

Referat

Seminar für Baukonstruktion und Bauphysik

Hochschule für angewandte Wissenschaften und Kunst
Fachhochschule Hildesheim
Fakultät Bauwesen
Fachrichtung Architektur

Petra Busche

Mat.-Nr. 437547

Hildesheim

Gerrit Engelke

Mat.-Nr. 437660

Hildesheim

Instandsetzen nach WTA:
Sanierung/ Konservierung von Natursteinmauerwerk

WS 2006/ 2007

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Leimer

<u>Inhaltsverzeichnis:</u>	Seite
1. Allgemeines	4
1.1. Natursteinarten	4
1.1.1. Erstarrungsgesteine	4
1.1.2. Ablagerungsgesteine	4
1.1.3. Umwandlungsgesteine	4
1.2. Natursteinzusammensetzung	4/ 5
1.3. Natursteineigenschaften	5
1.4. Natursteinverwendung	5
1.5. Natursteinmauerwerk	5
1.5.1. Trockenmauerwerk	5
1.5.2. Bruchsteinmauerwerk	6
1.5.3. Zyklopenmauerwerk	6
1.5.4. Hammerrechtes Schichtenmauerwerk	6
1.5.5. Unregelmäßiges Schichtenmauerwerk	6
1.5.6. Regelmäßiges Schichtenmauerwerk	7
1.5.7. Quadermauerwerk	7
1.5.8. Mischmauerwerk	7
1.5.9. Steinfachwerk	7
1.5.10. Mauerwerkskonstruktion	7
2. Bauschäden	8
2.1. Bewuchs	8
2.2. Krustenbildung	8
2.3. Salzbildung	8
2.4. Verfärbung	9
2.5. Absanden	9
2.6. Schuppen	9/10
2.7. Schalen	10
2.8. Bröckeln	10
2.9. Rostsprengung	10
2.10. Risse	10
3. Natursteinsanierung nach WTA	11
3.1. Reinigung	11
3.1.1. Trockene Verfahren	11
3.1.2. Nasse Verfahren	11/12
3.2. Handwerklicher Steinaustausch	12
3.2.1. Steinauswahl	12
3.2.2. Herstellen der neuen Werkstücke	12/13
3.2.3. Abtragen oder Ausspitzen der schadhafte Steine	13
3.2.4. Versetztechniken	13

3.3. Steingerggung mit Restaurierm6rteln und Steinersatzstoffen	13
3.3.1. Allgemeines	13
3.3.2. M6rtelsysteme	14
3.3.3. Ausf6hrungsvorbereitung	14
3.3.4. Ausf6hrungsarbeiten	14/15
3.4. Fugen	15
3.4.1. Vorbereitende Ma6nahmen	15/16
3.4.2. Fugenreparatur	16
3.4.3. Fugenerneuerung	16/17
3.4.4. Verfugung	17/18
3.4.5. Farbgebung und Kartierung	18
3.5. Konservierung	18
3.5.1. Allgemeines	18
3.5.2. Historische und Aktuelle Konservierungsmittel	18/19
3.5.3. Ma6nahmen zum Festigen	19/20
3.5.4. Ma6nahmen zum Hydrophobieren	20
3.6. Zerst6rungsfreies Entsalzen mittels Kompressen	21
3.6.1. Zielsetzung	21
3.6.2. Wirkmechanismus	21/22
3.6.3. Verfahrensweise	22
3.6.4. Kompressenmaterialien	22
3.6.5. Vor-, Begleit- und Nachuntersuchungen	22
3.6.6. Durchf6hrung	22/23
4. Literaturangaben	23

1. Allgemeines

1.1 Natursteinarten

Natursteine werden gemäß ihrer Entstehung in sedimentäre, magmatische und metamorphe Gesteine unterschieden.

1.1.1. Erstarrungsgesteine (Magmatite)

Entstehen, wenn flüssiges Gestein (Magma) aus dem Erdkern durch Vulkane an die Erdoberfläche tritt und dort abkühlt. Es wird unterteilt in

- *Ergussgestein*: das im Schlot aufsteigende und aus dem Krater des Vulkans fließende Magma kühlt an der Luft ab und erstarrt zum Gestein, z. B. Basalt
- *Tiefengestein*: entsteht durch langsame Abkühlung des Magmas im Schlot des Vulkans (tief in der Erde), z. B. Granit
- *Ganggestein*: entsteht durch langsame Abkühlung des Magmas in den Gängen des Schlots, z. B. Porphyry
- *Auswurfgestein (Eruptivgestein)*: Teile des Magmas können bei Vulkanausbrüchen durch die Luft geschleudert werden, kühlen dabei ab und bleiben als schlackenartiges Gestein liegen, z. B. Bims

1.1.2. Ablagerungsgesteine (Sedimentgesteine)

Entstehen aus Erstarrungsgesteinen. Sie werden durch Witterungseinflüsse (Regen, Wind, Frost, Temperaturunterschiede) gelockert und zerkleinert. Die oberste Schicht der Erstarrungsgesteine verwittert zuerst, wird durch Wasser weggeschwemmt oder durch Wind weggetragen und als Ablagerungsgesteine an tieferen Stellen abgelagert. Durch diesen Vorgang können mehrere Schichten abgetragen und an anderer Stelle in umgekehrter Schichtenfolge wieder aufgebaut werden. Die oberste Ablagerungsschicht ist der Boden.

Wichtigste Arten der Ablagerungsgesteine: Humus, Ton, Lehm, Mergel, Sand und Kies

1.1.3. Umwandlungsgesteine (Metamorphite)

Entstehen durch hohen Druck und hohe Temperaturen aus Erstarrungs- und Ablagerungsgesteine, z. B. bei Veränderungen der Erdkruste (Faltungen, Senkungen, Überlagerungen mit Gesteinsschmelze bei Vulkanausbrüchen).

Erstarrungsgestein Granit → Umwandlungsgestein Gneis

Ablagerungsgestein Kalkstein → Umwandlungsgestein Marmor

Ablagerungsgestein Sandstein → Umwandlungsgestein Quarzit

Ablagerungsgestein Tonstein → Umwandlungsgestein Tonschiefer

1.2 Natursteinzusammensetzung

Natursteine setzen sich aus Mineralien zusammen. Diese sind fest, meist kristallin, mit bloßem Auge zu erkennen und bestimmen je nach Art, Menge und Zusammensetzung die Eigenschaften von Natursteinen, sowie Farbe, Härte und Oberflächenbeschaffenheit.

Wichtigste Mineralien sind:

- *Quarz*: Bestandteil von Sand (Quarzsand) und Sandstein
- *Kalkspat*: Bestandteil von Kalkstein, Kreide und Marmor
- *Feldspat*: Bestandteil von Granit, Porphy, Basalt und Schiefer
- *Ton*: mit Kalk als Mergel, mit Sand als Lehm
- *Glimmer*: Bestandteil von Granit

1.3 Natursteineigenschaften

- Die Druckfestigkeit ist abhängig von der Dichte des Gefüges (Gewicht, Härte)
- Witterungsbeständigkeit ist abhängig von der Porigkeit der Steine (Wassersaugvermögen)
- Bearbeitbarkeit ist abhängig von der Dichte/ Härte

1.4 Natursteinverwendung

Die Verwendung hängt von den unterschiedlichen Eigenschaften der jeweiligen Steine ab:

- Sedimentgesteine, insbesondere klassische wie Sandstein → Werkstein
- Chemische und organogene Sedimentgesteine wie Kalkstein entsprechend ihrer Vorkommen → Baustein
- Magmatite z. B. Porphy, Granit und Metamorphite z. B. Marmor, Gneis → vorgehängte oder angemörtelte Fassaden sowie für die Verkleidung von Sockeln

1.5 Natursteinmauerwerk

Mauerwerk aus Natursteinen ergibt bei richtiger Auswahl und werksgerechter Verarbeitung der Steine Mauern von großer Beständigkeit. Es muss widerstandsfähig gegen Witterungseinflüsse sein. Die Mauerwerksarten bei Natursteinmauerwerk werden nach der Art der Ausführung und nach der Bearbeitung der Natursteine unterschieden:

1.5.1 Trockenmauerwerk:

- Bruchsteine, die ohne Verwendung von Mörtel versetzt werden
- Ausfüllung von eventuellen Hohlräumen mit Zwickelsteinen
- Benutzung von Bindersteinen bei stärkerem Mauerwerk
- Gegebenenfalls lagenweises Auffüllen und/ oder Hinterfüllen von Boden
- Versetzen der 1. Lage im Beton- oder Mörtelbett
- Verwendung für Schwergewichtsmauern (Stützmauern)



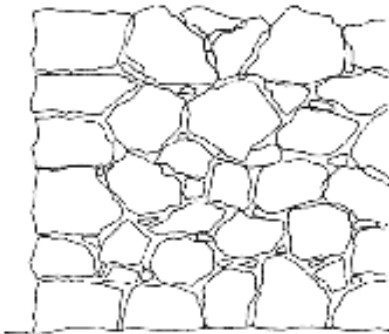
1.5.2 Bruchsteinmauerwerk:

- Grob bearbeitete Natursteine, die in Mörtel versetzt werden
- Verwendung von stärkeren, meist etwas besser bearbeiteten Quadern an den Ecken, in die die angrenzenden Wände abwechselnd lagenweise einbinden
- Unterschiedliche Schichtdicken



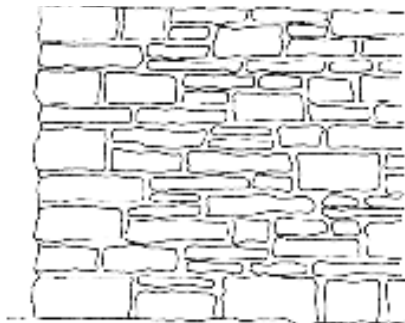
1.5.3 Zyklopenmauerwerk:

- Form des Bruchsteinmauerwerks mit großen, unbearbeiteten, vielkantigen Quadern
- Verwendung z. B. für Stützmauern



1.5.4 Hammerrechtes Schichtenmauerwerk:

- aus ungefähr rechtwinklig bearbeiteten Steinen mit wechselnden Schichtdicken im Mörtelbett
- Bearbeitung der Stoß- und Lagerfugen der Sichtfläche auf mindestens 120 mm Tiefe
- Unterschiedlich hohe Lagen

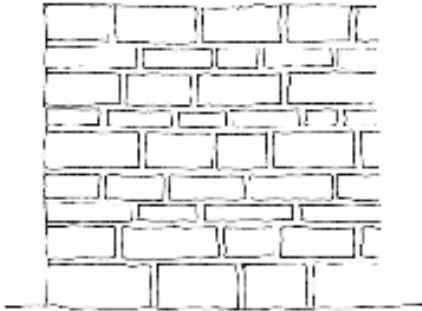


1.5.5 Unregelmäßiges Schichtenmauerwerk:

- Bearbeitung der Stoß- und Lagerfugen der Sichtfläche auf mindestens 150 mm Tiefe
- Unterschiedlich hohe Lagen in mäßigen Grenzen

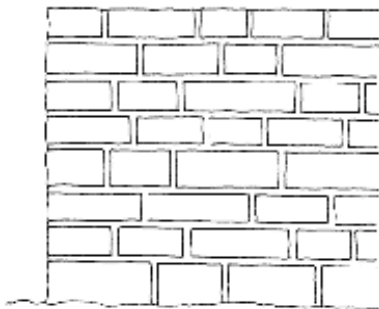
1.5.6 Regelmäßiges Schichtenmauerwerk:

- Gleichmäßige Steinhöhe pro Schicht (darf innerhalb der Schichten nicht wechseln)
- Bearbeitung der Stoßfugen der Sichtfläche auf mindestens 150 mm Tiefe und vollständige Bearbeitung der Lagerfugen



1.5.7 Quadermauerwerk:

- Allseitig bearbeitete, in Mörtel versetzte Steine mit durchgehenden Lager- und versetzten Stoßfugen



1.5.8 Mischmauerwerk:

- Verschiedene Materialien in unterschiedlicher Anordnung
- Einschaliges Verblendmauerwerk mit mittragender Natursteinverblendung, bei der mindestens 30 % der Außenschale als Bindersteine in die Hintermauerung eingreifen
- Lagenweise Abwechslung unterschiedlicher Steinsorten

1.5.9 Steinfachwerk:

- horizontale und vertikale, fachwerkartige Gliederung durch Elemente mit andersartigem Steinmaterial

1.5.10 Mauerwerkskonstruktionen:

- Vollmauerwerk (einschaliges Mauerwerk, das im tragenden Verband durchgehend aus Steinquadern zusammengesetzt ist, auch als einschaliges Verblendmauerwerk)
- Zweischaliges Mauerwerk (Füllung der Zwischenschicht zwischen gemauerter Außen- und Innenschale mit einem Gemisch aus Bruchstein und Mörtel, gegebenenfalls auch Dämmung, Verbindung von nichttragender Außenschale mit Innenschale durch Drahtanker aus nichtrostendem Stahl)
- Vorgehängte Fassade oder Schale (angemörtelte, angemauerte oder hinterlüftete Außenwandbekleidungen)

2. Bauschäden

2.1 Bewuchs

Durch defekte Fugen, Risse im Stein sowie konstruktive oder bauliche Mängel wie defekte Regenfallrohre oder Blechabdeckungen kann es zu einer erhöhten Baustofffeuchte kommen. Eindringende Wurzeln lockern durch ihren Druck das Gesteinsgefüge und schädigen es somit. Die Wahl des Sanierungsverfahrens richtet sich nach dem Verschmutzungsgrad und der Härte der Porosität des Gesteins sowie dem Zustand des Bauwerkes. Mögliche Verfahren sind Wasserreinigung oder chemische Reinigung.

2.2 Krustenbildung

Man unterscheidet zwischen dünnen, fest haftenden, dickeren und blasig abgelösten Krusten, welche dunkle, schwarze bis graue Farbe annehmen. Krusten an der Gesteinsoberfläche entstehen durch die Anlagerung von atmosphärischen Ruß, Staub und Schmutz und bilden sich bevorzugt an regengeschützten Stellen, an denen Schadstoffe und neu gebildete Salze durch Witterungseinflüsse nicht abgespült, sondern angereichert werden. Der Porenraum wird durch miteinander verklebenden Partikeln oder auskristallisierte Salze verdichtet. Zur Sanierung werden verschiedene Reinigungsverfahren angewandt wie z.B. Wasser-, Trocken-, chemische oder handwerkliche Reinigung.

2.3 Salzbildung

Salze bilden einen feinen Flaum auf der Fassadenoberfläche oder lagern sich in Form von Krusten ab, im tieferen Porenraum liegen sie in Form von gelösten Salzen vor. Es gibt viele unterschiedliche Verbindungen von Carbonaten, Chloriden, Sulfaten und Nitraten.

Wenn das weitere Wachstum der Kristalle durch die Porenwand oder andere Kristalle behindert wird, baut sich ein Druck (Kristallisationsdruck) auf. Der Hydratationsdruck entsteht durch die Volumenvergrößerung beim Übergang des Salzes in wasserreichere Phasen.

Die Salze können aus dem Mauerwerk selbst, durch aufsteigende Feuchte aus dem Untergrund, durch Reaktionsprodukte verschiedener Baumaterialien oder durch Reaktion von Immissionen mit den Baustoffen herkommen.

Aufsteigende Feuchtigkeit ist ein Medium zur Lösung und zum Transport von Salzen, die beim Verdunsten auskristallisieren. Zur seitlich eindringenden Feuchtigkeit zählt außer den Eigensalzen des Mauerwerks auch Wasser führende Schichten und Sickerwasser besonders bei Hanglage. Bezüglich der Salzbelastung müssen die jeweiligen Nutzungen der Gebäude berücksichtigt werden, besonders die Lagerung von bestimmten Materialien und die landwirtschaftliche Nutzung sind zu beachten. Mit Tausalz belastete Steine weisen Gefügelockerungen auf, die zu Absandungen und Schalenbildungen führen.

Ein häufig angewandtes Sanierungsverfahren zur Entsalzung sind Kompressen.

2.4 Verfärbungen

Verfärbungen können durch handwerkliche Mängel beim Aufbringen von Konservierungsmitteln entstehen. Z.B. durch den ungleichmäßigen Auftrag von Hydrophobierungsmitteln können an den Stellen mit ungenügender Eindringtiefe schneller Staub- und Schmutzpartikeln angelagert werden und zeigen eine Dunkelfärbung.

Bei einer Durchfeuchtung des Mauerwerks kommt es zu aufgrund punktuell erhöhter Feuchtigkeit zu einem fleckigen Erscheinungsbild: Bei aufsteigender Feuchtigkeit führt eine fehlende Abdichtung zu erhöhter Feuchtigkeitsaufnahme insbesondere des Fugenmörtels von Bodenplatten oder Treppen. Das unvollständige Abbinden des Verlegemörtels vor dem Verfugen kann zu Hydratation führen. Feine Risse, die bei der Hydrophobierung nicht überbrückt werden können, ermöglichen die Wasseraufnahme des Bauteils.

Auch die Mobilisation von Mineralen können verschiedene Verfärbungen hervorrufen: Gesteinsminerale werden durch Reinigungs- oder Lösungsmittel gelöst und transportiert und sind als braune Verfärbungen, z.B. Rostfahnen, an der Gesteinsoberfläche sichtbar. Durch das Oxidationsprodukt von Kupferblechen, welches durch Regenwasser an die Fassade gelangt, zeigt grünliche Verfärbungen.

2.5 Absanden

Absanden tritt bei Sedimentgesteinen auf, bei denen die Körner durch ein Bindemittel verkittet sind. Durch Verändern oder Auflösen des Bindemittels lockert sich der Gefügeverband auf und es kommt zum Abrieseln der einzelnen Körner, jedoch nicht zu einer Oberflächenverdichtung.

Durch ständiges Herablaufen von Wasser kann das Absanden ausgelöst werden. Dabei werden nämlich die Bindemittel gelöst, durch das Quellen von Tonmineralien das Gefüge gedehnt und die im Wasser transportierten Salze bewirken einen Hydratationsdruck. Aber auch die Versalzung kann zum Absanden führen oder wenn die Wasserdampfdiffusion behindert wird, z.B. durch Anstriche oder Beschichtungen mit einem höheren Wasserdampfdiffusionswiderstand als dem des Gesteinmaterials. Die längere Durchfeuchtung dieser Zone begünstigt Mineralumwandlungen und -neubildungen und führt zu einer Lockerung des Gesteinsverbandes. Dadurch kommt es zu blasenförmigen oder ganzflächigem Ablösen der Beschichtung oft unter Mitnahme von Gesteinspartikeln und zum Absanden der freigelegten Gesteinsoberfläche.

Sanierungsmaßnahmen können unter anderem Steinaustausch bei starkem Absanden oder steinmetzmäßiges Abarbeiten durch Abschleifen bei geringem Absanden sein, sowie eine Steinfestigung mit dem Ziel eines gleichmäßigen Festigkeitsprofils.

2.6 Schuppen

Unter Schuppen werden kleine, zusammenhängende Steinpartikel in der Größe von wenigen mm² bis cm² verstanden, die noch mit einer Teilfläche an der Gesteinsoberfläche haften. Diese stellt eine Lockerungszone dar, an der sich die Schale abgelöst hat. Eine

Schadensursache davon ist die Versalzung, denn durch den Transport von Salzen an die Gesteinsoberfläche entstehen Kristallisations- und Hydratationsdrucke, die zur Ablösung des Gesteinsverbandes sowie einzelner Schuppen führen.

Der Prozess der Schuppenbildung ist oft mit Absandungen verbunden. Dementsprechend sind auch die Sanierungsverfahren ähnlich: Steinaustausch, Abschleifen mit Steinmetzwerkzeugen, Festigung der Steinoberfläche oder Entsalzung.

2.7 Schalen

Schalen sind eine fortgeschrittene Krustenbildung, wobei zwischen flächigen und kantenparallelen Schalen unterschieden wird. Für Schalenbildung gibt es zahlreiche verschiedene Schadensursachen wie z.B. salzinduzierte Volumenänderungen, Frostsprengungen, hygische und thermische Dehnungen, Verdichtung der Oberfläche durch Festigung oder filmbildende Beschichtung, Hinterwanderung von Hydrophobierungen mit Feuchtigkeit.

2.8 Bröckeln

Durch regellos oder parallel und senkrecht zur Lagerung verlaufende Risse wird der Stein in einzelne Brocken zerlegt. Dieser Schaden kann ebenfalls unterschiedliche Ursachen haben: Frostsprengungen ausgehend von Rissen, Salzsprengungen, hygische und thermische Dehnungen oder auch konstruktiv bedingte Bauwerksbelastungen, die zu starken Belastungen von Bauteilen (Spannungen) führen. Die Sanierung erfolgt durch Steinaustausch.

2.9 Rostsprengung

Steindurchschlagende Risse, meist radialstrahlig von einem korrodierenden Metallteil ausgehend, entstehen bei Verwendung von nicht rostbeständigem Material, was zur Korrosion führt. Durch die mit dieser Reaktion verbundenen Volumenvergrößerung kommt es zur Rostsprengung. Auch hier werden Sanierungsmaßnahmen wie Steinaustausch getroffen, oder auch Korrosionsschutzanstriche.

2.10 Risse

Es wird zwischen schichtparallelen und steindurchschlagenden Rissen unterschieden. Schichtparallele Risse bilden sich entlang von schichtparallelen Inhomogenitäten (Tonlagen) im Gestein. Feuchtigkeit, Hydratation von Tonmineralien, Frostsprengungen, salzinduzierte Gefügebelastrungen oder hygische und thermische Dehnungen können diese Rissbildung beeinflussen. Druck- und Zugspannungen durch Bauwerksbewegungen erzeugen steindurchschlagende Risse. In beiden Fällen erfolgt eine Sanierung durch Steinaustausch oder Rissverfüllung

3. Natursteinrestaurierung nach WTA

3.1 Reinigung

3.1.1. Trockene Verfahren:

- *Abbürsten, Abschleifen*

Wird meistens mit der Hand gemacht bzw. mit einer Maschine mit einem oder mehreren rotierenden Teilen. Diese dürfen nur in Einzelfällen und für örtliche, leicht aufsitzende Verschmutzungen angewandt werden. Als Geräte können durchweg Wurzel- und Kunststoffbürsten eingesetzt werden. Stahlbürsten jedoch dürfen nicht verwendet werden.

- *Trockenes Strahlverfahren:*

Mit Druckluft wird ein Strahlmittel gegen die zu reinigende Oberfläche geschleudert. Beim Auftreffen des Strahls werden Partikel herausgerissen und zerplatzen dabei teilweise zu Staub. Die verschmutzte Oberfläche wird auf diese Art und Weise abgetragen und es tritt die gereinigte Oberfläche zum Vorschein.

Das trockene Strahlverfahren ist abhängig von den verschiedenen Parametern Luftmenge, Luftdruck, Austrittsgröße der Düse in mm, Art und Körnung des Strahlmittels, Erfahrung und Kenntnis des Fachpersonals, Strahldauer.

Um die Staubentwicklung bei diesem Verfahren gering zu halten, gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten: Zum einen kann über eine separate Pumpe und Leitung neben oder rund um die Luftdüse Wasser mitgespritzt werden. Zum anderen kann ein geschlossenes System verwendet werden, bei dem die Strahlarbeiten unter einer Haube durchgeführt werden und der Staub abgesaugt wird.

3.1.2. Nasse Verfahren:

- *Drucklose Reinigung*

Wasser mit Trinkwasserqualität wird über Röhren oder Schläuche mit einem Lochsystem geführt, so dass die Berieselung gleichmäßig über die zu reinigende Fassade läuft. Bei durchgehender Berieselung kann dies bis zu mehreren Wochen dauern.

Der Reinigungserfolg ist abhängig von der Art der Verschmutzung, der Steinart, der Porosität des Steines, der Oberflächenbeschaffenheit und der Einwirkzeit.

- *Reinigung mit Druck (kalt/ warm)*

Abspritzen der zu reinigenden Oberfläche mit Wasser unter unterschiedlichen Drücken, gegebenenfalls mit Granulat. Bei dieser Reinigungsart sind folgende Punkte zu beachten: Düsenabstand und Auftreffwinkel zum zu reinigenden Objekt, Wassermenge, Wasserdruck, Düsendurchmesser in mm sowie Granulatart.

- *Niederdruck- Wirbelstrahlverfahren*

Mit niederem Luftdruck, Wasser und einem neutralen Granulat wird ein Wasser-Granulat- Luftwirbel in der Düse erzeugt und die zu reinigende Oberfläche im

Mikroschleif- oder Radierverfahren gereinigt. Dabei müssen Luftdruck, Wassermenge und Granulatart berücksichtigt werden.

Dieses Reinigungsverfahren basierend auf einem Niederdruck- Rotationswirbel kann sowohl im Trocken- als auch im Nassverfahren angewandt werden.

- *Reinigung mit Wasserdruck (warm) und Netzmitteln*

Reinigung bestimmter Verschmutzungen mit Wasser unter Druck unter Zufügen von Netzmitteln, z. B. Tenside. Dadurch können Verschmutzungen gelöst, emulgiert und vom Wasser abtransportiert werden. Danach muss die gereinigte Oberfläche so lange mit klarem Wasser nachgespült werden, bis das Netzmittel völlig entfernt ist.

- *Reinigung mit Chemikalien*

Bei dünnflüssigen Reinigungsmitteln wird die zu reinigende Oberfläche vorgeätzt, um das Einsaugen des Reinigungsmittels in tiefere Schichten zu reduzieren. Dünnflüssige Reinigungsmittel lassen sich gut über Niederdruckpumpen auftragen, wodurch ein guter und gleichmäßiger Kontakt mit der zu reinigenden Oberfläche geschaffen wird.

Bei Reinigungspasten wird die zu reinigende Oberfläche angefeuchtet, damit möglichst wenig vom Werkstein aufgenommen wird. Die Pasten werden mit Bürsten, Roller oder Pumpe aufgebracht und müssen mit Plastikfolien abgedeckt werden, um ein Austrocknen zu verhindern.

Die Einwirkzeit von Pasten kann bis zu einem Tag dauern, während die von dünnflüssigen Reinigern bis zu einer halben Stunden beträgt. Bei beiden Verfahren muss intensiv und sorgfältig mit klarem Wasser nachgespült werden, damit der Schmutz samt den Resten des Reinigungsmittels gründlich entfernt wird.

- *Laserreinigung*

Störende und schädliche Ablagerungen an der Steinoberfläche nehmen die Energie des Laserstrahls auf und werden dadurch entfernt. Die Entwicklung kleinerer, baustellentauglicher Geräte führte zur Anwendung im Bereich der Restaurierung. Wegen hoher Anschaffungskosten des Systems ist der Einsatz meistens nur bei hochwertigen Objekten zugelassen.

3.2 Handwerklicher Steinaustausch

3.2.1 Steinauswahl

Die Kenndaten der verbauten Steine, die bei der Errichtung des Objektes und eventuellen Restaurierungsarbeiten verwendet wurden, sind zu ermitteln (Gesteinsart, Dichte, Porosität, Druckfestigkeit). Das neue Steinmaterial muss in seinen chemischen und physikalisch-technischen Eigenschaften sowie in Farbe und Körnung weitestgehend mit dem zu ersetzenden Werkstein übereinstimmen.

3.2.2 Herstellen der neuen Werkstücke

Wichtigste Grundlage für alle notwendigen Rekonstruktionen ist das Bauaufmaß, wobei vor Ort festgelegt wird, bis zu welcher Tiefe der Werkstein abgebaut werden muss und ob dadurch

statische Probleme entstehen. Der originale Steinschnitt darf nicht verändert werden, Fugenschnitt, Steinverband und Lagerrichtung nur in Ausnahmefällen.

Die Formen fehlender Teile werden durch Vergleiche mit ähnlichen Baupartien oder anhand historischer Unterlagen und Konstruktionsprinzipien ermittelt. Bei komplizierten Bauteilen und Details können zusätzlich zu den Zeichnungen und Schablonen Modelle oder ausgebaute originale Werksteine erforderlich sein.

Bei der denkmalgerechten Steinbearbeitung ist die Maßhaltigkeit, Fehlerfreiheit und die Art der Bearbeitung von besonderer Bedeutung.

3.2.3 Abtragen oder Ausspitzen der schadhafte Steine

Das Entfernen muss mit großer Sorgfalt durchgeführt werden. Es ist sinnvoll, am Gebäude von oben nach unten und gegebenenfalls in Teilabschnitten gearbeitet werden.

3.2.4 Versetztechniken

Bei ganzformatigen Werkstücken werden die zu versetzenden Steine auf die erforderliche Steinhöhe gehoben und auf fugenstarken Plättchen in den Schichtverband eingeschoben. Ist eine Schicht oder ein Stein versetzt, eingerichtet und gegen Verrutschen gesichert, werden die Fugen abdichtet und die Steine gegebenenfalls vorgehäst. Nach Erhärten des Mörtels wird die Abdichtung entfernt und die verbleibenden Fugen mit Fugenmörtel geschlossen.

Teilformatige Werkstücke (Vierungen) sind Steinerfüllstücke, die zur Reparatur vorhandener Steine eingesetzt werden und in den technischen Eigenschaften sowie im optischen Erscheinungsbild übereinstimmen müssen. Die Vierungen sollen möglichst passgenau (Pressfuge) in den Stein eingesetzt werden. Die Tiefe der auszubearbeitenden Öffnung wird von Größe und Form der Vierung bestimmt. Es werden reaktionsharzgebundene Kleber verwendet, beim Versetzen im Mörtelbett kann der Mörtel aufgegeben oder eingegossen werden.

3.3 Steinerfüllung mit Restauriermörteln und Steinersatzstoffen

3.3.1 Allgemeines

Die Steinerfüllung ist eine Möglichkeit, bei einer partiellen Zerstörung der vorhandenen Bausubstanz, diese wieder herzustellen. Es müssen wichtige denkmalpflegerische Beweggründe vorliegen und es ist von entscheidender Bedeutung, dass Farbgebung und Struktur des neuaufgebrachten Materials mit dem Altbestand möglichst identisch ist. Die Verwendung von Restauriermörteln erfolgt in folgenden Bereichen:

- Füllmaterial bei tiefen Schadstellen
- Anstrichmörtel
- Stufenmörtel
- Stampfmörtel
- Kernmörtel bei Abformung in offenen Formen
- Gießmörtel zum Ausgießen in geschlossenen Formen

3.3.2 Mörtelsysteme

Die Wahl des richtigen Mörtelsystems ist eine für den Erfolg der Maßnahme ausschlaggebende Entscheidung. Das Mörtelsystem muss chemisch und physikalisch auf die Gegebenheiten des Natursteins angepasst sein, das betrifft physikalische Größen wie E- Modul, Druckfestigkeit, kapillare Wasseraufnahme, Wasserdampfdurchlässigkeit und das Dehnungsverhalten, aber auch optische Notwendigkeiten. Zuschläge, Bindemittel, Füllstoffe und Pigmente müssen so gewählt werden, dass dieselbe Optik erreicht wird wie im historischen Bestand.

Man unterscheidet zwischen sechs verschiedenen Mörtelsystemen.

1. mineralische Mörtel: Werkrockenmörtel und Baustellenmörtel
2. mineralische Mörtel mit organischen Zusätzen: Zusatz von Polymeren, die chemisch und physikalisch mit dem Bindemittel reagieren.
3. Mörtel mit organischen Bindemitteln (Reaktionsharzmörtel): Epoxydharz, Polyurethanharz, Methylmethacrylat, ungesättigter Polyester. Diese Mörtel festigen sich durch Polyaddition oder Polymerisation, was in exothermen Reaktionen geschieht.
4. Mörtel mit anorganischen Kieselolen: Aus Solen oder Dispersionen wird aus Kieselsäure als Bindemittel Kieselgel ausgeschieden.
5. Mörtel auf Basis von Kieselsäureestern: Durch Hydrolyse entsteht Kieselgel
6. Mörtel mit organischen Lösungen oder Dispersionen: Polymere bilden durch verdunsten des Lösungsmittels einen Film, der Zuschlag und Bindemittelteilchen verbindet.

3.3.3 Ausführungsvorbereitung

Im Vordergrund der Sanierung steht, möglichst viel des Altbestandes zu erhalten. Es ist daher unabdingbar, dass nicht zu behandelnde Bereiche geschützt werden und ein zurückerarbeiten des vorhandenen Steins soweit wie möglich vermieden wird. Falls die denkmalpflegerischen Ansprüche es jedoch zu lassen, ist der Stein bei Schadhaftheit bis auf einen tragfähigen Grund zurückzuarbeiten. Abhängig von der Beschaffenheit des „neuen“ Untergrundes und der zu verwendenden Mörtelart ist sicherzustellen, dass der Mörtel gut mit dem Untergrund verbunden ist. Möglichkeiten sind Bohrungen, die Verwendung von Dispersionen oder Grundierschlämmen und eine mechanische Verdichtung. Bei hohen Anforderungen an die Schadhafte (Auskragung oder große Tiefe) muss eventuell sogar eine Verankerung aus z.B. nichtrostendem Stahl vorgesehen werden. Eventuell empfiehlt sich auch das Festigen des Natursteins, um die Anbindungsfähigkeit zu erhöhen.

Die Schadhafte muss begrenzt, hintergriffig ausgearbeitet und mit rauen Kanten versehen werden.

3.3.4 Ausführungsarbeiten

Die jeweiligen Herstellervorschriften sind natürlich unbedingt einzuhalten. Der Fugenschnitt muss eingehalten werden und bei mineralischen Mörteln sind, um eine optimale Erhärtung zu erreichen, Mindestdicken einzuhalten. Die Arbeitsfläche muss gründlich von Staub und Rückständen gereinigt werden.

Hydraulisch abbindende Mörtel:

Bei Werk trockenmörtel und Baustellenmörtel ist auf die richtige Menge des Anmachwassers zu achten, die Konsistenz kann von erdfeucht bis plastisch sein. Nur so viel Mörtel herstellen wie zeitnah verarbeitet werden kann. Die Schadstelle ist von Staub zu befreien und im richtigen Maße vorzunässen. Falls große Tiefen verfüllt werden müssen, kann mit einem Füllmörtel gearbeitet werden. Grund- und Deckmörtel können sich in ihrer Materialität unterscheiden, es muss nur sichergestellt werden, dass die Oberfläche des Füllmörtels ausreichend Haftung bietet. Er muss gegebenenfalls also angeraut werden. Der Mörtel kann ein wenig über die zu sanierende Steinoberfläche hinausragen und nach dem Erhärten entsprechend nachgearbeitet werden. Der Mörtel muss zum Erhärten vor Witterungseinflüssen geschützt werden und feucht gehalten werden. Die Temperaturen dürfen nicht unter +5°C liegen. Falls der Mörtel organische Zusätze enthält, ist er nach demselben Verfahren zu verarbeiten.

Reaktionsharzmörtel:

Bei der Verarbeitung von Reaktionsharzmörteln darf die angrenzende Steinoberfläche nicht überdeckt werden und eine Grundierung wird bei stark saugenden Steinen erforderlich. Alle Reaktionsharzmörtel bestehen aus zwei Komponenten, deren Dosierung nach Gewichts-/ Volumenteilen variierbar ist. Die direkte Verarbeitung des Mörtels erfolgt wie bei hydraulisch abbindenden Mörteln.

Mörtel mit anorganischen Bindemitteln:

Dabei handelt es sich entweder um siliziumhaltige Lösungen oder Dispersionen, bei denen SiO₂ (Kieselgel) gebildet wird. Sie sollten eine geringere Festigkeit und eine größere Fähigkeit zur Wasseraufnahme aufweisen, als der Originalstein. Oder es handelt sich um Kieselsäureester bzw. Kieselsole, die durch eine Reaktion mit Ethylalkohol Kieselgel bilden. Die Temperatur darf zur Verarbeitung nicht unter 10°C sein.

Mörtel mit organischem Bindemittel:

Hierbei sind Polymere das Bindemittel, entweder als Dispersion in Wasser, oder in Lösungsmittel gelöst. Bei der Dispersion in Wasser, entsteht durch das Verdunsten des Wassers ein Polymerfilm z.B. aus Acryl, dabei ist die Mindestfilmbildungstemperatur unbedingt zu beachten, da sonst keine Erhärtung stattfinden kann. Bei einem Mörtel mit in Lösungsmittel gelösten Polymeren kommt es zu einem ähnlichen Ergebnis durch Verdunsten des Lösungsmittels.

Es gibt noch eine Reihe weiterer Mörtel mit anderen Bindemittel Varianten, auf die hier nicht weiter eingegangen wird.

3.4 Fugen

3.4.1 Vorbereitende Maßnahmen

Am Anfang einer baulichen Maßnahme muss immer erst eine Bestandsaufnahme stattfinden. Dabei sind die chemisch- physikalischen, denkmalpflegerischen und bautechnischen Aspekte zu berücksichtigen, wie Art und Zustand des Mauerwerks, Fugenform, Fugenfunktion und Fugenverlauf, sowie die Eigenarten des jeweilig verwendeten Mörtels (Zusammensetzung,

Farbigkeit, Alter und Zustand). Unter Einfluss dieser Faktoren muss ein Instandsetzungskonzept erstellt werden, indem erhaltungswürdige und zu erneuernde Fugen festzulegen sind. Für die spätere Ausführung ist nun eine für das gesamte Projekt aussagekräftige Musterfläche zu erstellen. Bei dieser Fläche muss man darauf achten, dass die angemessene Technik herausgearbeitet wird, die Materialwahl stimmig ist und alle anderen begleitenden Maßnahmen berücksichtigt werden. Wenn die Musterfläche ausreichend lange fertig gestellt ist, wird diese bewertet und gegebenenfalls korrigiert. Bei dieser Referenzfläche wird die Vorgehensweise dokumentiert und ein Abnahmeprotokoll erstellt.

3.4.2 Fugenreparatur

Wenn der Zustand der Fuge es erlaubt, bzw. eine denkmalpflegerische Notwendigkeit besteht, wird eine Fugenreparatur ausgeführt. Folgende Maßnahmen sind denkbar:

- Behandeln von Rissen durch Injizieren eines auf die Gegebenheiten angepassten Materials (Zuschlag, Bindemittel, usw.)
- Auffütterung von verwittertem Fugenmörtel (verbleibender alter Mörtel wird gefestigt und/oder bis zu einem tragfähigem Grund zurückgearbeitet) durch angemessenes Material.
- Festigung durch nachträgliches behandeln mit Festigern.
- Teilergänzung des zerstörten Bereichs mit sorgfältig an den Altbestand angepasstem Material.
- Nachtreiben einer gelösten Bleifuge, sofern dies der Zustand des Steins erlaubt.

3.4.3 Fugenerneuerung

Die Fuge muss erst doppelt so tief wie sie breit ist von altem Material befreit werden. Fugenflanken dürfen nicht beschädigt werden und glatte Flächen (z.B. Sägeflächen) müssen angeraut werden. Abschließend ist die Fuge gründlich von Staub und Rückständen zu befreien. Zu beachten ist außerdem die Reaktionszeit des Bindemittels (Bei Kieselsäureestern die Hydrophobie). Bei Mauerwerk mit Zwicksteinen sind diese vorher zu versetzen, der Versetzmörtel muss erst ausreichend erhärten. Die Festigung des Steins kann vor oder nach dem Ausräumen der Fuge notwendig werden. Falls eine Fugenflanke beschädigt ist, muss diese wiederhergestellt werden.

Die für die Materialwahl wichtigen Eigenschaften sind vor allem Farbigkeit, Sieblinie, Art der Zuschlagstoffe, E- Modul, Dampfdurchlässigkeit und Flankenhaftung. Definiert werden die Anforderungen ja bereits durch das Instandsetzungskonzept bzw. die Musterfläche. Die Eigenschaften der Mörtel lassen sich durch bestimmte Bindemittel, Zuschläge und Zusatzmittel beeinflussen.

Mörtelübersicht:

- *Mörtel mit mineralischen Bindemitteln*

- Kalkmörtel: früher sehr gebräuchliches Bindemittel. Heute Sumpfkalk, Kalkhydrat, hydraulischer Kalk
- Zementmörtel: in rein Form nur bei hartem, dichtem Gestein. Durch bestimmte Zusatzstoffe kann die Festigkeit stark beeinflusst werden. Z.B. Kalkzementmörtel,

Trasskalkmörtel, Trasszementmörtel, Mörtel mit hydraulischer Bindung, mineralische Mörtel mit organischen Zusätzen, Gipsmörtel

- Mörtel mit organischen Bindemitteln

- Epoxydharz EP
- Polyurethanharz PUR
- Methacrylatharze PMMA

- Mörtel mit Filmbildenden Bindemitteln

- Andere Fugenmaterialien

- Blei
- Elastische Dichtstoffe
- Ton
- Fugenbänder
- Schnüre
- Asphalt
- Metall
- Schmelzkitte

3.4.4 Verfugung

Beim Verfugen sind die unterschiedlichen Vorgehensweisen durch die verschiedenen Bindemittel bzw. Materialien zu beachten

- Mörtel mit mineralischem Bindemittel

Dem korrekten Vornässen der Fugenflanken kommt eine große Bedeutung zu, um Haftprobleme zu vermeiden, es muss gegebenenfalls mehrfach wiederholt werden. Der oberen Fugenflanke sollte besondere Aufmerksamkeit zuteil kommen. Bei der mehrschichtigen Verarbeitung von hydrophoben Mörteln dürfen die Oberflächen zwischenzeitig nicht austrocknen (Haftprobleme). Die Anmachwassermenge ist im Regelfall so gering zu halten wie möglich. Damit keine Verfärbungen im Fugenbild entstehen, muss auf Dinge wie die Wechselwirkung von Mörtelkonsistenz, Luftfeuchte und Temperatur geachtet werden. Ebenso ist Art und Zeitpunkt der Oberflächenbehandlung (Abziehen, Einwaschen, Abbürsten, oder Abkehren) maßgeblich für die Farbwirkung einer Fuge.

Die frische Fuge ist vor Witterungseinflüssen zu Schützen. Bei der Verwendung von hydraulisch wirkenden Bindemitteln ist die nachträgliche Feuchthaltung nicht zu vernachlässigen.

- Mörtel mit mineralischem Bindemitteln und organischen Zusätzen

Mineralisch abbindende Mörtel werden durch Zugabe von Polymeren in ihrem Erhärtungsverhalten beeinflusst, die Polymere erhärten chemisch/ physikalisch zusammen mit dem mineralischem Bindemittel und verändern so die Mörtel Eigenschaften. Porosität, Haftung, Wasserrückhaltung und -abweisung werden beeinflusst.

- Mörtel mit organischem Bindemittel

Diese Mörtel erhärten durch Polymerisation oder Polyaddition und setzen dabei nicht unerhebliche Wärmemengen frei (exotherme Reaktion), dadurch entsteht eine sehr große

Haftung mit dem Mauerwerk, die dessen Zugfestigkeit oftmals übersteigt, daher ist die Verwendung von Mörteln mit Reaktionsharzen nach Möglichkeit zu vermeiden.

- Weitere Fugenmaterialien

Bei der Verarbeitung von Blei muss aufgrund seiner Giftigkeit besonderer Arbeitsschutz gewährleistet sein. Blei kann eingegossen werden (Gusskanäle, Abdichtung, Fugentrockenheit und -sauberkeit sind vorzubereiten) oder im festen Zustand eingearbeitet werden.

Bei elastischen Dichtstoffen sind die Herstellerangaben vor allem hinsichtlich der Gesamtverformung unbedingt zu beachten. Die weiteren oben genannten Materialien kommen eher selten zum Einsatz.

3.4.5 Farbgebung und Kartierung

Je nach gewünschtem Endergebnis der Fugensanierung, können farbige Fassungen und/ oder farbige Mörtel verwendet werden, falls Farbabweichungen entstehen können diese mit lasierenden oder deckenden Retuschen angeglichen werden. Eine Dokumentation von originalem Bestand und durchgeführten Reparaturen kann durch eine Kartierung festgehalten werden.

3.5 Konservierung

3.5.1 Allgemeines

Bei der Konservierung von Natursteinmauerwerk nach WTA geht es um den sachgemäßen Einsatz von Konservierungsmitteln zum Schutz gegen Verwitterung. Unterschieden wird zwischen Maßnahmen zur Festigung und Maßnahmen zur Hydrophobierung des Mauerwerks.

3.5.2 Historische und Aktuelle Konservierungsmittel

Konservierungsmittel können nach ihrem Wirkungsprinzip schematisiert werden. So wird nach Horsinger zwischen hydrophobierender Imprägnierung, klassischer Steinfestigung, filmbildender stabilisierender Imprägnierung, Oberflächenversiegelung und Volltränkung unterschieden.

Die Menschen setzten aber auch bereits früher verschiedenste Mittel ein, um Mauerwerk vor Wiedereinflüssen zu schützen und seine Lebensdauer so zu verlängern. Im WTA Merkblatt E 3-14-04/D sind die verschiedenen historischen Konservierungsmittel mit Wirkungsweise und seinen jeweiligen Vor- und Nachteilen tabellarisch aufgestellt. Üblich waren früher fettige Stoffe (Öl, Wachs, Paraffin), Leim/ Gelatine, Wasserglas, Fluat, Metallsalze, Barytwasser und Kalkmilch. Weitere Informationen über Wirkungsweisen entnehmen sie dem Merkblatt.

Heute werden meist andere Konservierungsmittel eingesetzt. Hier sind zu erwähnen Kunstharze (festigende und auch hydrophobierende Wirkung: geringe Eindringtiefe und Langzeitstabilität), Kieselsäureester (festigende Wirkung aber nicht klebend: nicht auf feuchtem und salzigem Untergrund einsetzbar), Kieselsäureester mit Hydrophobierung (Zusatz eines Wasser abweisenden Stoffes) und außerdem Siliconharze (Hydrophobierung: Verschieden Eindringtiefen möglich).

3.5.3 Maßnahmen zum Festigen

Durch Verwitterung lockert sich das Gefüge innerhalb des Natursteins. Daher muss durch Bindemittelzufuhr der ursprüngliche Zustand wiederhergestellt werden. Dazu muss anfangs eine Kenndatenermittlung durchgeführt werden (siehe auch WTA 3-4-90). Dabei müssen folgende Informationen gesammelt werden:

- E-Modul
- Schad Salzgehalt, Porosität, Bindemittel
- Materialfeuchte, Saugfähigkeit
- Verwitterungstiefe, Materialverbrauch, Eindringtiefe des Steinfestigers, Festigkeitsprofil

Das Behandeln von Natursteinen mit Bindemitteln kann allerdings nicht bei jeder Natursteinart erfolgen. Bei der Erstellung des Maßnahmenkonzeptes müssen die Anwendungsgrenzen beachtet werden und es muss geprüft werden, in wie weit der Naturstein gefestigt werden kann. Bei zu dichtem und nicht ausreichend saugfähigem Gestein (Schalenbildung, das Bindemittel kann nicht ausreichend tief eindringen), bei tonhaltigem Naturstein (Gefahr des Quellen, gegebenenfalls quellmindernde Produkte verwenden) und bei feuchten und/ oder versalzten Untergründen (notwendige Eindringtiefe ist nicht gewährleistet, daher unkontrollierte Reaktion, Ausgleichfeuchte muss hergestellt werden) ist die gewählte Maßnahme genau auf ihre Tauglichkeit zu prüfen. Liegen große Hohlräume vor, ist ein anderes Verfahren als Bindemittelinjektion zu wählen. Die Anforderung des Verfahrens muss sein, den Stein wiederherzustellen, ihn also nicht mehr als nötig zu verändern. Von der Festigung mit anorganischen Lösungen, wie zum Beispiel Wassergläsern und Kieselolen ist abzusehen, da sie zu viele Nachteile haben.

Am häufigsten werden zur Festigung Kieselsäureester verwendet. Der KSE reagiert mit Wasser zu Kieselgel und Alkohol. Das Kieselgel als Bindemittel geht vor allem eine chemische Bindung mit silikatischen Bestandteilen im Naturstein ein, aber auch eine physikalische durch „verkralen“ mit dem Porengefüge. Die verschiedenen zur Verfügung stehenden Produkte unterscheiden sich vor allem in ihrem maximal möglichem Kieselgel- Gehalt (10%- 50%) und ihrem Lösungsmittelgehalt (0%- 80%). Weiterhin kommen Produkte zum Einsatz, die zusätzlich hydrophobierende Eigenschaften besitzen, die mit Haftmittel versetzt sind (bessere Haftung an calcitischen Untergründen) und die mit elastifizierenden Weichsegmenten ausgestattet sind, um für bestimmte Untergründe ein optimales Spannungs- Dehnungs- Verhältnis zu erreichen.

Neben den siliciumorganischen Produkten, kommen noch organische Produkte zum Einsatz. Epoxydharze, Polyurethanharze und Acrylharze sind die gängigen Kunstharzvarianten zum Festigen und Verkleben. Harze werden meist gelöst in Lösungsmitteln verarbeitet, eher selten als Dispersion in Wasser gelöst (geringe Eindringtiefe). Bei der Verarbeitung ist darauf zu achten, dass sich der Wasserdampfdiffusionswiderstand erhöht und die Mindestfilmbildungstemperatur eingehalten wird (+5°C - +12°C je nach Produktart).

Vor Beginn der Festigungsarbeiten muss als erstes, wie oben bereits erwähnt, eine Voruntersuchung stattfinden. Im Anschluss daran wird eine Probestfläche erstellt, bei der die theoretisch angestrebten Ergebnisse auf ihre Praktikabilität hin überprüft werden. Arbeitsmechanismen werden erstellt, Farbveränderung untersucht. Die Erstellung dieser

Probefläche wird dokumentiert. Die zu behandelnden Flächen sind, um das ursprüngliche Saugverhalten herzustellen, nach WTA zu reinigen und da bei der Reinigung nach WTA mit einem nicht unerheblichen Substanzverlust zu rechnen ist, muss eventuell der Stein vorgefestigt werden. Wenn nun alle betroffenen Flächen die richtige Saugfähigkeit und Trockenheit erreicht haben und nicht durch Sonneneinstrahlung aufgeheizt sind, kann bei Witterungsbedingungen von 8°- 25° C und relativer Luftfeuchte von 40%- 70% die Behandlung der Oberfläche beginnen. Die zu behandelnden Bereiche sind fortwährend vor Witterungseinflüssen zu schützen. Nicht zu behandelnde Bereiche und Pflanzen sind vor der Festigung zu sichern, außerdem sind selbstverständlich die Herstellerangaben in Punkto Sicherheit zu beachten.

Es gibt prinzipiell 6 verschiedene Möglichkeiten der Anwendung:

- Flutverfahren: Mit z.B. Elektropumpen oder Handsprühflaschen wird unter geringem Druck in ca. 2- 6 Tränkungen das Festigungsmittel aufgetragen. Dies sollte an einem Tag passieren und es ist ratsam in Zyklen zu arbeiten. (Ein Zyklus ist z.B. drei Tränkungen in kurzem Abstand, nass auf nass). Nach Abschluss der Reaktionszeit kann die Festigung wiederholt werden.
- Bürsten-, Pinsel- und Walzenauftrag: Nur bei kleinen Flächen praktikabel.
- Kompressenmethode: Die Kompressen (meist Zellulose) muss während der gesamten Behandlungszeit mit Festigungsmittel getränkt werden. Kein Austrocknen zulassen und überschüssiges Material nicht weiterverwenden.
- Druckverfahren: Über z.B. Schläuche oder Sonden wird der Festiger mit auf die Porosität abgestimmten Druck in das Gestein durch Risse oder eventuell auch Bohrungen eingebracht. Es werden gute Eindringtiefen erreicht. Materialverbrauch, Materialaustritt und Injektionsdruck sind fortlaufend zu überprüfen.
- Tauchverfahren: Gesamtes Objekt wird in ein Tauchbad gegeben. Das Eindringen geschieht durch Kapillarität. Das Bad muss vor Luftfeuchtigkeit geschützt werden.
- Volltränkungsverfahren: siehe WTA Merkblatt Sonderthemen bei der Natursteinsanierung.

Zum Abschluss des Festigungsverfahrens werden die Eindringtiefe und die Festigkeit überprüft. Die Tiefe wird entweder durch eine Bohrung, mit Kontrolle des durchfeuchteten Bereichs, geprüft (gleich nach Abschluss der Imprägnierung), oder durch die Zugabe von Dithizon wird farblich der im KSE enthaltene Katalysator nachgewiesen (nach Beendigung der Reaktion).

Die Festigkeit wird durch Bohrwiderstand, Ultraschalllaufzeit, oder anhand eines Festigkeitsprofils des Bohrkerns, im Vergleich zum Altbestand, überprüft.

3.5.4 Maßnahmen zum Hydrophobieren

Viele Schäden an Bauten sind durch eine Wasserbelastung entstanden. Wasser ist Löse-, Transport- und Quellmittel, außerdem entstehen durch seine Aggregatzustandswechsel enorme Volumenveränderungen, die zu Rissen und Abplatzungen führen. Weiterhin ist Wasser für biologische Schäden eine Grundvoraussetzung. Wenn man Steine also vor Wassereintrag schützt, hydrophobiert, ist ein weitaus geringeres Schadenpotenzial vorhanden. Eine Schicht an

der Oberfläche muss die Möglichkeit zur Wasseraufnahme über Kapillarität hemmen. Da eine Hydrophobierung meist nicht wieder rückgängig zu machen ist, darf sie erst nach Abschluss aller anderen Sanierungsarbeiten ausgeführt werden.

Der Ablauf der Maßnahmen ist bei der Hydrophobierung im Prinzip derselbe wie bei der Festigung des Natursteinmauerwerks. Am Anfang steht natürlich erstmal eine Kenndatenermittlung. Bei der Hydrophobierung geht es dabei in erster Linie um Daten, die sich mit den Feuchtigkeitsverhältnissen im Stein beschäftigen. Feuchteverteilung im Mauerwerk, Wasserführung am Gebäude, Salzgehalt, Durchfeuchtungsgrad, Porosität und Tongehalt. Die Anwendungsgrenzen für den Einsatz von Hydrophobierungsmitteln sind bei der Saugfähigkeit des Natursteins, dem Tongehalt und dem Salz-/ Feuchtgehalt fast gleichzusetzen mit denen vom Festigungsverfahren. Problematisch ist weiterhin noch der Umgang mit kalkgebundenen Natursteinen und der Umgang mit durch Hygroskopie salzbelastetem Mauerwerk. Durch die Wasserbelastung von innen kann die hydrophobierte Außenschale abplatzen.

Zur Hydrophobierung werden ausschließlich siliciumorganische Produkte eingesetzt, die ein Siliconharznetzwerk als Wasser abweisende Schicht bilden. Eine detaillierte Produktübersicht ist dem Merkblatt zu entnehmen.

Die Vorgehensweise bei der Ausführung der Hydrophobierung ist identisch mit der bei der Festigung. Als Anwendungstechniken kommen, wie bei der Festigung, das Flutverfahren und der Bürsten- und Walzauftrag in Frage. Da viele Hydrophobierungsmittel eine cremearartige Konsistenz aufweisen, werden lange Einwirkzeiten erreicht, was sich positiv auf die Eindringtiefe auswirkt.

Eine Prüfung des äußeren Auperleffekts reicht allein nicht aus, um festzustellen, ob die Maßnahmen erfolgreich waren. Man muss zur Prüfung der Wasseraufnahme außerdem Messröhrchen mit Wasser befüllen und in geregelten Zeitabständen den Füllstand messen. Die Werte werden mit denen vom nicht behandelten Gestein verglichen. Die Kapillare Wasseraufnahme wird nach DIN- EN ISO 15148 bestimmt.

Die Eindringtiefe wird anhand eines Bohrkerns 14 Tage später geprüft.

3.6 Zerörungsfreies Entsalzen mittels Kompressen

3.6.1. Zielsetzung

Primäre Zielsetzung der Kompressenentsalzung ist die signifikante und zerstörungsfreie Reduzierung des Gehaltes an bauschädlichen Salzen in Naturstein und anderen porösen mineralischen Baustoffen.

Bauschädliche Salze sind leicht lösbare, ionare, meist anorganische Verbindungen in gelöster oder kristalliner Form, die in porösen Baustoffen durch mechanische Belastungen im Materialgefüge und/ oder chemische Wirkung zu Schäden führen.

3.6.2. Wirkmechanismus

Die Kompressenentsalzung beruht auf dem Prinzip, Salze in Wasser zu lösen und aus den belasteten Baustoff in die Kompressen (Oberflächenauflage) zu transportieren. Dabei gibt es verschiedene Transportmöglichkeiten:

- *Eigenbewegung*: Ionen diffundieren entsprechend dem Konzentrationsgradienten von der höheren zur niedrigeren Konzentration. Das Konzentrationsgefälle ist die treibende Kraft, die zur Eigenbewegung führt.
- *Bewegende Flüssigkeit*: Ionen werden entsprechend dem Feuchtegradienten vom feuchteren zum trockeneren Bereich transportiert. Dieser Kapillartransport wird durch das Porengefüge des Baustoffes bestimmt und durch den Wasseraufnahmekoeffizienten charakterisiert. Zudem werden Ionen entsprechend dem Druck-, Dichte- und Temperaturgradienten transportiert (Konvektion).

Die beschriebenen Prozesse treten gleichzeitig auf. Der Anteil ist abhängig von den Eigenschaften des Kompressenmaterials sowie den Umgebungs- und Verfahrensbedingungen.

3.6.3. Verfahrensweise

Die Komresse wird auf den zu entsalzenden Untergrund aufgebracht, die vorhandenen Salze werden gelöst und wandern je nach Verfahren entsprechend der Feuchte-/ Temperatur- oder Konzentrationsgradienten in die Komresse.

Bei einer *dauermassen Komresse* wird das Kompressenmaterial während der gesamten Anwendung nass gehalten und meistens bei durchfeuchtetem Untergrund angewandt. Da bei diesem Verfahren kein oder nur ein geringer Feuchtegradient eingestellt ist, geschieht der Salztransport hauptsächlich über Diffusion mit dem Ziel des Konzentrationsausgleiches zwischen Komresse und Untergrund.

Bei einer *abtrocknenden Komresse* trocknet das Kompressenmaterial während der Anwendung aus. Diffusion und der überwiegende Kapillartransport wirken aufgrund des gleichgerichteten Feuchte- und Konzentrationsgradienten in Richtung zur Komresse.

3.6.4. Kompressenmaterialien

Die Oberflächenaufgaben bestehen aus einer oder mehreren Komponenten (keine Bindemittel), die mit Wasser angemacht werden. Dieses Materialien können z.B. hochporöse, saugfähige, flexible und inerte Matten und Vliese sein.

3.6.5. Vor-, Begleit- und Nachuntersuchungen

Zu Beginn muss eine detaillierte fotografische und schriftliche Dokumentation. Die ausgewählte Verfahrensweise ist zunächst an Musterflächen zu prüfen und der Erfolg nachzuweisen. Während der Kompressenentsalzung muss eine Überprüfung des tatsächlichen Salzaustrags durch Begleituntersuchungen am Kompressenmaterial erfolgen. Die Bestimmung des Salzgehaltes ist nur am Kompressenmaterial erlaubt. Die Nachuntersuchungen erlauben eine direkte quantitative Bewertung und Bilanzierung des Entsatzungserfolges. Eine analytische Überprüfung der verbliebenen Salzgehalte im Untergrund sollte in unmittelbarer Nähe von Beprobungspunkten aus der Voruntersuchung stichprobenartig vorgenommen werden.

3.6.6 Durchführung

Der Untergrund muss vorbereitet werden, indem von der zu behandelnden Oberfläche störende Verunreinigungen schonend und möglichst trocken entfernt werden. Gegebenenfalls sind partielle Vorfestigungen oder das Auftragen von durchlässigen und tragfähigen Schutzschichten

möglich, damit Substanzverluste vermieden werden. Dadurch können Kompressen leichter und schonender entfernt, die Wirksamkeit der Kompresse aber vermindert werden.

Das Vornässen des Untergrundes löst Salze und ermöglicht deren Transport. Außerdem kann die Haftung der Kompresse auf dem Untergrund verbessert werden. Zum Vornässen des Untergrundes und Anmischen der Kompressen muss destilliertes oder entionisiertes Wasser verwendet werden.

Der Auftrag teigartiger Kompressenmaterialien kann von Hand oder maschinell ein- oder mehrschichtig erfolgen. Manche Materialien werden durch Hilfsmittel an der Oberfläche angepresst und fixiert.

Eine Wiederbefeuchtung nach teilweiser oder vollständiger Abtrocknung darf nicht geschehen, da sonst Salze wieder in den Baustoff gelangen können.

Bei einer dauernassen Kompresse wird die Kompressenoberfläche durch geeignete Folien abgedichtet, bei einer abtrocknenden Kompresse muss eine kontrollierte Abtrocknung ermöglicht werden.

Die Anwendungsdauer ist wegen der vielfältigen Einflussfaktoren anhand von Musterflächen zu bestimmen, wobei unabhängig vom Wirkmechanismus eine Gesamtbehandlungsdauer von insgesamt 6-12 Wochen eingeplant werden muss. Eine abtrocknende Kompresse erzielt eine effizientere Entsalzung als eine dauernasse, da die einzelnen Kompressen häufiger gewechselt werden müssen als die abtrocknenden Kompressen, wodurch eine hohe Gesamteinwirkungsdauer erforderlich ist.

Bei der Abnahme der Kompressen ist darauf zu achten, dass der Untergrund nicht beschädigt wird. Die Reinigung des Untergrundes von anhaftenden Kompressenresten erfolgt je nach Empfindlichkeit manuell oder maschinell trocken. Die Verwendung von Trennschichten (facing) verringert den Reinigungsaufwand.

4. Literaturangaben

- WTA- Merkblätter, Referat 3 Naturstein
- Schadenfreies Bauen Band 11, Schäden an Außenmauerwerk aus Naturstein, Sander/Schloenbach
- Bautechnik, Fachkunde Bau, Europa Lehrmittel