 5(2009), Nr. 2, S. 29–31

- [59] Weber, H.: Keine Planung ohne Bauzustandsanalyse. Tl. 1. Der Bausachverständige 1(2005), Nr. 2., S. 19–23
- [60] Kollmann, H.: Mauerwerksdiagnostik. Ausbau und Fassade (2009), Nr. 5, S. 37
- [61] DIN EN 1925:1999-05 Prüfverfahren von Naturstein – Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten infolge Kapillarwirkung; Deutsche Fassung EN 1925:1999
- [62] Fitz, C.; Krus, M.: Normenwirrwarr bei der Bestimmung von feuchtetechnischen Materialkennwerten. 2004 (IBP-Mitteilung; 441)
- [63] DIN EN ISO 15148:2003-03 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen (ISO 15148:2002); Deutsche Fassung EN ISO 15148:2002
- [64] DIN EN 772-11:2011-07 Prüfverfahren für Mauersteine – Teil 11: Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme von Mauersteinen aus Beton, Porenbetonsteinen und Natursteinen sowie der anfänglichen Wasseraufnahme von Mauerziegeln. Deutsche Fassung EN 772-11:2011
- [65] DIN V 18550:2005-04 Putze und Putzsysteme – Ausführung
- [66] DIN EN ISO 6946:2008-04 Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren (ISO 6946:2007); Deutsche Fassung EN ISO 6946:2007
- [67] DIN EN ISO 7345:1996-01 Wärmeschutz – Physikalische Größen und Definitionen (ISO 7345:1987); Deutsche Fassung EN ISO 7345:1995
- [68] DIN EN ISO 9346:2008-02 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Gebäuden und Baustoffen – Physikalische Größen für den Stofftransport – Begriffe (ISO 9346:2007); Dreisprachige Fassung EN ISO 9346:2007
- [69] DIN 4108-3:2001-07 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz; Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung
- [70] DIN 4108-2:2003-07 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz
- [71] Sedlbauer, K.; Kießl, K.: Neue Erkenntnisse zur Beurteilung von Schimmelpilzen und Stand der Normenbearbeitung. URL: [http://www.ibp.fraunhofer.de/Images/pub4\\_tcm45-29385.pdf](http://www.ibp.fraunhofer.de/Images/pub4_tcm45-29385.pdf). 2003. [Zitat vom 25.07. 2011]
- [72] DIN EN ISO 13788:2001-11 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren (ISO 13788:2001); Deutsche Fassung EN ISO 13788:2001
- [73] Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. -WTA- (Hrsg.): WTA-Merkblatt 6-3-05/D Rechnerische Prognose des Schimmelpilzwachstums. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2005
- [74] EnEV 2009:2009-04 Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden. Änderungsverordnung EnEV 2009 vom 29.04.2009
- [75] DIN EN ISO 12572:2001-09 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit (ISO 12572:2001); Deutsche Fassung EN ISO 12572:2001
- [76] Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. -WTA- (Hrsg.): WTA-Merkblatt 4-5-99/D Beurteilung von Mauerwerk – Mauerwerksdiagnostik. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 1999

- [77] DIN EN 998-1:2010-12 Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau – Teil 1: Putzmörtel; Deutsche Fassung EN 998-1:2010
- [78] Weber, H.: Putze und Mörtel – Zusammenstellung der neuen Normen und Richtlinien. Der Bausachverständige 4(2008), Nr. 1, S. 16–19
- [79] DIN EN 1015-18:2003-03 Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 18: Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme von erhärtetem Mörtel (Festmörtel); Deutsche Fassung EN 1015-18:2002
- [80] Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. -WTA- (Hrsg.): WTA-Merkblatt 2-9-04/D Sanierputzsysteme. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2006
- [81] SCHWENK Putztechnik GmbH & Co. Kg: Neue europäische Putznormung Teil 1. URL: [http://www.schwenk-putztechnik.de/download/.../Neue\\_Norm\\_Teil\\_1.pdf](http://www.schwenk-putztechnik.de/download/.../Neue_Norm_Teil_1.pdf) [Zitat vom 15.01.2012]
- [82] DIN EN 196-2:2005-05 Prüfverfahren für Zement – Teil 2: Chemische Analyse von Zement. Dt. Fassung EN 196-2:2005
- [83] DIN EN 459-2:2010-12 Baukalk – Teil 2: Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 459-2:2010
- [84] Mehlmann, M.: Bestimmung von chemisch-mineralogischen Kennwerten sowie Untersuchungsmethoden. In: Knöfel, D.; Schubert, P. (Hrsg.): Handbuch Mörtel und Steinerfüllungsmittel in der Denkmalpflege. Berlin: Ernst und Sohn, 1993
- [85] DIN EN 1744-1:2010-04 Prüfverfahren für chemische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Prüfverfahren für chemische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Chemische Analyse; Deutsche Fassung EN 1744-1:2009
- [86] DIN EN 933-1:2012-03 Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Siebverfahren; Deutsche Fassung EN 933-1:2012
- [87] Schramm, H.-P.; Hering, B.: Historische Malmaterialien und ihre Identifizierung. Berlin: VEB Verlag Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1988
- [88] Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. -WTA- (Hrsg.): WTA-Merkblatt 3-5-98/D Natursteinrestauration nach WTA I: Reinigung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 1998
- [89] Frieze, P.; Hermoneit, B.; Adamini, R.: Neues Verfahren befreit von Kupfergrün. Naturstein 57(2002), Nr. 2, S. 46–49
- [90] Weber, H.: Es grünt so grün ... Wenn Algen auf Fassaden wachsen. Arconis 6(2001), Nr. 3, S. 22–25
- [91] Efinger, B.: Keinen Bock auf Schmierkram. Bautenschutz und Bausanierung 23(2000), Nr. 2, S. 48–49
- [92] Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. -WTA- (Hrsg.): WTA-Merkblatt 2-5-97/D Anti-Graffiti-Systeme. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 1998
- [93] URL: <http://www.fassadex.de/kiel-fuerfachleute/systemvergleich/> [Zitat vom 01.08.2011]
- [94] Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. -WTA- (Hrsg.): WTA-Merkblatt 2-8-04/D Bewertung der Wirksamkeit von Anti-Graffiti-Systemen (AGS). Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2005
- [95] Hill, K.; Börner, D.: Große Enzyklopädie der Steine. Die größte Naturstein-Datenbank weltweit. 14. Aufl. Hasede: Abraxas Verlag, 2012
- [96] Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. -WTA- (Hrsg.): WTA-Merkblatt 3-8-95/D Natursteinrestauration nach WTA II: Handwerklicher Steinaustausch. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 1997
- [97] Mikos, E.: Steinerfüllungsmittel zur Restauration von Natursteinen. In: Verbund-

- forschungsprojekt Steinzerfall und Steinkonservierung (Hrsg.): Jahresberichte Steinzerfall – Steinkonservierung 1989. Berlin: Ernst und Sohn, 1991
- [98] Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. -WTA- (Hrsg.): WTA-Merkblatt 3-11-97/D Natursteinrestaurierung nach WTA III: Steingergänzung mit Restauriermörteln und Steinersatzstoffen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 1998
- [99] Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. -WTA- (Hrsg.): WTA-Merkblatt 3-7-95/D Anwendungstechnik Natursteinrestaurierung: Herstellen von Kopien durch Abformen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 1997
- [100] Schubert, P.; Dominik, A.: Verfügmörtel – Anforderungen, Eigenschaften, Prüfverfahren, Applikation. Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, T.2, S. 1036–1048. Ehningen: Expert-Verlag, 1993
- [101] DIN EN 998-2:2010-12 Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau – Teil 2: Mauermörtel; Deutsche Fassung EN 998-2: 2010
- [102] DIN V 18580:2007-03 Mauermörtel mit besonderen Eigenschaften
- [103] Riechers, H.-J.: Mauermörtel und Putzmörtel nach europäischer Norm. Das Mauerwerk 9(2005), Nr. 1, S. 24–28
- [104] DIN EN 459-1:2010-12 Baukalk – Teil 1: Begriffe, Anforderungen und Konformitätskriterien; Deutsche Fassung EN 459-1: 2010
- [105] Vierl, P.: Putz und Stuck. Herstellen, Restaurieren. München: Callwey, 1987
- [106] Institut für Steinkonservierung: Baukalkarten – Bezeichnung und Anforderungen. 2006 (IFS-Mitteilung; 7)
- [107] DIN 1060-1:1986-01 Baukalk; Begriffe, Anforderungen, Lieferung, Überwachung
- [108] Visser, H. et al.: Abschlussbericht – Optimierung und Erprobung dauerhafter Gipsmörtel für die Instandsetzung. Az. 18320. Hannover: Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 2005
- [109] DIN EN 197-1:2009-09 Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement; Deutsche Fassung prEN 197-1:2009
- [110] DIN 1164-10:2004-08 Zement mit besonderen Eigenschaften – Teil 10: Zusammensetzung, Anforderungen und Übereinstimmungsnachweis von Normalzement mit besonderen Eigenschaften
- [111] Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. -WTA- (Hrsg.): WTA-Merkblatt 2-11-07/D Gipsmörtel im historischen Mauerwerksbau und an Fassaden. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2008
- [112] DIN EN 413-1:2011-07 Putz- und Mauerbinder – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien; Deutsche Fassung EN 413-1:2011
- [113] DIN EN 13139:2011-03 Gesteinskörnungen für Mörtel; Deutsche Fassung prEN 13139:2011
- [114] Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. -WTA- (Hrsg.): WTA-Merkblatt 3-12-99/D Natursteinrestaurierung nach WTA IV: Fugen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2001
- [115] Knöfel, D.; Schubert, P.: Handbuch. Mörtel und Steingergänzungstoffe in der Denkmalpflege. Sonderheft aus der Publikationsreihe der BMFT-Verbundforschung zur Denkmalpflege. Berlin: Ernst und Sohn, 1993
- [116] Berufsbildungswerk des Steinmetz- und Bildhauerhandwerks e.V. (Hrsg.); Ader, U. et.al.: Der Steinmetz und Steinbildhauer. Die Arbeit am Stein. München: Callwey, 1998

- [117] Schwengelbeck, O.: Bleigießen. Verdübelungen mit Bleiverguss an Naturstein-Werkstücken. Bauhandwerk (2009), Nr. 4, S. 44
- [118] Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. -WTA- (Hrsg.): WTA-Merkblatt 4-7-02/D Nachträgliche Mechanische Horizontalsperre. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2002
- [119] Frössel, F.: Der Markt hat das letzte Wort. Ausbau + Fassade (1998), Nr. 1, S. 14–21
- [120] Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. -WTA- (Hrsg.): WTA-Merkblatt 4-4-04/D Mauerwerksinjektion gegen kapillare Feuchtigkeit. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2004
- [121] Weber, H.: Klare Trennung. Nachträglicher Einbau horizontaler Bauwerksabdichtungen. Bauhandwerk 25(2003), Nr. 12, S. 46–51
- [122] Rupp, K.: Kombinierte Komponenten. Ursachenbekämpfung: Ein neues Injektionsverfahren gegen aufsteigende Feuchte. Bautenschutz und Bausanierung 23(2000), Nr. 4, S. 11–14
- [123] Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. -WTA- (Hrsg.): WTA-Merkblatt 4-6-05/D Nachträgliches Abdichten erdberührter Bauteile. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2005
- [124] Herrmann, K.; Mahnert, U.: Nachträgliche Bauwerksabdichtung unter Einsatz von Acrylatgelen. Bausubstanz 1(2010), Nr. 3, S. 32–39
- [125] Scherpke, G.; Schneider, U.: Elektroosmose – ein Vergleich theoretischer Ergebnisse mit experimentellen Resultaten. DGZfP-Berichtsband BB 69-CD Vortrag A4. Feuchtetag '99. Umwelt, Meßverfahren, Anwendungen. Berlin: BAM, 7./8. Oktober 1999
- [126] Müller, M.; Harborth, T.: Ein Jahrzehnt »Zauberkästchen« in den neuen Bundesländern – ein Grund zum Feiern? B+B Bauen im Bestand 24(2001), Nr. 8, S. 41–43
- [127] Arendt, C.: Trockenlegung. Leitfaden zur Sanierung feuchter Bauwerke. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt, 1983
- [128] Wittmann, F. H.: Über unwirksame Verfahren gegen aufsteigende Feuchtigkeit. Int. Zeitschrift für Bauinstandsetzen 1(1995), Nr. 4, S. 329–335
- [129] DIN 18195-4:2011-12. Bauwerksabdichtungen – Teil 4: Abdichtungen gegen Bodenfeuchtigkeit (Kapillarwasser, Haftwasser) und nichtstauendes Sickerwasser an Bodenplatten und Wänden – Bemessung und Ausführung
- [130] DIN 18195-6:2011-12. Bauwerksabdichtungen – Teil 6: Abdichtungen gegen außen drückendes Wasser und aufstauendes Sickerwasser – Bemessung und Ausführung
- [131] Sommer, H.-P.: Zukunft und Entwicklung der DIN 18195 – Neue Produkte! Neue Struktur. 1. IFB-Symposium, bautec. Berlin, 2010
- [132] Deutsche Gesellschaft für Mauerwerksbau e.V. (Hrsg.): Merkblatt »Abdichtung von erdberührtem Mauerwerk«. Berlin: DGfM, 2006. [Kostenloser PDF-Download unter URL: http://www.dgfm.de/merkblaetter.html](http://www.dgfm.de/merkblaetter.html)
- [133] Deutsche Bauchemie e.V. (Hrsg.): Richtlinie für die Planung und Ausführung von Abdichtungen von Bauteilen mit mineralischen Dichtungsschlämmen. Frankfurt am Main, Mai 2002
- [134] Deutsche Bauchemie e.V. (Hrsg.): Richtlinie für die Planung und Ausführung von Abdichtungen erdberührter Bauteile mit flexiblen Dichtungsschlämmen. Frankfurt am Main, April 2006
- [135] Deutsche Bauchemie e.V. (Hrsg.): Richtlinie für die Planung und Ausführung von Abdichtungen mit kunststoffmodifizier-

- ten Bitumendickbeschichtungen (KMB)  
-erdberührter Bauteile-. Frankfurt am  
Main, November 2001
- [136] Vocke, J.: Dahinter oder darein. Gelinjektion als besonderes Verfahren im erdberührten Bereich. B+B Bauen im Bestand 30(2007), Nr. 7, S. 11–15
- [137] Deutsche Bahn AG (Hrsg.): DB Richtlinie 804.61.02 AO Richtlinie zur nachträglichen Abdichtung durch Gelschleier; Planung, Durchführung und Qualitätssicherung. 2005
- [138] Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. -WTA- (Hrsg.): WTA-Merkblatt 5-20-07/D Gelinjektion. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2009
- [139] Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V. -STUVA- (Hrsg.): ABI-Merkblatt »Abdichtung von Bauwerken durch Injektion«. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2007
- [140] DIN 4095:1990-06 Baugrund; Dränung zum Schutz baulicher Anlagen; Planung, Bemessung und Ausführung
- [141] Koss, L.; Lesnych, N.; Venzmer, H.: Dem Schaden die Suppe versalzen. Methoden zur Entsalzung. B+B Bauen im Bestand. 33(2010), Nr. 5, S. 24–28
- [142] Becker, G.: Effektivere Entsalzung von Bauteilen durch Strombeaufschlagung von Stabanoden und Kompressen. Grundlagen und Verfahrensansätze. Der Bausachverständige 5(2009), Nr. 2, S. 32–35
- [143] Auras, M.; Arnold, B.; Siedel, H.: Maßnahmen bei Salzschiäden: Salzreduzierung, geeignete Putz- und Mörtelsysteme. In: Schwarz, H.-J., Steiger, M. (Hrsg.): Salzschiäden an Kulturgütern. Stand des Wissens und Forschungsdefizite. Ergebnisse des DBU-Workshops im Februar 2008 in Osnabrück. 2009
- [144] Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. -WTA- (Hrsg.): WTA-Merkblatt 3-13-01/D Zerstörungsfreies Entsalzen von Naturstein und anderen porösen Baustoffen mittels Kompressen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2003
- [145] Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. -WTA- (Hrsg.): WTA-Merkblatt 2-10-06/D Opferputze. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2007
- [146] Figgemeier, M.: Möglichkeiten und Grenzen. Betrachtungen zum Sanierputz nach WTA-Richtlinie 2-9-04/D. Der Maler und Lackierermeister (2009), Nr. 7, S. 31–34
- [147] N.N. Firmenmitteilung Remmers Baustofftechnik, Löningen.: Technisches Merkblatt: KSE 300 HV, KSE 300 E, KSE H
- [148] Sasse, R.; Schuh, H., Wendler, E.: Konsolidierung. Steinfestigung mit Kunststoffen. Kontrovers. bausubstanz 14(1998), Nr. 5, S. 40–42
- [149] Pummer, E.: Innovative Steinkonservierung. Vakuum – Kreislauf – Festigung. In: Gänßmantel, J.; Hecht, C. (Hrsg.): WTA-Almanach 2007. Bauinstandsetzen und Bauphysik. München: WTA-Publications, 2007
- [150] Möllenkamp, E.; Lamprecht, L.; Sigrist, B.: Das Acrylharzvolltränkungsverfahren. Denkmalpflege in Westfalen-Lippe. Nr. 2, S. 55–59. Münster: Ardey-Verlag, 2006
- [151] N.N.: Firmenmitteilung. ConsolidaS Kunst & Kulturgut GmbH
- [152] Grassegger, G.: Naturwissenschaftliche und technische Untersuchungen zu den Ursachen der Zerstörung und zur Entwicklung eines Restaurierungsverfahrens. Denkmalpflege in Baden-Württemberg. 2002
- [153] Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. -WTA- (Hrsg.): WTA-Merkblatt 3-17-10/D Hydrophobierende Imprägnierung von mineralischen Baustoffen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2010



- [154] Krus, M.: Das Austrocknungsverhalten hydrophobierter Natursteinwände unter natürlichen Klimabedingungen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 1997 (IBP-Mitteilung; 313)
- [155] Wendler, E.: Neues zur hydrophobierenden Imprägnierung poröser Baustoffe. Das neue WTA-Merkblatt. In: Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. -WTA- (Hrsg.): WTA-Almanach 2007. Bauinstandsetzen und Bauphysik. München: WTA-Publications, 2007
- [156] Sauder, M.: Hydrophobierung von Naturstein. Der Sachverständige (2003), Nr. 5, S. 130–132
- [157] Poschlod, K.; Snethlage, R.: Dauerversuch zur Problematik der Hydrophobierung von salzbelasteten Natursteinwerken. In: Wittmann, F. H. (Hrsg.): Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Tl. 3. Renningen-Malmsheim: Expert-Verlag, 1993
- [158] Weber, H.: Schutz von Naturstein. Zur Anwendung der hydrophobierenden Imprägnierung. Bausubstanz 10(1994), Nr. 2, S. 54–57
- [159] Meyer, H.: Mit Rücksicht auf die Umwelt: Imprägnieren auf Wasserbasis. Naturstein 54(1999), Nr. 1, S. 26–28
- [160] Meyer, U.: Schlämmen für Natursteinmauerwerk – Anforderungen, Eigenschaften, Prüfverfahren, Applikation. In: Wittmann, F. H. (Hrsg.): Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Tl. 2. Renningen-Malmsheim: Expert-Verlag, 1993
- [161] Kaiser, E.: Dünnschichtige Schlämmen auf originalen Oberflächen mit kiesolgebundenen Massen. In: Boué A. (Hrsg.): Farbe in der Steinrestaurierung. Fassung und Schutz. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2000
- [162] Böttger, K. G.; Knöfel, D.: Schlämmen für historische Ziegelbauwerke. In: Boué, A. (Hrsg.): Farbe in der Steinrestaurierung. Fassung und Schutz. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2000
- [163] Schubert, P.: Putzmörtel und Putz auf Mauerwerk – Eigenschaftskennwerte, Eigenschaftszusammenhänge, Prüfverfahren. In: Wittmann, F. H. (Hrsg.): Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Tl. 2. Renningen-Malmsheim: Expert-Verlag, 1993
- [164] Garrecht, H.; Reeb, S.; Berk, K.: Experimentelle und numerische Untersuchungen zur feuchtechnischen Wirkung von Putzsystemen auf feuchtebelastetem Mauerwerk. In: Feuchteschutz und Baudenkmal. IFS-Bericht Nr. 34. Mainz: Selbstverlag, 2009
- [165] Hafezi, M.; Figgemeier, M.: Putze. Differenziert vorgehen. Putztechnische Lösungen als Alternative zum Sanierputz. Bautenschutz + Bausanierung 22(1999), Nr. 6, S. 31–36
- [166] N.N.: Deffner & Johann GmbH Fachgroßhandel für Restaurierungsbedarf von A–Z. Produktmitteilung
- [167] DIN 18363:04-2010 VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Maler- und Lackierarbeiten – Beschichtungen
- [168] Steigerwald, H.: Silikatische Beschichtungen auf Sandstein. In: Boué, A. (Hrsg.): Farbe in der Steinrestaurierung. Fassung und Schutz. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2000
- [169] Hilbert, G.: Farbfassung von Natursteinen im Siliconfarbsystem. Zusammenhänge zwischen Rezeptierung und bauphysikalischen Eigenschaften. In: Boué, A. (Hrsg.): Farbe in der Steinrestaurierung. Fassung und Schutz. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2000
- [170] Weber, H.: Anstriche als Beschichtungen für Bauwerke aus Naturstein – Tl. 1. Arconis (2000), Nr. 2, S. 4–7



- [171] DIN EN ISO 12944-5:2008-01 Beschichtungsstoffe – Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme – Teil 5: Beschichtungssysteme (ISO 12944-5:2007); Deutsche Fassung EN ISO 12944-5:2007
- [172] Naturwissenschaftliches Arbeiten. Seilnachts Didaktik der Naturwissenschaften. URL: <http://www.seilnacht.com> > Farben erleben [Zitat vom 26.01.2012]
- [173] ZTV-ING Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. Tl. 3. Massivbauten. Abschnitt 5: Füllen von Rissen und Hohlräumen in Betonbauteilen. Dortmund: Verkehrsblatt-Verlag, 04/2010
- [174] Neubert, M.: Mauerwerkssanierung mit dem Spiralankersystem – Konzept, Wirkprinzip und maßgebende Materialeigenschaften. WTA-Journal (2009), Nr. 1
- [175] Meichsner, H.: Instandsetzung von gerissenem Mauerwerk mit Spiralankern. Der Bausachverständige 4(2008), Nr. 6, S. 9–12
- [176] Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. -WTA- (Hrsg.): WTA-Merkblatt 4-3-98/D Instandsetzung von Mauerwerk. Standsicherheit und Tragfähigkeit. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 1998
- [177] Stürmer, S.: Injektionsschaummörtel für die Sanierung historischen Mauerwerks unter besonderer Berücksichtigung bauschädlicher Salze. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 1997
- [178] N. N.: Rheinzink. Anwendung in der Architektur. 3. aktual. Aufl. Datteln: Rheinzink, 2011
- [179] DIN 18345:04-2010 VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Wärmedämm-Verbundsysteme
- [180] Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme e.V. (Hrsg.): Qualitätsrichtlinien für Fassaden-Dämmplatten aus EPS-Hartschaum bei Wärmedämm-Verbundsystemen (WDVS). Baden-Baden: Selbstverlag, 2008
- [181] Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme e.V. (Hrsg.): Qualitätsrichtlinien für Fassadendämmplatten aus Mineralwolle bei Wärmedämm-Verbundsystemen. Baden-Baden: Selbstverlag, 2006
- [182] Czi sie lski, E.; Vogdt, F. U.: Schäden an Wärmedämmverbundsystemen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 1999 (Schadenfreies Bauen; 20)
- [183] N. N.: Firmenmitteilung RELIUS
- [184] Panic, E.: Der Dämnhülle die Luft entzogen. Bauen im Bestand B+B 34(2011), Nr. 4, S. 16–21
- [185] Künzel, H.: Mauerwerk und Außenputz. Tl. 4: Wärmedämmendes Mauerwerk und Mauerwerk mit Dämmschichten. Der Bausachverständige 5(2009), Nr. 2, S. 25–28
- [186] Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. -WTA- (Hrsg.): WTA-Merkblatt 6-4-09/D Innendämmung nach WTA I. Planungsleitfaden. Ausgabe 05.2009. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2009
- [187] Hecht, C.; Getz, M.: Materialien für die Innendämmung. WTA-Journal (2006), Nr. 1, S. 1–17
- [188] Künzel, H. M.; Binder, A.; Zirkelbach, D.: Bemessung von Innendämmung. In: Geburtig, G. (Hrsg.): Innendämmung im Bestand. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2010
- [189] Scheffler, G. A.; Schoch, T.: Diffusionsoffen und kapillaraktiv. Energetische Innenwandsanierung. Deutsche Bauzeitschrift 59(2011), Nr. 2, S. 52–55
- [190] Waldhoff GmbH, Fachbetrieb für Taubenschutz: URL: <http://www.taubenschutz.de> [Zitat vom 16.02.2012]

- [191] Bock, E. et al.: Natursteinzerstörung durch biologische Verwitterung – der Beitrag der Nitrifikanten. In: Snethlage, R. (Hrsg.); Verbundforschungsprojekt Steinzerfall und Steinkonservierung (Hrsg.); Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie -BMBF- (Förderer): Denkmalpflege und Naturwissenschaft. Natursteinkonservierung 2. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 1998
- [192] Krumbein, W. E.: Mikrobenbefall und Steinzerstörung: autotroph oder heterotroph? chemisch oder physikalisch? Strategien der Verhinderung und Behebung – Eine Bilanz. In: Snethlage, R. (Hrsg.); Verbundforschungsprojekt Steinzerfall und Steinkonservierung (Hrsg.); Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie -BMBF- (Förderer): Denkmalpflege und Naturwissenschaft. Natursteinkonservierung 2. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 1998
- [193] Nägele, E. W.: Die Rolle von Salzen bei der Verwitterung von mineralischen Baustoffen. Baierbrunn: Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e. V. -WTA-, 1992
- [194] CLAYTEC e.K. URL: <http://www.claytec.de/produkte/wandflaechenheizung.html> [Zitat vom 16.02.2012]
- [195] Sauder, M.: Forschungsvorhaben Gedächtniskirche Speyer/IBS, 1995
- [196] Wendler, E.: Zum Mechanismus der Schalenbildung bei tonigen Sandsteinen. In: Verbundforschungsprojekt Steinzerfall und Steinkonservierung (Hrsg.): Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm Steinzerfall und Steinkonservierung. 1989
- [197] Steiner, J.: Minimierung der Amplituden schwingender Glockentürme. In: Wittmann, F. H. (Hrsg.): Werkstoffwissenschaften und Bausanierung. Tl. 1. Renningen-Malmsheim: Expert-Verlag, 1993
- [198] DIN EN ISO 4628-6:2011-12 Beschichtungsstoffe – Beurteilung von Beschichtungsschäden – Bewertung der Menge und der Größe von Schäden und der Intensität von gleichmäßigen Veränderungen im Aussehen – Teil 6: Bewertung des Kreidungsgrades nach dem Klebebandverfahren (ISO 4628-6:2011); Deutsche Fassung EN ISO 4628-6:2011
- [199] Götze, H.: Flachdächer beurteilen und instandsetzen – Schadensbilder, Ursachenermittlung, Instandsetzungsmöglichkeiten. Aachen: Landesinstitut für Bauwesen und angewandte Bauschadensforschung (LBB), 1992
- [200] DIN 18339:04-2010 VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Klempnerarbeiten
- [201] Schunk, E. et al.: Dach Atlas. Geneigte Dächer. 2. Aufl. Köln: Verlagsges. Rudolph Müller, 1996



# Stichwortverzeichnis

## A

Abbeizen 97  
Abdichtung 122  
Abformen 104  
Abkreiden 274  
Ablösung 250, 266  
Abriebfestigkeit 46  
Absanden 201, 246, 255  
Acrylat 126  
Acrylharzvolltränkung 136  
Alveolarverwitterung 205  
Ankerdornloch 48  
Anstrich 90, 149  
Atomabsorptionsspektroskopie (AAS) 80  
Aufblättern 222  
Ausbruch 224  
Außenabdichtung 126  
Außenabdämmung 162, 166  
Außenmauerwerk 18  
Außenmauerwerk (Konstruktion) 22  
Außenmauerwerk (Verband) 18

## B

Balkon 286  
Baufeuchte 56  
Berieselung 92  
Bewuchs 169, 275  
Bewuchsentfernung 95  
Biegezugfestigkeit 45  
Bindemittel 85  
Biozid 96  
Bitumen 123  
Blei 109, 111  
Bohrung 37  
Brandkruste 178  
Bröckeln 222  
Brücke 295

## C

Calciumcarbid-Methode (CM-Verfahren) 57

## D

Dach 290  
Dampfstrahlen 93, 96

Darr-Methode 56  
Datenlogger, digitaler 32, 34  
Dehnung, hygrische 49, 182, 215, 220, 271  
Dehnungsmessstreifen 32, 49  
Dehnung, thermische 48, 105, 217, 220, 243, 271  
Dichte 53  
Dichtungsschlämme 123  
Diffusion 56  
Diffusionsleiste 185  
Diffusionsstromdichte 67  
Diffusionswiderstandszahl ( $\mu$ ) 75  
Dispersionsfarbe 150  
Dispersionsilikatfarbe 150  
Dränmatte 129  
Dränung 128  
Druckfestigkeit 43  
Druckstrahlen 93, 98  
Durchfeuchtungsgrad 62

## E

Elastizitätsmodul 47  
Elektronenstrahlmikrosonde 43  
Elektroosmose, aktive 120  
Elektroosmose, passive 120  
elektrophysikalisch 120, 131  
Endoskopie 36  
Energieeinsparverordnung 73  
Entrosten 152  
Entsalzung 130  
Entwässerungsloch 127  
Epoxidharz 155  
Ettringit 181, 232, 252

## F

Farbentfernung 97  
Fassade, vorgehängte 22, 165, 292  
Fehlstelle 249  
Fenster 282  
Festigung 81, 134, 148  
Feuchteffleck 197  
Feuchtemessgerät, elektronisches 34  
Feuchtigkeit, aufsteigende 183, 194  
Feuchtigkeit, seitlich eindringende 187

Feuchtigkeitsgehalt 56  
Filterschicht 129  
Fixativ 150  
Fixieren 148  
Flächenheizung 186  
Fotogrammetrie 33  
Fotometrie 79  
Frostsprengung 212  
Frost-Tau-Wechsel 50  
Fugenmörtel 105, 243  
Fungizid 96

## G

Gamma-Durchstrahlung 60  
Georadar 32, 36  
Gipskruste 177  
Glaser-Diagramm 70  
Glühverlust 86  
Grundierung 151

## H

Haftzugfestigkeit 44  
HAZ-Mörtel 108  
Hohlraum 235  
Horizontalabdichtung 114  
HS-Zement 233  
Hydratation 194, 199  
Hydrophobierung 82, 132, 137, 191, 214  
hygroskopisch 56, 65, 199

## I

Inductively Coupled Plasma (ICP-Verfahren) 80  
Infrarotspektroskopie 78  
Infrarot-Thermografie 33, 59  
Injektion 115, 126, 154  
Injektionskompressen 131  
Innenabdichtung 128  
Innendämmung 166  
Ionenchromatografie 79

## K

Kalkfarbe 150  
Kalkmörtel 106  
Kalkzementmörtel 154  
Kapillarität 55  
Kapillarkondensation 56  
Karsten'sches Prüfröhrchen 33, 57

Kartierung 26  
Kernbohrung 36, 37  
Kerndämmung 166  
kernmagnetische Resonanz (NMR-Verfahren) 60  
Kieselsäureethylester (KSE) 102, 135, 148  
Knapenröhrchen 184  
Kompressen 131  
Kondensation 56, 197  
Kondenswasser 66  
Konservierung 81  
Kontaktwinkelmessung 61  
Korrosionsschutz 151  
Kristallisationsversuch 51  
Kruste 177

## L

Längenänderung, hygrische 49, 220, 271  
Längenänderung, thermische 48, 220, 271  
Laserverfahren 94  
Leitfähigkeit, elektrische 34, 58  
Leitfähigkeitsmessung 79  
Lichtmikroskopie 42  
Lockerzone 209  
Luftfeuchte-Ausgleichsverfahren 59  
Luftfeuchtigkeit, relative 66  
Luftschichtdicke, diffusionsäquivalente ( $s_d$ ) 66, 69, 75

## M

Mauerwerksaufbau 18  
Messverfahren, zerstörungsfreies 31  
Metallabdeckung 158  
Mikroorganismus 38, 80, 171, 178  
Mikroseismik 33  
Mikroskopie 39, 41, 89  
Mikrosonde 42, 78  
Mikrowellenmesstechnik (Moist-Verfahren) 59  
Mischungsverhältnis 89, 106  
Mörtel 83

## N

Neutronensonde 34, 59  
Nivelliergerät 32

## O

Opferputz 132, 256

## P

Paraffin 118, 119  
Passivierung 151  
Perimeterdämmung 165  
Pigmentanalyse 90  
Platte 100, 239  
Polyurethan 126, 136, 154  
Probenahme 37  
Putz 140  
Putzbewehrung 144, 262  
Putzmörtel 143  
Putzträger 144

## Q

Querschiff 90

## R

Rasterelektronenmikroskopie (REM) 42, 78  
Reaktionsharzmörtel 103, 109  
Reinigung 91, 95, 174, 265  
Reinigungspaste 94  
Relief 205  
Resonanzfrequenz 47  
Restauriermörtel 102, 239  
Riss 153, 228, 242, 258, 270  
Rissmarke 31  
Rissmonitor 31  
Rissverfüllung 154  
Rohdichte 53  
Röntgendiffraktometrie 43, 78, 89  
Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) 80  
Röntgenfluoreszenzspektroskopie 42  
röntgenografische Phasenanalyse 78  
Rostsprengung 226, 254

## S

Salzanalyse, qualitative 76, 77  
Salzanalyse, quantitative 76, 79  
Salzbildung 180, 256, 269, 276  
Salzsprengtest 52  
Sanierputz 132, 144  
Sättigungsdampfdruck 66, 68  
Sättigungswert 62  
Schale 208, 220  
Schale, vorgehängte 22, 165, 208, 292  
Schimmelpilz 72, 197  
Schlämme 140, 143  
Schuppen 207

Schurf 34  
Schwingungsschaden 232  
Setzdehnungsmesser 32  
Sickerschicht 129  
Sickerströmung 55  
Silan 139  
Siliconat 119  
Siliconharzemulsionsfarbe 150  
Silicon-Mikroemulsion (SMK) 119, 139  
Silikatfarbe 150  
Siloxan 139  
Sinterkruste 178  
Sockel 276  
Spiralanker 155  
Spiralbohrung 36  
Steinaustausch 99, 237  
Steinbearbeitung 23, 218  
Steinergänzung 102

## T

Taubenkot 173  
Taubenvergrämung 175  
Taupunkt 68  
Tausalz 189  
Tauwasser 67  
Tauwassermenge 68  
Teststäbchen 77  
Theodolit 32  
Thermohygrograf 34  
Time Domain Reflectometry (TDR) 60  
Trass 108  
Treibmineral 232  
Treppe 280  
Trockeneis-Verfahren 94  
Trockenlegung 114  
Tunnel 297  
Tür 278

## U

Ultraschall 36, 176  
Ultraschallgerät 32  
Ultraschall-Verfahren 94

## V

Vakuum-Dämmung 165  
Vakuum-Verfahren 93, 96  
Verankerung 111, 158  
Verdichtungszone 209

Verdunstungsgraben 184  
Verdunstungsmenge 67  
Verfärbung 191, 263, 272  
Verformung 234  
Verfugung 104, 244  
Verklammern 112, 155  
Verkleben 154  
Vernadelung 157  
Verpressen 156  
Vertikalabdichtung 121  
Verunreinigung 265  
Verwitterungsbeständigkeit 52  
Vierung 101, 237

## W

Wärmedämmputz 162  
Wärmedämmung 162  
Wärmedämmverbundsystem 163  
Wärmedehnung 48  
Wärmedurchgangskoeffizient (U) 66, 73  
Wärmedurchgangswiderstand 66  
Wärmedurchlasswiderstand (R) 66, 73  
Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ ) 66  
Wärmeschutzberechnung 72  
Wärmestromdichte (q) 66  
Wasseraufnahmefähigkeit 63  
Wasseraufnahmegrad 63  
Wasseraufnahme, hygroskopische 56, 65  
Wasseraufnahme, kapillare 63  
Wasseraufnahmekoeffizient (C, w) 63, 64  
Wasseraufnahme, maximale 61  
Wasserdampfdiffusion 75, 204  
Wasserdampf-Diffusionsdurchlasswiderstand 67  
Wasserdampfdiffusionswiderstand 204  
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl ( $\mu$ ) 66, 69  
Wasserdampfteildruck 66, 68  
Wasserglas 118, 134  
Wasserstrahlen 92, 96, 98, 174  
Wegaufnehmer, induktiver 32  
Widerstand, elektrischer 34, 58  
Winderosion 204

## Z

Zementmörtel 102, 108, 154  
Zeta-Potenzial 55, 120, 182  
Zuschlag 88

# Schadenfreies Bauen

Die Fachbuchreihe »Schadenfreies Bauen« stellt das gesamte Gebiet der Bauschäden dar. Erfahrene Bausachverständige beschreiben die häufigsten Bauschäden, ihre Ursachen und Sanierungsmöglichkeiten sowie den Stand der Technik. Die Bände behandeln jeweils ein einzelnes Bauwerksteil, ein Konstruktionselement, ein spezielles Bauwerk oder eine besondere Schadensart.

Band 11

**Martin Sauder, Renate Schloenbach**

## **Schäden an Außenmauerwerk aus Naturstein**

**2., überarbeitete und erweiterte Auflage**

Schäden an Natursteinmauerwerk werden oft im Rahmen anderer Bau- und Sanierungsmaßnahmen mitbearbeitet, ohne auf mögliche Konsequenzen falscher Methoden und Materialien zu achten. Bei Natursteinmauerwerk treten aber spezielle Probleme und physiko-chemische Zusammenhänge auf, die im »normalen« Baugeschehen nicht zu erwarten sind.

In diesem Buch werden zunächst die unterschiedlichen Eigenschaften des Natursteins und die vielfältigen Schadensmechanismen erläutert. Danach werden neben den eigentlichen Schäden an Außenmauerwerk aus Naturstein auch die Untersuchungsmethoden zur Erkennung der Schadensursache und die verschiedenen Instandsetzungsmöglichkeiten behandelt. Dabei ist es nicht möglich, sich nur auf die Natursteine selbst zu beschränken, die fast immer in direktem Kontakt mit Mörtel, Putz, Anstrich etc. stehen. Diese Baustoffe und ihre typischen Schäden sowie die Möglichkeiten der Schadensbeseitigung werden ebenfalls besprochen.

Das Buch dient als Nachschlagewerk für alle, die bei der Instandsetzung und beim Umbau älterer Bauwerke mit Schäden an Naturwerkstein in Berührung kommen. Aber auch bei der Verarbeitung von Naturstein im Neubau hilft die Kenntnis der möglichen Schäden, sowohl Planungs- als auch Ausführungsfehler zu vermeiden.

### **Die Autoren:**

**Dipl. Geol. Martin Sauder** ist ö.b.u.v. Sachverständiger für Schäden an Naturstein und deren Restaurierung. Er leitet seit 28 Jahren das Institut für Baustoffuntersuchung und Sanierungsplanung GmbH in Saarbrücken, das Begutachtungen und Fachplanungen im Rahmen der Bauwerkserhaltung – auch bei denkmalgeschützten Gebäuden – durchführt.

**Dr. Renate Schloenbach** arbeitete sieben Jahre am Institut für Baustoffuntersuchung und Sanierungsplanung GmbH und ist seitdem freiberuflich tätig.

ISBN 978-3-8167-8809-6

