



STIFTUNG  
THÜRINGER SCHLÖSSER UND GÄRTEN



DBU-Förderprojekt AZ 22296-25

## **Erarbeitung und Erprobung einer Sanierungstechnologie für umweltgeschädigte Bauteile aus Lettenkohlendstein am Beispiel der Arkaden des Schlosses Friedenstein in Gotha**

Laufzeit: März 2004 bis Februar 2008



## **Abschlussbericht**

der Stiftung Thüringer Schlösser und Gärten  
erarbeitet von  
Dipl.-Ing. Heike Hopp und Dr. Hans-Werner Zier

Rudolstadt, den 10.04.2008

## Inhalt

<b>1.</b>	<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
<b>2.</b>	<b>Projektbeteiligte und zeitlicher Ablauf der einzelnen Arbeitsstufen</b>	<b>5</b>
2.1.	Aufgaben der Projektbeteiligten	5
2.2.	Bearbeitungsstufen und zeitlicher Ablauf des Projektes	6
2.3.	Bisherige Zwischenberichte	7
<b>3.</b>	<b>Materialsituation und konstruktiver Aufbau</b>	<b>8</b>
3.1.	Werksteine	8
3.1.1.	Rätsandsteine	8
3.1.2.	Lettenkohlendandsteine	9
3.1.3.	Einbausituation und Bearbeitung der Werksteine	12
3.2.	Aufbau der Pfeiler	13
<b>4.</b>	<b>Schäden und Schadensursachen</b>	<b>16</b>
4.1.	Schäden an den Werksteinen	16
4.1.1.	Überblick	16
4.1.2.	Abschalungen	17
4.1.3.	Abblätternngen	17
4.1.4.	Absandungen	18
4.1.5.	Weitere Schadbilder	19
4.2.	Schäden im Inneren der Pfeiler	21
4.3.	Feuchtebelastung in den Pfeilern	24
4.4.	Belastung der Steinoberflächen mit Gips und wasserlöslichen Salzen	27
4.7.	Schlussfolgerungen für die Sanierung	29
<b>5.</b>	<b>Entwicklung von Technologien und Materialien zur Restaurierung</b>	<b>30</b>
5.1.	Entwicklung eines Mörtels für Formergänzungen	30
5.2.	Schlämme für die Oberflächenbeschichtung	33
5.3.	Mörtel für die Auffüllung von tiefen Fugen und die Verfugung	35
5.4.	Untersuchungen zur Festigung von geschädigten Lettenkohlendandsteinen	39
5.4.1.	Auswahl der Festigungsmittel	39
5.4.2.	Applikation der Festigungsmittel	40
5.4.3.	Zusammenfassung der Ergebnisse	41
5.5.	Recherche nach Ersatzsandstein für Vierungen und Neuteile	43
5.5.1.	Lettenkohlen- und Schilfsandsteine in Thüringen	43
5.5.2.	Lettenkohlen- und Schilfsandsteine in den übrigen Bundesländern	44

5.5.3.	Ähnliche Sandsteine anderer geologischer Formationen	45
5.5.4.	Vergleich möglicher Ersatzgesteine	45
5.5.5.	Empfehlungen für geeignete Ersatzgesteine	46
<b>6.</b>	<b>Erprobung von Technologien und Materialien an Testflächen</b>	<b>47</b>
6.1.	Konservatorische Maßnahmen	47
6.1.1.	Reinigung	47
6.1.2.	Steinfestigung	48
6.1.3.	Konservatorischer Oberflächenverschluss	49
6.1.4.	Restauratorische Maßnahmen	50
<b>7.</b>	<b>Nachuntersuchungen an den Testflächen</b>	<b>53</b>
7.1.	Nachuntersuchungen an den Mörteln	53
7.1.1.	Ermittlung von Haftfestigkeiten an den Steinerfüllungsmörteln	53
7.1.2.	Ermittlung des Wasseraufnahmevermögens an Stein- und Mörteloberflächen	55
7.1.3.	Weiterentwicklung von Rezepturen für Mörtel und Schlämmen	59
7.2.	Nachuntersuchungen zur Steinfestigung	64
7.2.1.	Ergebnisse	64
7.2.2.	Schlussfolgerungen für die Festigung	65
<b>8.</b>	<b>Umsetzung der Ergebnisse an einer Musterachse</b>	<b>66</b>
8.1.	Zielstellung	66
8.2.	Durchgeführte Maßnahmen	67
8.3.	Dokumentation der Maßnahmen	71
8.4.	Erkenntnisse während der Ausführung der Musterachse	74
<b>9.</b>	<b>Nachuntersuchungen an der Musterachse</b>	<b>75</b>
9.1.	Visuelle Bewertung und Perkussionsproben	75
9.2.	Haftfestigkeitsprüfungen	76
9.3.	Lichtmikroskopische Untersuchungen an Bohrkernen	77
9.4.	Wasseraufnahmevermögen geschlämmter Oberflächen	78
9.5.	Bohrwiderstandsmessungen	79
9.6.	Schlussfolgerungen aus den Nachuntersuchungen	81
<b>10.</b>	<b>Resümee</b>	<b>82</b>
<b>11.</b>	<b>Veröffentlichung der Ergebnisse / Abschlusskolloquium</b>	<b>84</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>85</b>
	<b>Anlagen</b>	<b>86</b>

## 1. Einleitung

Sandsteine aus der geologischen Formation des Unteren Keupers (Lettenkohlendsteine) sind in Thüringen weit verbreitet und wurden bis in die dreißiger Jahre des 20. Jahrhunderts verbaut bzw. als Bildhauersandstein verwendet. Diese tonig gebundenen Steine weisen ähnliche Schadbilder wie die Schilfsandsteine des Mittleren Keupers auf. Typisch sind, je nach Belastungsfall, starke Absandungen, oberflächenparallele Schalenbildungen und Ablätterungen. In der Restaurierung erweisen sich diese angewitterten Steine bisher als problematisch, häufig treten nach der Durchführung von Sanierungen erneut Schäden auf [1, 2, 3].

Auch am Schloss Friedenstein in Gotha, das als die größte frühbarocke Schlossanlage (1643 bis 1654) Deutschlands gilt, wurden Lettenkohlendsteine in den Kasematten und Bastionen, aber auch in den umlaufenden Arkadenbögen des Hofes verbaut. An den Werksteinen der Arkaden sind die oben genannten gesteinsbedingten Schadbilder in den unterschiedlichsten Schädigungsgraden zu finden. Daneben sind aber auch Schäden durch in der Vergangenheit durchgeführte Sanierungen zu verzeichnen. So sind zu feste Verfugmaterialien und ungeeignete Ergänzungsmaterialien verwendet worden.

Hauptziel des DBU-Projektes war die Entwicklung einer Technologie zur Konservierung und Restaurierung von umweltgeschädigten Bauteilen aus Lettenkohlendstein. Es sollten neben der Festigung der Sandsteine auch Randbedingungen für geeignete Mörtel- und Ergänzungsmaterialien formuliert werden.

Im Rahmen von Zustandsuntersuchungen wurde zunächst der innere Aufbau der Pfeiler der Arkaden untersucht sowie die Art und der Anteil der verbauten Steinmaterialien und die Belastungssituation (Feuchte, Schadstoffe) im Stein- und Mörtelmaterial erfasst.

Im Anschluss an diese ersten Untersuchungen wurden speziell die Schäden an den Natursteinen (bevorzugt Lettenkohlendstein) erfasst und in Abhängigkeit von Belastung und Exposition systematisiert. Parallel dazu erfolgte auf der Basis der vorhandenen Steinarten eine Recherche zu Ersatzgesteinen und deren Verfügbarkeit.

Auf der Basis der durchgeführten Systematisierung vorhandener Schädigungen wurden Versuche zur Reinigung und Konsolidierung der vorhandenen Substanz an Probeflächen durchgeführt. Im Labormaßstab erfolgten Versuche zur Festigung an vergleichbaren Gesteinsproben.

Für die Ergänzung kleinerer oder flacher Fehlstellen an den Natursteinen wurden speziell angepasste Steinrestauriermörtel entwickelt. Ebenfalls angepasst wurden die Mörtel für den Versatz von Neusteinen und die Verfugung. Die Abstimmung musste hier auf den vorhandenen Bestand und die Steinerfüllungsmörtel erfolgen. Für die Konsolidierung von Abschuppungen und den Oberflächenschutz wurden Schlämmen entwickelt. Sämtliche Materialien werden an Testflächen und im Labormaßstab erprobt.

Die Anwendbarkeit der entwickelten Sanierungstechnologie wurde auf einer großflächigen Musterachse im Bereich der südlichen Hofarkaden des Schlosses Friedenstein in Gotha überprüft.

In die Projektarbeit wurden Studenten der Fachhochschule, Erfurt Fachbereiche Restaurierung und Bauingenieurwesen einbezogen. Auf diese Weise wurden die Techniken zur Restaurierung regionalspezifischer Gesteine direkt an die zukünftigen Restauratoren und Bauingenieure vermittelt.

Die Ergebnisse des DBU-Projektes wurden regelmäßig veröffentlicht und auf Fachtagungen sowie im Rahmen eines Abschlusskolloquiums vorgestellt.

## 2. Projektbeteiligte und zeitlicher Ablauf der einzelnen Arbeitsstufen

### 2.1. Aufgaben der Projektbeteiligten

Antragsteller: Stiftung Thüringer Schlösser und Gärten e.V.  
Schloss Heidecksburg, 07407 Rudolstadt

Projektleiter: Herr Jung (Stiftung Thüringer Schlösser u. Gärten)

Kooperationspartner: Architekturbüro Rittmannsperger + Partner, Erfurt,  
vertreten durch Herrn Schade

Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität  
Weimar (MFPA), vertreten durch Herrn Dr. Zier

Ingenieurbüro für Steinsanierung und Denkmalpflege Erfurt (ISD),  
vertreten durch Frau Hopp

Fachhochschule Erfurt (FHE), Fachbereich Restaurierung,  
vertreten durch Herrn Prof. Staemmler und Fachbereich  
Bauingenieurwesen, vertreten durch Frau Prof. Dr. Nehring

Fa. Morgenweck-Restaurierungen, Wünschensuhl,  
vertreten durch Herrn Morgenweck

#### Aufgaben der einzelnen Projektpartner:

Die Stiftung Schlösser und Gärten war für die Koordinierung des Gesamtprojektes und die Projektleitung verantwortlich.

Das Architekturbüro Rittmannsperger und Partner ist für die Baumaßnahmen am Schloss Friedenstein verantwortlich und musste die Arbeiten an der Musterfläche mit diesen koordinieren.

Das ISD führte stoffliche Untersuchungen zur Charakterisierung der in den Arkaden verbauten Natursteine und zur Steinfestigung durch und erstellt Vorschläge für geeignete Ersatzgesteine bzw. Steinfestiger. Das ISD erstellte eine Schadenskartierung an der Musterfläche und die Ausführungsplanung für die Restaurierungsarbeiten. Weiterhin erfolgte durch das ISD die Betreuung und Kontrolle der Restaurierungsarbeiten an der Musterachse sowie die Maßnahmenkartierung.

Die MFPA führte Untersuchungen zur Belastungssituation im Steinmaterial und im Mauerwerk der Arkaden unter Berücksichtigung umweltrelevanter Einflüsse durch. Es werden Anforderungen für Sanierungsmaterialien abgeleitet und Restaurierungsmaterialien für relevante Stein- und Mörtelarten erarbeitet und erprobt.

Durch die FHE wurden im Rahmen von studentischen Arbeiten Schadenskartierungen vorgenommen und Testflächen zur Untergrundkonsolidierung und Ergänzung von Fehlstellen angelegt.

Durch die Fa. Morgenweck erfolgen die Restaurierungsarbeiten an der Musterachse.

## 2.2. Bearbeitungsstufen und zeitlicher Ablauf des Projektes

Die einzelnen Bearbeitungsstufen und der Zeitpunkt ihrer Ausführung werden nachfolgend dargestellt:

**Tabelle 2-1: Bearbeitungsstufen und zeitlicher Ablauf des Projektes**

Bearbeitungs- stufe	Inhalte	Ausführungs- zeitraum
1	Erfassung und Bewertung von Schädigungen an den Arkaden des Schlosses Friedenstein in Gotha. Neben den Schäden an den Sandsteinen wurden auch vorhandene Mörtel und der innere Aufbau der Pfeiler untersucht.	März 2004 bis Dezember 2004
2	Recherchen zu Eigenschaften und zum Verwitterungsverhalten von Lettenkohlsandstein sowie Auswertung von bisherigen Konservierungsmaßnahmen.	März 2004 bis Juli 2005
3	Recherche zu Ersatzgesteinen für den Austausch von stark geschädigten Lettenkohlsandsteinen. Untersuchungen zur stofflichen Eignung dieser Gesteine.	März 2004 bis Juli 2005
4	Entwicklung eines Mörtelsystems zur Ergänzung von Fehlstellen am Lettenkohlsandstein.	Januar 2005 bis Mai 2005
4	Untersuchungen zur Reinigung und Konservierung von vorgeschädigten Lettenkohlsandsteinen unter Berücksichtigung der Exposition und spezifischer Schadbilder.  Anlegen von Testflächen am Objekt.	Mai 2005 bis September 2005
6	Erarbeitung von Randbedingungen für Mörtelrezepturen zur Ausbesserung von Mauerbereichen (Hinterfüllung, Neuaufmauerung und Verfugung), Recherche zu geeigneten industriell hergestellten Mörteln sowie Erarbeitung und Erprobung speziell angepasster Rezepturen an Testflächen.	Mai 2005 bis Oktober 2006
7	Erprobung der Konservierungs- und Restaurierungstechnologien auf einer Musterachse an ausgewählten Arkadenbögen der Südseite (unter Berücksichtigung der in den Paketen 1 bis 6 enthaltenen Ergebnisse)	Juli 2006 bis Juli 2007 *
8	Bewertung der Testflächen und der Musterachse.	April 2006 (Testfläche) Februar 2008 (Musterachse)
9	Abschlusskolloquium	April 2008

\* Wegen unvorhergesehener Probleme im Gründungsbereich der Südarkaden mussten die Restaurierungsarbeiten an der Musterachse unterbrochen werden, um statische Sicherungsmaßnahmen durchführen zu können. Dadurch kam es zu einer Verzögerung der Arbeiten. Das hatte zur Folge, dass auch die Nachuntersuchungen, die mindestens erst nach einer Winterperiode erfolgen sollten, nicht mehr -wie vorgesehen- im 1. Quartal 2007 vorgenommen werden konnten und eine Verlängerung des Projektes beantragt werden musste.

### 2.3. Bisherige Zwischenberichte

Im Rahmen des DBU-Förderprojektes wurden folgende Zwischenberichte angefertigt. Sie verdeutlichen gleichzeitig den jeweiligen Bearbeitungsstand des Projektes.

Zier, H.-W. :	Untersuchungen zur Belastungssituation in Pfeilern der Arkaden, Forschungsbericht Nr. F 82/005-04 der MFPA Weimar	06.12.04
Hopp, H.:	Untersuchungen zu den Konservierungsmöglichkeiten der Lettenkohlendsteine und Recherche nach geeignetem Ersatzmaterial	27.07.05
Zier, H.-W. :	Entwicklung und Erprobung von Mörtelrezepturen, Teil I Forschungsbericht Nr. F 82/005-05 der MFPA Weimar	21.11.05
Berbig, T.:	Arbeitsbericht der FH Erfurt zum Anlegen zweier Probeflächen an den Arkaden des Schlosses Friedenstein in Gotha	Sept. 05
Hopp, H.:	Ausführungsplanung für die Erstellung einer Musterfläche im Bereich der südlichen Arkaden	17.03.06
Zier, H.-W. :	Entwicklung und Erprobung von Mörtelrezepturen, Teil II Forschungsbericht Nr. F 17/005-06 der MFPA Weimar	23.10.06
Morgenweck, U.:	Dokumentation der Maßnahmen an der Musterachse im Bereich der südlichen Arkaden	10.07.07
Zier, H.-W. :	Nachuntersuchungen an Probeflächen im Bereich der südlichen Arkaden des Schlosses Friedenstein in Gotha Untersuchungsbericht Nr. B 17.08.004.01 der MFPA Weimar	17.03.08

Die wichtigsten Erkenntnisse der Zwischenberichte werden im vorliegendem Abschlussbericht zusammengefasst.

### 3. Materialsituation und konstruktiver Aufbau

#### 3.1. Werksteine

An den Arkaden wurden im Wesentlichen zwei verschiedene Sandsteinvarietäten verbaut. Zum einen ein Sandstein aus der geologischen Formation des Oberen Keupers (Rätsandstein) und zum anderen ein Sandstein aus der Formation des Unteren Keupers (Lettenkohlendstein), der Inhalt des DBU-Projektes ist.

Die Rätsandsteine stammen aus den Steinbrüchen am „Großen Seeberg“ zwischen Gotha und Wechmar und wurden seit dem Mittelalter bis heute abgebaut.

Die in Gotha verbauten Lettenkohlendsteine stammen aus mehreren Steinbrüchen zwischen Gotha und Sundhausen. Diese Sandsteine wurden bis zum Ende des 19. Jahrhunderts abgebaut.

##### 3.1.1. Rätsandsteine

Bei den Rätsandsteinen handelt es sich um hellgelbe, feinkörnige, vorwiegend kieselig gebundene Sandsteine von ausgezeichneter Qualität. Ihre Festigkeitswerte liegen zwischen 80 und 100 N/mm<sup>2</sup> und verringern sich bei Durchfeuchtung nicht wesentlich.

Schäden infolge Bewitterung treten eher selten auf, manchmal gibt es Absandungen in Schichten, die weniger stark verfestigt sind. An regenbelasteten Oberflächen kommt es gelegentlich zu Korrosion in Form von Kavernenbildungen.



**Bild 3-1:**  
**Musterplatte des an den**  
**Arkaden verbauten**  
**Rätsandsteins**

### 3.1.2. Lettenkohlendsteine

Petrographie:

Bei den Lettenkohlendsteinen der Arkaden handelt es sich um rotbraune, feinkörnige, feldspatführende Sandsteine mit vielen Gesteinsbruchstücken und hohem Glimmeranteil. Das Strukturbild ist relativ homogen. Eher selten finden sich kohlige oder tonige Einschlüsse.

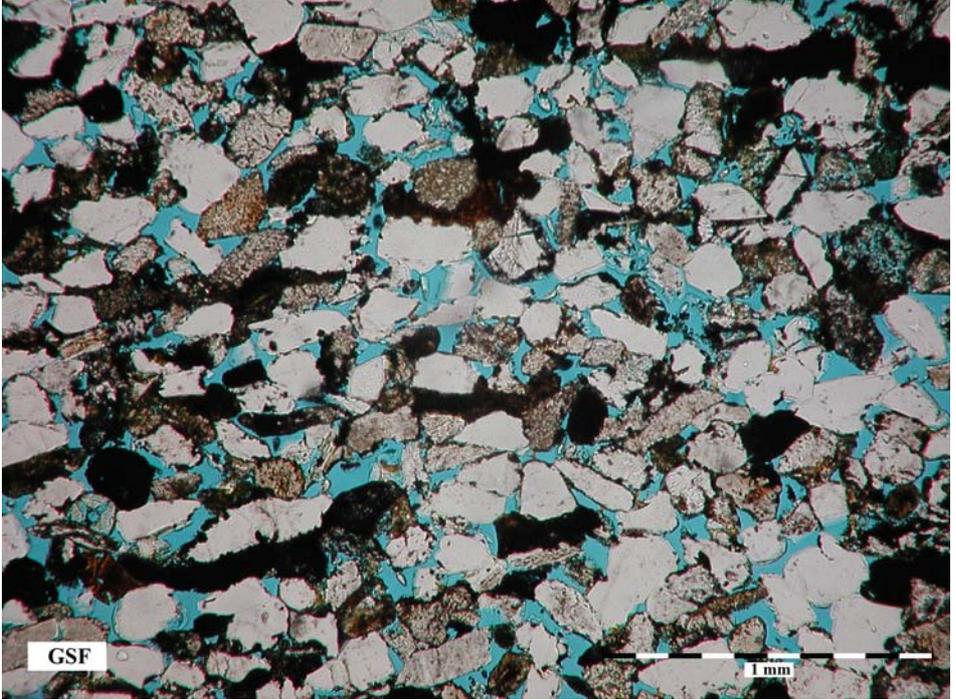
Die Bindung erfolgt über tonig-ferritische Substanzen, teilweise gibt es sekundäre SiO<sub>2</sub>-Anwachssäume. Direkte Kornkontakte sind jedoch eher selten.

In Tabelle 3-1 erfolgt eine makroskopische Beschreibung des an den Arkaden verbauten Lettenkohlendsteins. Anschließend wird eine Dünnschliffbeispiel des Steins vorgestellt (Tabelle 3-29).

**Tabelle 3-1: Makroskopische Beschreibung des an den Arkaden verbauten Lettenkohlendsteins**

<b>Geologische Kurzbeschreibung</b>	Tonig-ferritisch gebundener, rotbrauner, feinkörniger Sandstein
<b>Klassifikation</b>	Feldspatführender Sandstein mit vielen Gesteinsbruchstücken (Sublitharenit)
<b>Abbildung (in natürlicher Größe)</b>          <b>gesägt, senkrecht zur Schichtung</b>   <b>Oberfläche geschliffen</b>	
<b>Gesamtfarbe</b>	rotbraun
<b>Detailfarben</b>	rostbraune Fleckenbildungen
<b>Struktur</b>	feinsandig, feinporig homogen
<b>Textur</b>	sehr gering angedeutet

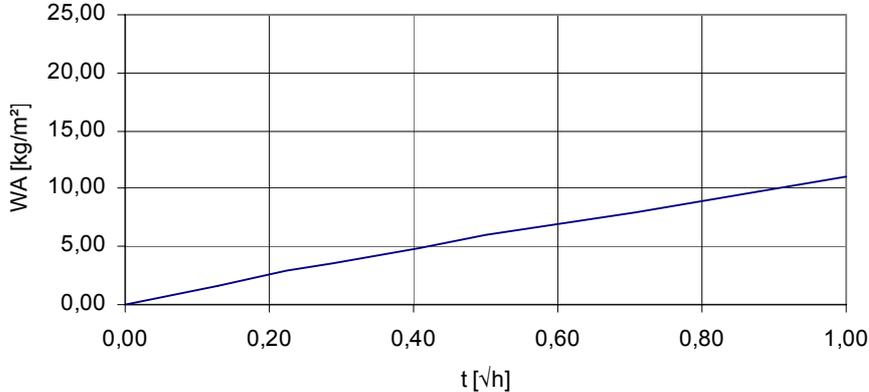
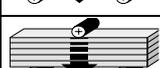
Tabelle 3-2: Mikroskopisches Beispiel für den an den Arkaden verbauten Lettenkohlendstein

<p><b>Abbildung</b></p>	
<p><b>Komponenten</b></p>	<p>Quarz, Feldspäte, Gesteinsbruchstücke</p> <p><b>Glimmer:</b> selten lange Muskovite (um 0.5, max. 1 mm) wenige stark alterierte Biotite (stark ferritisch durchsetzt, noch fasrige Struktur)</p> <p><b>Sonstiges:</b> Opake Körner oft rundlich (mehrfach im Bild), z.T. schichtweise gehäuft: 0,12x0,25 bis 0,15x0,80 mm</p>
<p><b>Bindemittel</b></p>	<p>Braune tonig-ferritische Substanz in unförmigen Aggregaten (im Bild rechts oben und links unten), Anteil ca. 7%, z.T. ferritische Hüllen und Klasten, Sekundäre SiO<sub>2</sub>-Anlagerungen relativ häufig</p>
<p><b>Diagenese (Kornbindung)</b></p>	<p>Überwiegend geringe Kornbindung durch häufige, aber isolierte ferritische Substanzen, geringe direkte Quarzkornbindung über 20% der Korngrenzlinie, ca. 10% der Klasten mit dünnen braunen, ferritischen Hüllen über 40-80% der Korngrenzlinie, (im Bild unter der Mitte und rechts oben), Streifenweise dichtere Packung durch kleinere Körner zwischen größeren und ferritische Substanz</p>
<p><b>Sichtbarer Porenraum</b></p>	<p>Mittlere Porosität 0,04-0,10 mm, oft unregelmäßige Formen, dann größer dimensioniert</p>
<p><b>Struktur</b></p>	<p><b>Korngrößen:</b> 0,10-0,25 (-0,35 mm)</p> <p><b>Kornformen:</b> meist isometrisch, auch kurzprismatisch und länglich oval, kleinere Körner oft splittig</p>
<p><b>Textur (Schichtung)</b></p>	<p>Sehr gering angedeutet durch Glimmer und längliche ferritische Substanzen</p>

**Gesteintechnische Kennwerte:**

Die an den Arkaden verbauten Lettenkohlendsteine besitzen eine relativ hohe Porosität und Wasseraufnahme. Die Festigkeiten sind gering und reduzieren sich bei Feuchtigkeitsbelastung um bis zu 50 %. Tabelle 3-3 gibt einen Überblick über die technischen Kennwerte des Steins.

**Tabelle 3-3: Technische Kennwerte des an den Arkaden verbauten Lettenkohlendsteins**

<b>Dichte und Porosität</b>			
Reindichte	[g/cm <sup>3</sup> ]		2,67
Rohdichte	[g/cm <sup>3</sup> ]		1,98
Dichtigkeitsgrad	[-]		0,74
Gesamtporosität	[V-%]		25,84
Offene Porosität (Hg- porosimetrie)	[V-%]		23,48
<b>Hygrische Kennwerte</b>			
Wasseraufnahme bei Normaldruck	[M.-%]		10,42
Wasseraufnahme bei 150 bar	[M.-%]		12,59
Sättigungsbeiwert	[-]		0,83
Wasseraufnahmekoeffizient	[kg/m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> ]		9,82
Kapillare Wasseraufnahme der Probe GSF			
			
<b>Festigkeitskennwerte</b>			
Druckfestigkeit, trocken	[N/mm <sup>2</sup> ]		34,6
Druckfestigkeit, wassergesättigt	[N/mm <sup>2</sup> ]		16,4
Biegezugfestigkeit, trocken	[N/mm <sup>2</sup> ]		2,5
Biegezugfestigkeit, wassergesättigt	[N/mm <sup>2</sup> ]		0,9

### 3.1.3. Einbausituation und Bearbeitung der Werksteine

An den Schlossarkaden des Ost-, Süd- und Nordflügels wurden sämtliche wasserführenden oder wasserbelasteten Bauteile wie Pfeilergesimse, Sockel und Schlusssteine der Bögen aus dem witterungsbeständigen Rätsandstein errichtet (Bild 3-2). Die Werksteine der Pfeiler und Bögen bestehen aus Lettenkohlendsteinen. In diesen Bereichen gibt es aber auch zahlreiche Einzelsteine aus Seeberger Sandstein, bei denen es sich um spätere Ausbesserungen handelt.



**Bild 3-2:**

#### **Pfeiler der Schlossarkaden**

**Das Zwischen- und Sockelgesims besteht aus Rätsandstein, Pfeiler- und Bogenwerksteine aus Lettenkohlendsteinen**

Die Werksteine an den Pfeilern wurden alle regelrecht, senkrecht zur Gesteinsschichtung verbaut. An den Bögen verläuft die Schichtung in Längsrichtung der Steine.

An den Pfeilern und Bögen springt jeder 2. Stein bossenartig vor. An den Bossen erfolgte die Bearbeitung der Oberflächen durch das Spitzeisen, während an den rückspringenden Steinen die Oberfläche glatt geflächt bzw. an den Gesimsen und Sockeln scharriert ist.

### 3.2. Aufbau der Pfeiler

Die Pfeiler der Arkaden sind in den Abmessungen sehr einheitlich aufgebaut. Es sind nur sehr geringe Toleranzen vorhanden. Ursprünglich waren die Oberflächen gut bearbeitet.



**Bild 3-3:**

Nach Westen exponierte Seite eines Pfeilers aus Lettenkohlendstein: Starke Steinschäden treten über dem Sockel auf. Der gezeigte Pfeiler war der am besten erhaltene mit weitestgehend noch vorhandenem Originalsteinbestand.



**Bild 3-4:**

Nach Süden exponierte Seite des Pfeilers aus Lettenkohlendstein: Steinabbrüche und nachträgliche Fugenausbesserungen sind erkennbar. Insgesamt deuten sich Verschiebungen in verschiedenen Ebenen an.

Die stark variierenden Fugenbreiten mit unterschiedlichem Material als Abstandshalter, die Verwendung sehr unterschiedlicher Quaderlängen sowie der Einsatz von Ziegelplatten (vermutlich Dachsteinstücke) zum Ausgleich der Quaderlängen, lassen eine bauzeitliche Farbfassung der Pfeiler vermuten. An verschiedensten Stellen finden sich Hinweise (Anstrichreste) auf eine Fassung der Oberflächen.

Die Fugen sind sehr unterschiedlich ausgebildet. Teilweise sind sie sehr schmal (wenige mm) und teilweise erreichen sie Breiten bis etwa 3 cm. In den breiten Fugen sind mehrere Lagen Schieferplatten oder plattige Kalksteinstücke als Abstandshalter eingelegt. Mit diesen plattigen Materialien wurden die Sandsteinquader vermutlich nach einer vorangegangenen Justierung fixiert. Die verbleibenden Zwischenräume wurden mit Bindemittel (Sumpfkalk) vergossen. Im Vergussmörtel waren nahezu keine Gesteinskörnungen (Zuschläge) enthalten.



**Bild 3-5:** In der Fuge sind Schieferstücke als Abstandshalter eingelegt. Der Mörtel ist sehr fein und enthält kaum Gesteinskörnungen. (Durchmesser gelber Punkt 19 mm)



**Bild 3-6:** Die Fuge ist sehr schmal (etwa 0,5 cm). Auch in der Vertikalfuge sind Abstandshalter aus Schiefer eingelegt.



**Bild 3-7:** Fugenüberarbeitung mit einem sehr dunklen, dichten, hydraulisch gebundenen Mörtel. (Durchmesser gelber Punkt 19 mm)



**Bild 3-8:** Fugenüberarbeitung mit einem hellen Mörtel. Der Mörtel ist farblich über eine Retusche auf Steinfarbigkeit abgestimmt.



**Bild 3-9:** Fugenreparatur mit einem rostbraunem Mörtel



**Bild 3-10:** Ausbesserung einer Fuge mit Gipsmörtel

Die äußeren Teile der Pfeiler bestehen aus kastenförmig aufgemauerten Sandsteinquadern. In den Eckbereichen sind nur geringe Überlappungen vorhanden und häufig auch nur eine geringe Verzahnung der äußeren Steinschichten.

Im Inneren der Pfeiler sind größere Steine (Kalksteine, Rätsandsteine, braune Sandsteine) verbaut und Zwischenräume mit einem sehr groben Mörtel aufgefüllt. Außerdem sind in den Zwischenräumen viele Zwickel (häufig Kalkstein) vorhanden. Der Verbau der Steine im Pfeilerinneren erfolgte ohne Berücksichtigung der Steinschichtung. Als Bindemittel dominiert Kalk. Partiiell sind Gipsmörtel (scheinbar auch zur Bauzeit) nachweisbar (vgl. Tabelle 3-4) .

Ausbesserungen an den Oberflächen sind mit verschiedensten Mörteln (Romazement, Gipsmörtel, portlandzementhaltige Mörtel) und Steinmaterialien (Rätsandsteine, Elbsandsteine) ausgeführt worden.

**Tabelle 3-4: Materialien in Bohrkernen aus den Pfeilern**

<b>Bohrung / Pfeiler Höhe über OKG</b>	<b>Tiefenbereich in cm</b>	<b>Material</b>	<b>Anmerkungen</b>
GOFK1 / Nordostecke	bis 36	Rätsandstein	
1,20 m	36 bis 37	Mörtel	feinkörniger Mörtel
	37 bis 82	Verfüllmörtel	sehr grober (betonartiger) Mörtel mit gröberem Kalksteinstücken
GOFK2 / Südwestecke	bis 28	Rätsandstein	
1,00 m	28 bis 28,5	Mörtel / Fuge	feinkörniger Mörtel und feiner Spalt
	28,5 bis 33	Verfüllmörtel	grober (betonartiger) Mörtel mit gröberem Kalksteinstücken
	33 bis 44	Verfüllmörtel	sehr grober (betonartiger) Mörtel mit gröberem Kalksteinstücken
	44 bis 70	Kalkstein	
GOFK3 / Westseite	bis 32	brauner Sandstein	
1,14 m	32 bis 84	Rätsandstein	mit der Schichtung senkrecht verbaut
	84 bis 89	Mörtel	
	89 bis 114	brauner Sandstein	
GOFK4 / Südseite	bis 33	brauner Sandstein	
1,00 m	33 bis 38	Verfüllmörtel	sehr grober (betonartiger) Mörtel mit gröberem Kalksteinstücken
	38 bis 64	Kalkstein	
	64 bis 85	Verfüllmörtel	sehr grober (betonartiger) Mörtel mit gröberem Kalksteinstücken
	85 bis ca. 114	brauner Sandstein	
GOFK4 / Ostseite	bis 30	brauner Sandstein	
1,13 m	30 bis 32	Mörtel	
	32 bis 72	Kalkstein	

## 4. Schäden und Schadensursachen

### 4.1 Schäden an den Werksteinen

#### 4.1.1. Überblick

Die Schadbilder an den Arkadenbögen und Pfeilern werden maßgeblich von den verwendeten Sandsteinen geprägt. So überwiegen bei den Lettenkohlsandsteinen ganz klar Schäden durch Ablätterungen (Schuppen), Absandungen und Abschalungen. Diese Schadensformen haben ein solches Ausmaß erreicht, dass umfangreiche Fehlstellen entstanden sind. Es sind kaum noch originale Oberflächen erhalten (Bild 4-1).



**Bild 4-1: Pfeiler, an dem deutlich wird, dass es an den Lettenkohlsandsteinen kaum noch originale Oberflächen gibt (zum Vergleich Seeberger Sandstein unten rechts).**

Häufungen von Schäden treten im Bereich der Fallrohre, über den Sockeln und über den Gesimsen auf. Damit deutet sich als eine Schadensursache die Einwirkung von Feuchtigkeit an.

Direkt neben den Sockeln enden die Fallrohre der Dachentwässerung, und das den Hof umlaufende Rinnensystem scheint undicht zu sein. Damit kann Wasser über das Mauerwerk in den Sandstein gelangen oder in Form von Spritzwasser auf die Oberflächen.

Die Oberseiten der Gesimse sind nahezu waagrecht ausgebildet und Schäden treten vor allem an den darauf aufgesetzten Quadern, die zur Hofseite exponiert sind oder sich in den Ansatzstellen der Steinbögen befinden, auf.

Die Oberflächenschäden an den Sandsteinen sind teilweise überarbeitet. Oft erfolgten Ausbesserungen mit vorgesetzten Platten nach dem Zurückarbeiten geschädigter Steine. Dabei wurden andere Sandsteine als die ursprünglich verbauten verwendet. Der Versatz erfolgte mit sehr festen Mörteln.

Auch die Fugen wurden mehrfach überarbeitet. Häufig sind auch dafür sehr feste Mörtel verwendet worden. Neben den Ausbesserungsstellen (Fugen und auch neue Sandsteine) treten oft neue Schäden auf. Diese sind vermutlich durch große Eigenschaftsunterschiede zwischen den Alt- und Neumaterialien bedingt.

Auf ausgebesserten Fugen sind oft Farbretuschen aufgetragen oder die Mörtel sind eingefärbt. Damit sollte vermutlich eine Anpassung an die Steinfarbigkeit erfolgen. Diese Maßnahmen können an Reparaturen, die etwa ab der Mitte des 19. Jahrhunderts erfolgten, nachgewiesen werden.

#### **4.1.2. Abschalungen**

Schalenbildungen an den Lettenkohlsandsteinen treten fast immer oberhalb dichter Steinmaterialien (Sockel und Gesimse) auf. Die Abschalungen bilden sich unabhängig vom Gesteinsgefüge (Schichtung), parallel zur bearbeiteten Werksteinoberfläche. Gelegentlich sind Abschalungen mit Aufwölbungen zu verzeichnen, was sich in Rissen entlang der Schalenufer äußert.



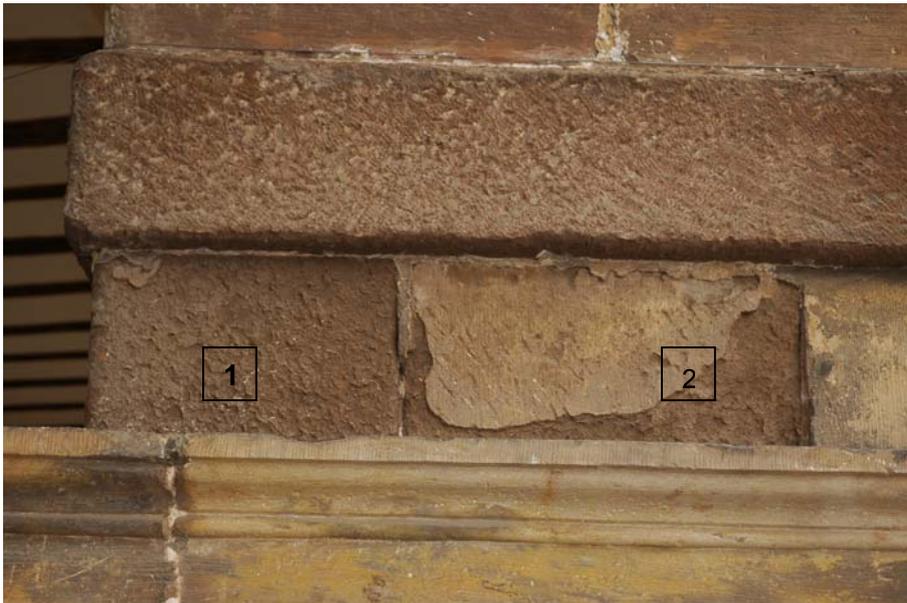
**Bild 4-2: Typische Schalenbildungen am Lettenkohlsandstein**  
Der Sockel besteht aus dichterem Räsandstein und bewirkt einen Feuchtigkeitsstau im stark saugenden Lettenkohlsandstein, wenn dieser durchfeuchtet wird.

#### **4.1.3. Ablätterungen**

Aufgrund seines tonigen Bindemittels neigt der Lettenkohlsandstein zu einer ausgeprägten Ausbildung von Ablätterungen. Diese werden durch Gipseinlagerungen in den oberflächennahen Bereichen, auf den stärker bewitterten Oberflächen, noch zusätzlich beeinflusst. Die Ablätterungen verlaufen fast immer oberflächenparallel.

Ablätterungen liegen meist mehrfach übereinander vor bzw. sind untereinander ablösend. An den Räsandsteinen sind sie gelegentlich auch zu verzeichnen, hier jedoch nicht schuppen- oder keilförmig, sondern in kleinen parallelen Flächen.

Die Ablätterungen an den Lettenkohlsandsteinen der Arkaden haben ein solches Ausmaß angenommen, dass tiefgreifende Rückwitterungen, Formverluste und Fehlstellen eingetreten sind.



**Bild 4-3: Ablätterungen (1) und Schalenbildungen (2) am Lettenkohlsandstein**

#### **4.1.4. Absandungen**

Der Zerfall des Gesteines in Einzelkörner durch den Verlust der Bindungskräfte, ist im Bereich des Lettenkohlsandsteines auf fast allen stark bewitterten Oberflächen, besonders in den Bereichen der Wasserablaufzonen der zum Innenhof hin geöffneten Seiten, zu beobachten. Häufig treten Absandungen und Ablätterungen an den Lettenkohlsandsteinen gleichzeitig und in nicht mehr zu definierenden Übergangsformen auf. An den Rätsandsteinen sind Absandungen eher selten zu beobachten.



**Bild 4-4: Absandungen an einem Bossenquader aus Lettenkohlsandstein**

#### 4.1.5. Weitere Schadbilder

Neben den für den Lettenkohlsandstein typischen Schadbildern: Absandung, Ablätterung und Schalenbildung gibt es eine Reihe weiterer Schäden an den Arkadenwerksteinen, die jedoch untergeordnet auftreten.

##### Korrosion:

Korrosion tritt immer an direkt bewitterten und beregneten Oberflächen auf. Sie ist das Ergebnis von Lösungsvorgängen. Diese Verwitterungsform ist beim Gothaer Lettenkohlsandstein kaum anzutreffen. Bei den Rätsandsteinen kommt sie an den beregneten Sockelprofilen vor.

##### Dunkle dünn-schichtige Filme und Krusten:

Dunkle dünn-schichtige Filme sind als Verschwärzungen bis zu schwarzen Auflagerungen auf der Oberfläche erkennbar. Allerdings beschränken sich diese Bereiche meist nur auf die Oberflächen des Seeberger Sandstein und weniger auf die Oberflächen des Lettenkohlsandsteines. Sie sind zu finden in den Wasserablaufzonen der Gesimse und den weniger durchfeuchteten Bereichen des Lettenkohlsandsteines. In Wasserablaufzonen auf Oberflächen des Lettenkohlsandsteines ist die Konsolidierung einer Filmes nicht möglich, da die Natursteinoberfläche zu schnell verwittert.

Krusten sind hauptsächlich in den stärker durchfeuchteten Bereichen der Wasserablaufzonen der Unterseiten der überhängenden Bereiche der Gesimse am Rätsandstein zu beobachten. Sie liegen hier als massive, schwarze Krusten auf den Oberflächen auf.

An den Lettenkohlsandsteinen sind Krusten kaum vorzufinden, da hier durch die vorherrschenden Ablätterungen und Absandungen diese Schadform nicht bestehen kann.

##### Anstrichreste:

Auf den Oberflächen der Werksteine finden sich umfangreiche Reste von Farbfassungen (Bild 4-5). Diese dienten zum Einen dem Schutz der Steine und zum Anderen zur einheitlichen Gestaltung der Arkadenbögen. Aufgrund der Befundsituation kann davon ausgegangen werden, dass die Steine ursprünglich ocker gefasst waren. Spätere Fassungen nahmen den rotbraunen Farbton des Lettenkohlsandsteins auf. Gegenwärtig sind die Arkadenbögen nicht farbig gefasst.



**Bild 4-5:**  
**Anstrichreste auf den**  
**Lettenkohlsandsteinen**

#### Mörtelergänzungen:

Der Anteil an Mörtelergänzungen ist bei den Lettenkohlsandsteinen überdurchschnittlich hoch (Bild 4-6). Sie sind Folge der Schäden durch Abschaltungen und Abblätterungen und wurden meist mit hydraulisch gebundenen Mörteln (Kalke, Zemente) vorgenommen. Wegen der unangepassten Materialeigenschaften kam es in den angrenzenden Sandsteinen zu Absandungen oder Hohlstellen (zwischen Mörtel und darunter liegendem Stein).



**Bild 4-6:**  
**Mörtelergänzungen, breite Fugen und Abblätterungen**

#### Ausbrüche / Fehlstellen:

Ausbrüche und Fehlstellen an den Sandsteinen haben meist mechanische Einwirkungen von Außen als Ursache. An den Lettenkohlsandsteinen sind sie häufig auch Folge von Gefügeschwächung durch Schalenbildung und Abblätterungen.

#### Risse:

Risse zeigen sich sehr ausgeprägt in den aus Lettenkohlsandstein aufgebauten Bereichen der Pfeiler. Die Ursachen hierfür sind vermutlich im Pfeileraufbau zu finden. Der scheinbar nicht ausreichend tragfähige Kern der Pfeiler überlässt den Lastabtrag der Arkadenbögen in den Fundamentaufbau der äußeren, aus Lettenkohlsandstein aufgemauerten, Schale. Die Folge ist eine Überlastung und die Ausbildung von Spannungsrissen.

Weiterhin treten Risse in Verbindung mit Abschaltungen auf. Sie bilden sich in den sich ablösenden Randbereichen lockerer Schalen.

Ein Teil der Risse in den Werksteinen ist auch auf Eisenteile zurückzuführen, die bei Rosten durch Volumenvergrößerung Spannungen erzeugen.

#### 4.2. Schäden im Inneren der Pfeiler

In den untersuchten Pfeilern war immer ein massiv aufgebauter Kern aus verschiedenen Materialien (Ratsandstein, Lettenkohlendstein, Kalkstein, Ziegel) vorhanden. Durch Setzungen, die in der Vergangenheit aufgetreten sind oder immer noch auftreten, werden Ablösungen von Steinschalen (an einigen Pfeilern deuten Rissbildungen und der Versatz von Steinen diese Prozesse an) begünstigt. Auch Ablösungen der äußeren Quaderschichten vom Kern der Pfeiler sind möglich. Über sich öffnende Fugen kann außerdem Wasser eindringen und Schädigungsprozesse beschleunigen.



**Bilder 4-7 und 4-8:**

**Versatz äußerer Quader, erkennbar in Bereichen des Sockels und des Gesimses: Entstandene Risse oder Fugenaufweitungen sind bereits in der Vergangenheit überarbeitet worden.**

An einigen Pfeilern gibt es Verschiebungen oder Neigungen einzelner Werksteine. Besonders stark geschädigt sind die Pfeiler der Südarkaden, die, wie sich während der Bearbeitung herausgestellt hat, nur ungenügend gegründet sind.



**Bild 4-9:**

**Offene Fugen und Verschiebung von Werksteinen an einem Pfeiler**

Ausbesserungen an den Rissen zeigen, dass sie bereits seit längerer Zeit ein Problem darstellen. Eine Ursache für die Risse können Unregelmäßigkeiten im Pfeileraufbau sein oder aber auch Änderungen der Materialeigenschaften bei Feuchteeinwirkungen.

Um dies zu klären wurden Bohrkern aus den Pfeilern entnommen. Die Bohrkernabschnitte aus Sandstein sind über den Querschnitt mittels Ultraschall untersucht worden. Dabei erfolgte die erste Messung im trockenen Zustand und eine zweite im feuchtegesättigten Zustand (nach drei Tagen Lagerung unter Wasser) senkrecht zur Bohrkernachse im Einbauzustand.

Die Ultraschalllaufzeiten korrelieren mit dem dynamischen E-Modul. Die in den nachfolgenden Abbildungen dargestellten Ergebnisse sollen die Unterschiede zwischen den Gesteinsarten und die Auswirkungen von starken Feuchteeinwirkungen verdeutlichen.

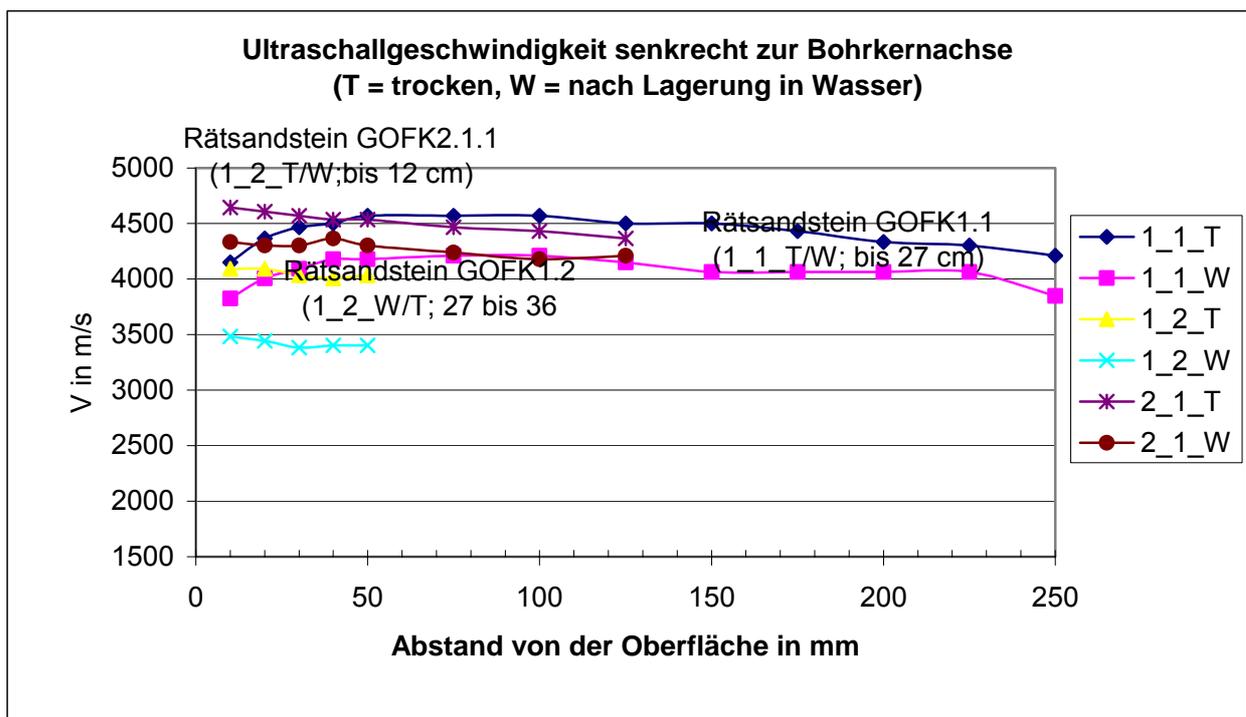


Abb. 4-1: Ultraschalllaufzeiten in Bohrkernen aus Sandstein (Proben GOFK1.1, 1.2 u. 2.1)

In den beiden Bohrkernabschnitten von der Stelle GOFK1 ist bis zu 5 cm Tiefe eine Zunahme der Ultraschalllaufzeiten festzustellen. Der erreichte Wert bleibt etwa bis 10 cm auf gleichem Niveau, und dann setzt eine Verringerung der Werte bis zu 36 cm Tiefe ein. Bei Feuchtesättigung des Steinmaterials ergeben sich die gleichen Trends. Die Werte sind zwischen 8 und 16 % geringer als bei den trockenen Proben.

An der Stelle GOFK2 (siehe auch nachfolgende Abbildung) werden in Nähe der Oberfläche die höchsten Werte erreicht. Über die Tiefe ist eine gleichmäßige Verringerung der Werte festzustellen. Nach Feuchtesättigung verringern sich die Werte um bis zu 6 %.

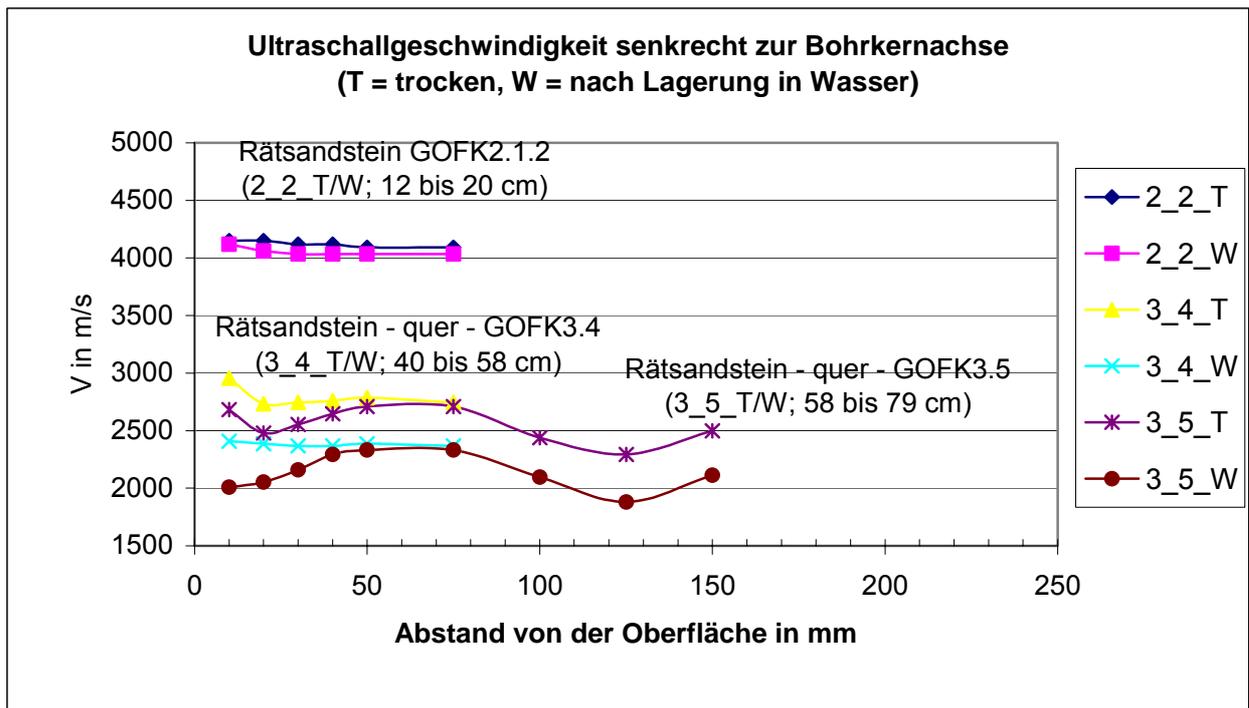


Abb. 4-2: Ultraschalllaufzeiten in Bohrkernen aus Sandstein (Proben GOFK2.1, 3.4 u. 3.5)

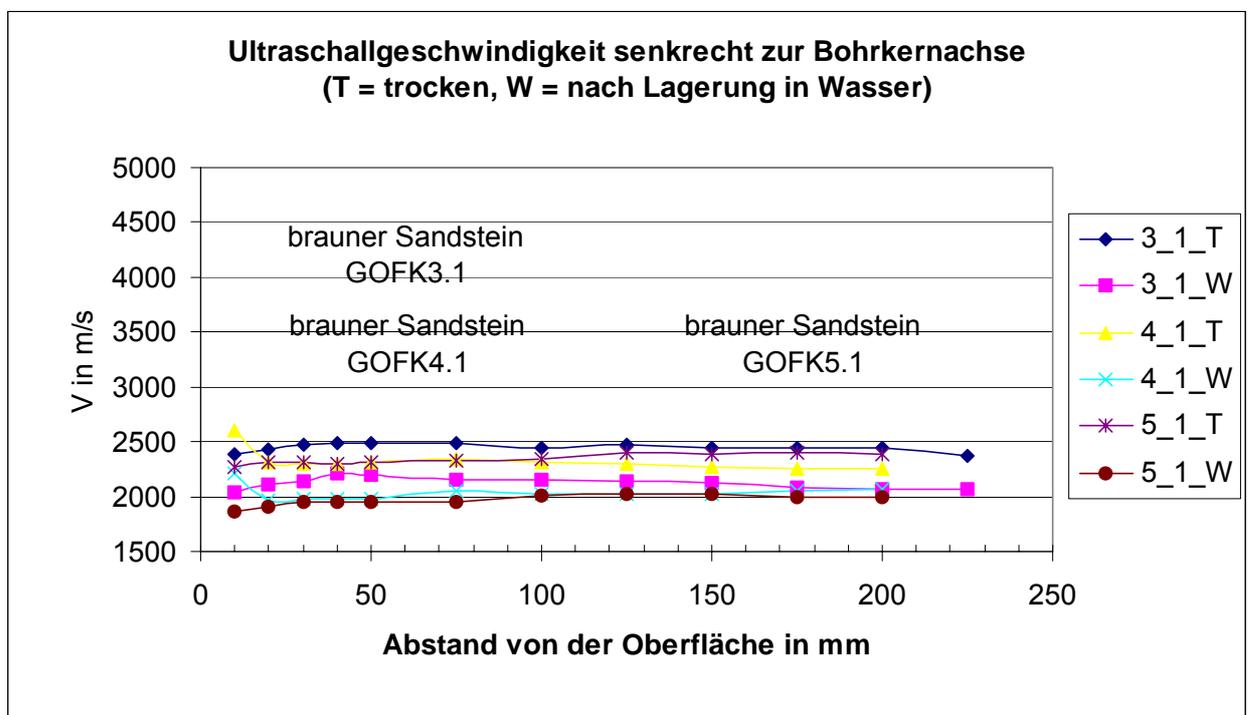


Abb. 4-3: Ultraschalllaufzeiten in Bohrkernen aus Sandstein (Proben GOFK3.1, 4.1 u. 5.1)

An der Stelle GOFK3 war der Räsandstein im Inneren (3.4 und 3.5) des Pfeilers quer zur Schichtung eingebaut. Durch die Veränderung der Einbaulage verringern sich die Ultraschalllaufzeiten deutlich. Im Vergleich zur Probe GOFK2.2 sind die Werte 25 bis 40 % geringer.

Bei Feuchtesättigung verringern sich die Werte im Vergleich zu den trocknen Proben um 12 bis 18 %. Der wellenförmige Verlauf der Kurven ist vermutlich durch Inhomogenitäten im Steinmaterial bedingt.

Die Ultraschalllaufzeiten in den hier untersuchten braunen Lettenkohlsandsteinen sind deutlich geringer als in den Rätsandsteinen. Im Rätsandstein werden senkrecht zur Einbaulage (Schichtung in Einbaulage) Laufzeiten von 4000 bis etwa 4600 m/s im trocknen Stein erreicht. Die Laufzeiten in den Lettenkohlsandsteinen betragen unter den gleichen Bedingungen 2200 bis 2600 m/s. In den Lettenkohlsandsteinen verringert sich die Laufzeit nach Feuchtesättigung der Steine um 10 bis 20 % im Vergleich zu den trocknen Steinen.

### 4.3. Feuchtebelastung in den Pfeilern

Für die Bewertung von Salz- und Feuchtebelastungen in Steinen und Mörteln sind aus mehreren Pfeilern repräsentativer Expositionen Proben entnommen worden. Die Materialentnahmen erfolgten als Bohrkern und (häufiger) als Bohrmehl.

Bei den Untersuchungen konnten in den Kernbereichen der Pfeiler immer höhere Materialfeuchten nachgewiesen werden als in den äußeren Mauerschalen. Vermutlich wird das Wasser im Bereich der Mörtelauffüllungen im Inneren der Pfeiler besser kapillar transportiert als im Sandstein.

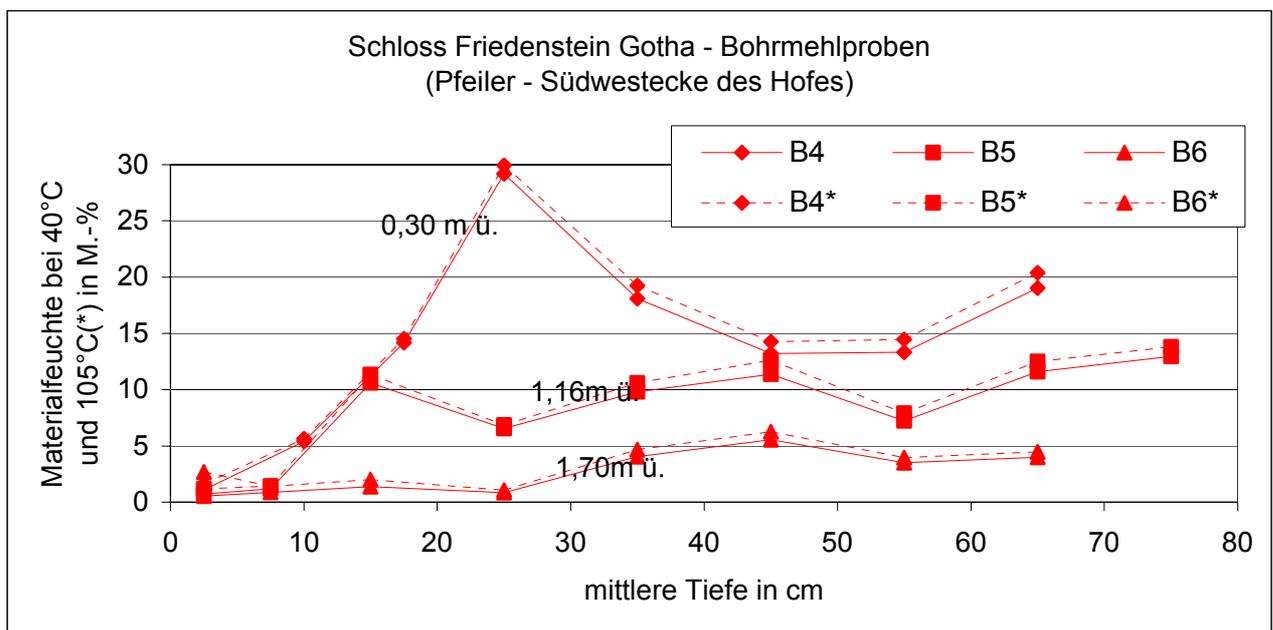


Abb. 4-4: Materialfeuchte (Trocknung bei 40°C; \* Trocknung bei 105°C) in Bohrmehlproben aus Fugenbereichen eines Pfeilers der Südwestecke des Hofes

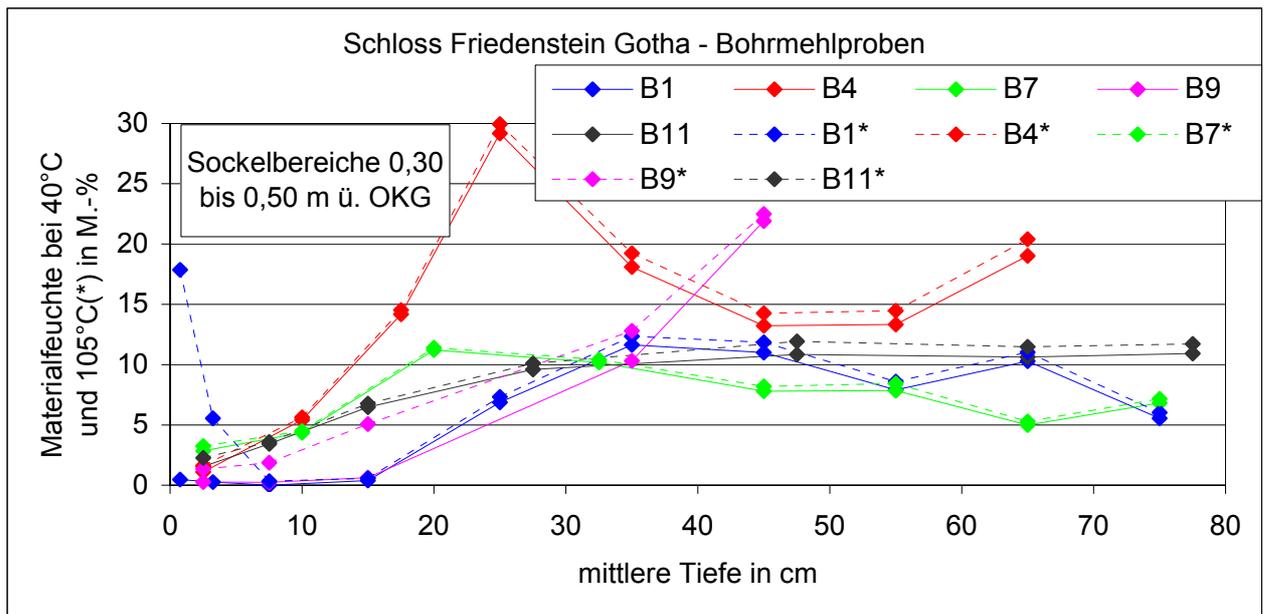


Abb. 4-5: Materialfeuchte (Trocknung bei 40°C; \* Trocknung bei 105°C) in Bohrmehlproben aus Mörtelfugen in Sockelbereichen von 5 verschiedenen Pfeilern

Die Feuchtebelastung ist in den unteren Bereichen der Pfeiler sehr hoch und nimmt mit der Pfeilerhöhe ab. Erhöhte Feuchtegehalte waren in den hier untersuchten Pfeilern bis in eine Höhe von etwa 1,70 m nachweisbar.

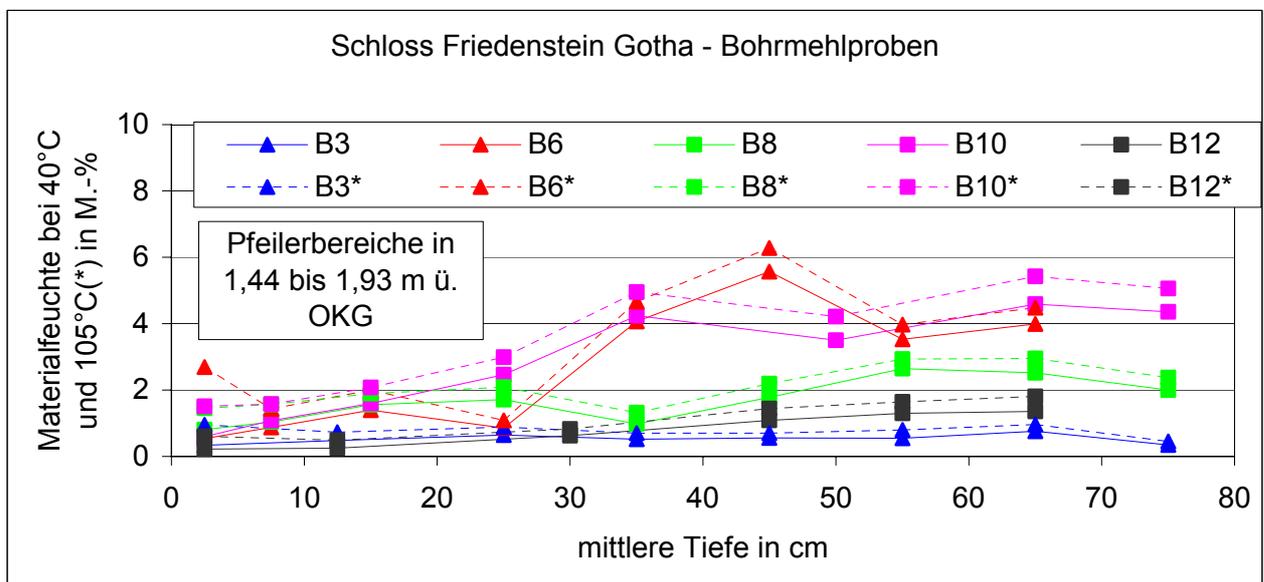


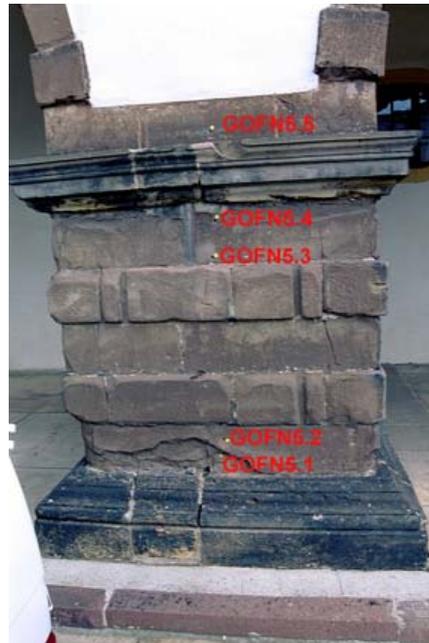
Abb. 4-6: Materialfeuchte (Trocknung bei 40°C; \* Trocknung bei 105°C) in Bohrmehlproben aus Mörtelfugen in oberen Pfeilerbereichen von 5 verschiedenen Pfeilern

Feuchteinträge sind möglich über die umlaufende offene Rinne, die frei auslaufenden Fallrohre der Dachentwässerung und durch Niederschläge über die waagerechten Flächen der Gesimse. Am Anbau im Bereich der Nordostecke kommen Undichtigkeiten im Dachbereich hinzu.

Die offene Rinne ist nicht dicht und durchfeuchtet den Boden in Nähe der Arkaden. Über die Fallrohre kommt punktuell zusätzlich ein erhöhter Wassereintrag hinzu.

Die Feuchtebelastung verursacht Umlagerungen von wasserlöslichen Salzen, bewirkt Veränderungen von mechanischen Eigenschaften der Materialien, kann Setzungen im Untergrund auslösen und begünstigt das Auftreten von Schädigungen durch Frost.

Nach den Untersuchungen an Bohrmehlproben aus Fugenbereichen sind ergänzende Untersuchungen an Bohrmehlproben aus Sandsteinen durchgeführt worden.



Bilder 4-10 und 4-11:  
Zwei Pfeiler mit der  
Kennzeichnung von  
Probenahmestellen

(Die nachfolgend mit  
dargestellten  
Probenahmestellen „...6“  
befinden sich auf der  
Rückseite der Pfeiler in  
einer Höhe zwischen 1,10  
und 1,20 m.)

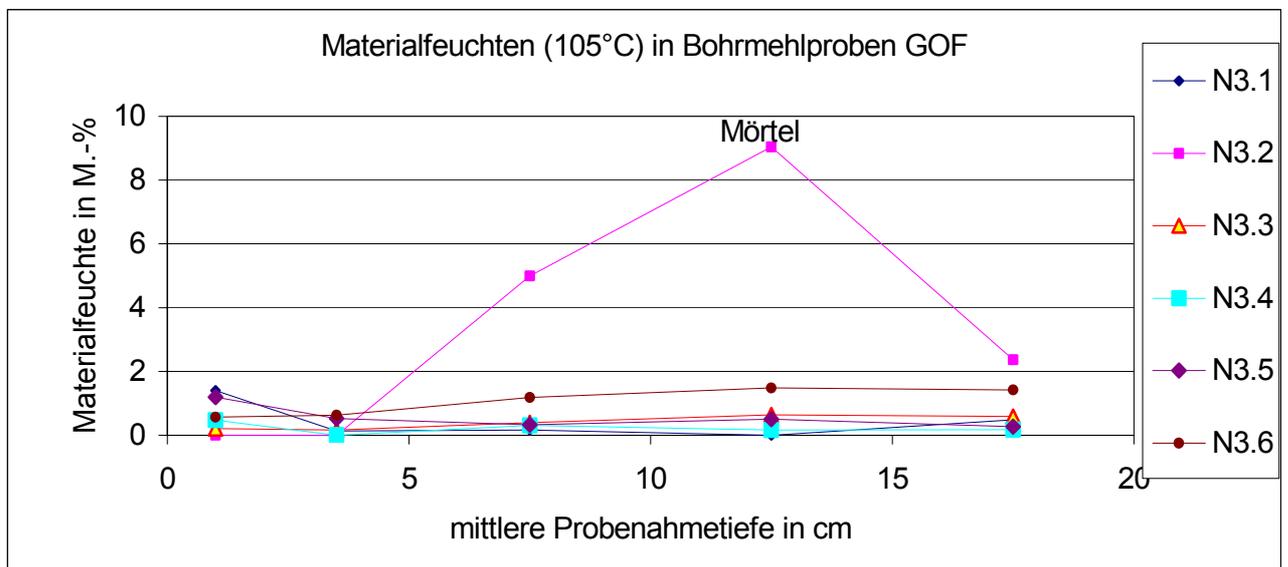


Abb. 4-7: Materialfeuchten in Bohrmehlproben aus Sandsteinen der Probeachse GOFN3

Ein scheinbar extremer Anstieg der Materialfeuchten an der Stelle N3.2 ist durch das Vorhandensein eines mineralischen Mörtels, der für den Versatz einer Vierungsplatte verwendet wurde bedingt. Es fällt weiter auf, dass im unteren Pfeilerbereich (N3.1) und über dem Gesims (N3.5) die Materialfeuchten in den oberflächennah entnommenen Proben ansteigen. Auch hierin sind Indizien für Spritzwassereinflüsse und Einflüsse der unzureichenden Wasserabführung durch eine offene Regenrinne zu sehen.

#### 4.4. Belastung der Steinoberflächen mit Gips und wasserlöslichen Salzen

Als Maß für die Größenordnung von Belastungssituationen mit wasserlöslichen Salzen in den Proben kann die elektrische Leitfähigkeit im Eluat verwendet werden. Die elektrische Leitfähigkeit korreliert mit der Summe der Ladungsträger in der Lösung.

Gesättigte Gipslösungen, die bei Vorhandensein von Gipsmörteln entstehen, besitzen beispielsweise elektrische Leitfähigkeiten (bei 25°C) von etwa 2,2 bis 2,3 mS/cm. Somit könnte ein Wert dieser Größenordnung als Indiz für hohe Gipsgehalte im Ausgangsmaterial gewertet werden.

Vergleichbar hohe elektrische Leitfähigkeiten entstehen aber auch in Eluaten aus Mörteln mit hohen pH-Werten im Eluat. Deshalb müssen bei der Gesamtbewertung die pH-Werte in den Eluaten ebenfalls berücksichtigt werden.

In der nachfolgenden Abbildung sind die pH-Werte in Eluaten aus Teilproben von drei Pfeilern zusammengestellt.

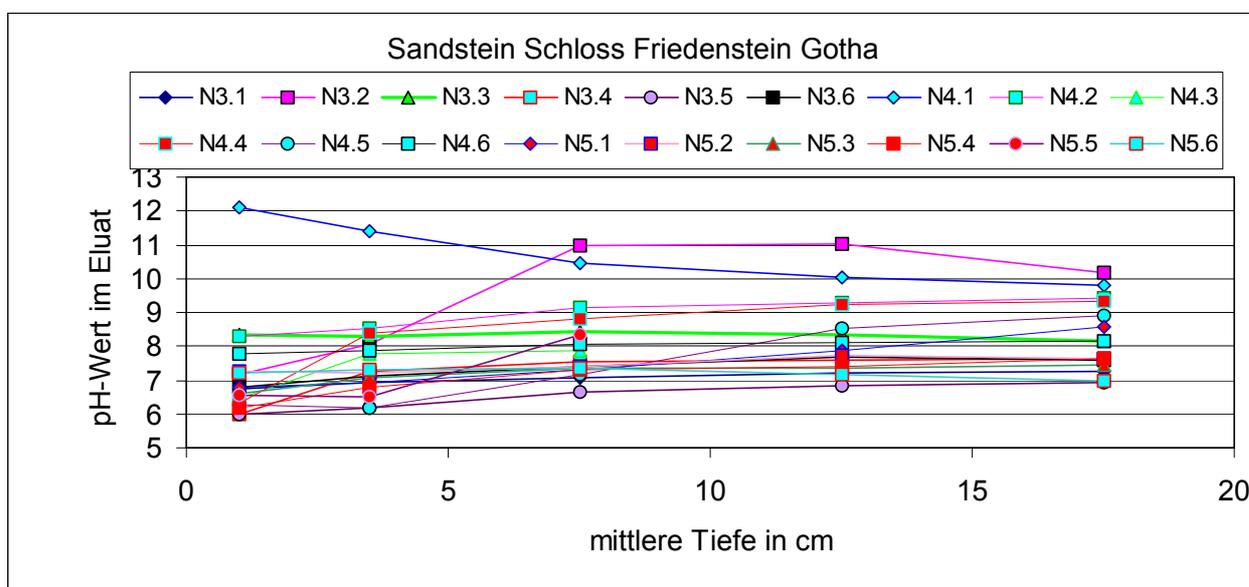


Abb. 4-8: pH-Werte in Eluaten aus Bohrmehlproben von allen Probenahmestellen aus Sandsteinen

In den Bereichen der Probenahmestellen N4.1 und N3.2 werden pH-Werte in den Eluaten von > 11 erreicht. Hier sind Vierungen mit zementhaltigen Mörteln eingesetzt worden. an allen anderen Probenahmestellen bewegen sich die die pH-Werte in den Eluaten zwischen etwa 6 und 9,5. Somit können für diese Proben die elektrischen Leitfähigkeiten als Maß für die Gesamtbelastungen verwendet werden.

Nachfolgend sind exemplarisch Untersuchungsergebnisse für einen Pfeiler zusammengestellt. An beiden anderen Pfeilern sind vergleichbare Ergebnisse für die Belastungssituation mit Salzen erhalten worden.

Ebenfalls vergleichbare Ergebnisse wurden bei der Untersuchung an Mörteln aus Fugenbereichen von 5 verschiedenen Pfeilern erhalten.

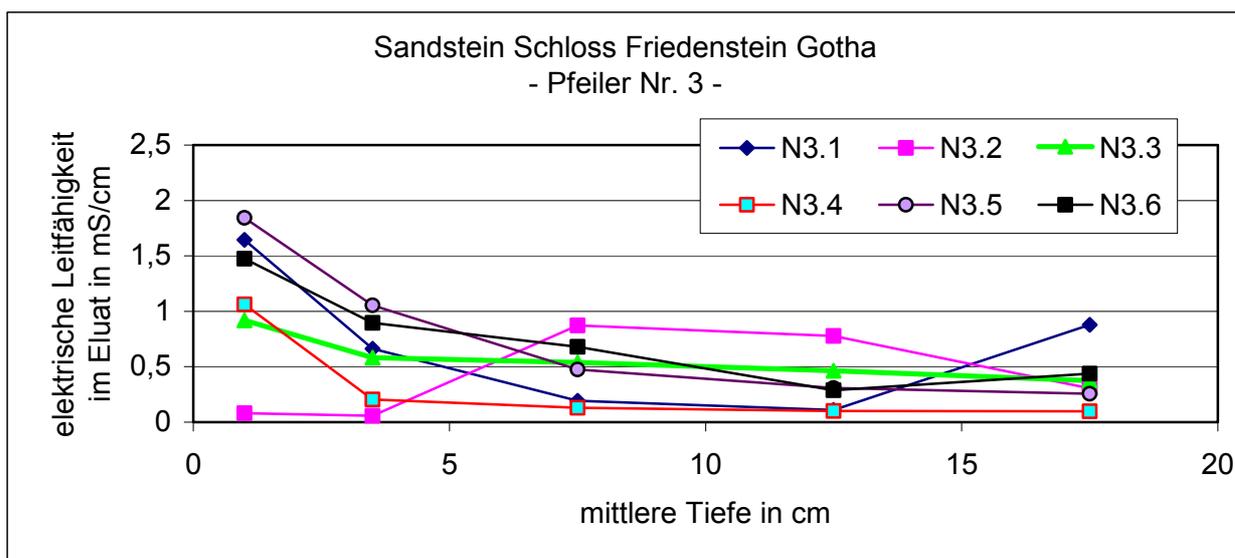


Abb. 4-9: Elektrische Leitfähigkeiten in Eluaten aus Sandsteinproben der Probeachse GOFN3

Außer an der Stelle N3.2 (neue Vierung) ist immer ein Anstieg der elektrischen Leitfähigkeiten in den Eluaten in Richtung Wandoberflächen nachzuweisen.

In einer Auswahl von Teilproben der in Abb. 4-9 dargestellten Probenahmestelle sind wasserlösliche An- und Kationen bestimmt worden.

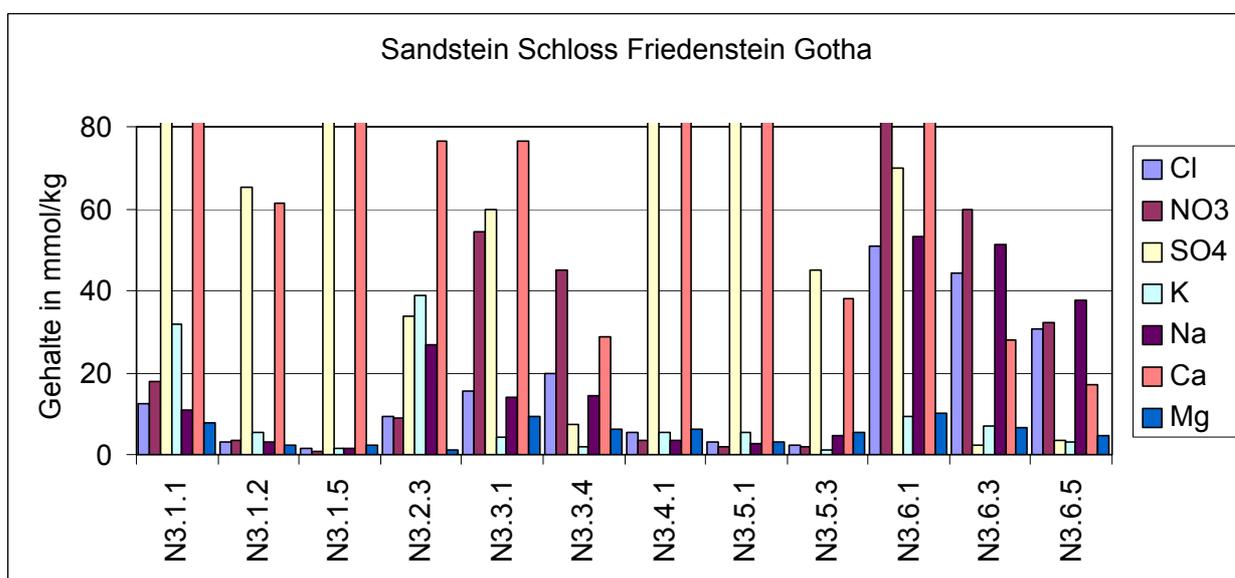


Abb. 4-10: Wasserlösliche An- und Kationen in Sandsteinproben der Probeachse GOFN3

Oberflächennah (N3.1.1, N3.3.1, N3.4.1, N3.5.1, N3.6.1) werden die wasserlöslichen Salze durch Gips dominiert. Etwa in mittlerer Pfeilerhöhe zum Hof (N3.3) und zum Arkadengang (N3.6) sind hohe Nitratbelastungen vorhanden. An der Probenahmestelle zum Arkadengang hin (N3.6) kommen zusätzlich noch hohe Gehalte an Chloriden hinzu.

Als Quelle für Gips konnten gipshaltige Mörtel, die an den Außenflächen für Ausbesserungen von Fugen und auch von Fehlstellen am Stein sowie im Inneren der Pfeiler als Mörtel zum Versetzen von Quadern verwendet wurden, festgestellt werden. Auch in den Verfüllmörteln waren partiell Gipsanteile nicht auszuschließen.

Eine weitere Quelle für Gips stellt die Umwelt dar. In allen Oberflächenbereichen von Sandsteinen sind erhöhte Gipsgehalte nachweisbar. Gips kann direkt mit Niederschlägen abgelagert worden sein oder ist durch Reaktion von  $\text{SO}_3$  mit Calciumverbindungen aus den Mörteln und Steinen entstanden.

Neben Gips konnten verschiedene Nitrate und Chloride als wasserlösliche Salze nachgewiesen werden. Als Quellen sind Fäkalien (Pferde auf dem Hof) und Streusalze anzunehmen. Prinzipiell deutet sich eine Zunahme der Gehalte in Richtung Pfeileroberflächen und mit der Höhe der Pfeiler an. Die zum Arkadengang gerichteten Pfeilerseiten sind höher belastet als die zur Hofseite exponierten Oberflächen.

Die Salze werden in den Verdunstungsbereichen von Wasser an den Pfeileroberflächen und im Mauerwerk angereichert.

#### **4.7. Schlussfolgerungen für die Sanierung**

Voraussetzung für alle Sanierungsmaßnahmen ist die Reduzierung des Feuchteintrags im Umfeld der Pfeiler. Die offene Ablaufrinne auf dem Schlosshof sollte abgedichtet und die Fallrohre der Dachentwässerung eingebunden werden. Damit ließe sich zumindest der erhöhte Feuchteintrag nach Niederschlagsereignissen reduzieren.

Mit der Verringerung des Feuchteintrags würde eine langsame Austrocknung einsetzen. In der Folge ist mit Salzanreicherungen in den Verdunstungsbereichen zu rechnen.

Die vorhandenen Salzbelastungen können den Einsatz von Konservierungsmitteln (z. B. Steinfestigern) beeinträchtigen. Deshalb wäre die Ausführung von Entsalzungsmaßnahmen vor dem Einsatz der Konservierungsmittel vorteilhaft.

Die vorhandenen Ver fugungen mit sehr festen Mörteln müssen durch weniger feste Mörtel ersetzt werden. Bei der Auswahl der Mörtel ist die Belastungssituation zu berücksichtigen. Nicht verwendet werden dürfen Mörtel die Trass, natürlich hydraulische Kalke oder Dolomitmalk enthalten. Zemente in den Mörteln müssen hochsulfatbeständig sein. Die Eigenschaften der Mörtel müssen auf die Eigenschaften der vorhandenen Sandsteine abgestimmt werden.

Am Rand der sehr engen Fugen (nur wenige mm breit) kann es zu Spannungen an den Steinflanken kommen. Eine geringfügige Aufweitung der Fugen in den oberflächen nahen Bereichen (bis etwa 3 cm Tiefe), die Entfernung von Abstandshaltern in Oberflächennähe und die Ausfüllung der Fuge mit einem weichen Mörtel könnte die Bruchanfälligkeit dieser Steinbereiche (Ecken der Steinquader, Steinkanten) reduzieren. Bei diesen Maßnahmen müssten unbedingt denkmalpflegerische Aspekte berücksichtigt werden.

Da in allen Fugenbereichen mit Salzbelastungen zu rechnen ist, sollten die neuen Verfugmörtel porosiert sein. So können im Bedarfsfall größere Salz mengen in den Mörtel eingelagert werden.

Die gleichen Randbedingungen wie bei den Verfugmörteln gelten auch für Mörtel zur Steiner gänzung und Versatzmörtel zum Anbringen von Verblendungen oder Vierungen aus Sandstein.

Zum Verblenden und für Vierungen sollten Sandsteine, deren Eigenschaften mit denen der vorhandenen Steine weitestgehend übereinstimmen, verwendet werden.

Bei den Untersuchungen waren Hinweise auf ehemals vorhandene Anstriche gefunden worden. Der überwiegend verbaute braune Sandstein ist bei freier Bewitterung nicht sehr beständig. Auch nach einer Sanierung der Pfeileroberflächen wäre bald wieder mit Schäden zu rechnen. Durch eine geeignete Beschichtung könnte die Witterungsbeständigkeit verbessert werden. Die Beschichtung müsste aber auch auf die Belastungssituation (Feuchtigkeit, Salze, Gips) der Untergründe abgestimmt werden.

## **5. Entwicklung von Technologien und Materialien zur Restaurierung**

Unter Berücksichtigung der nachgewiesenen Belastungssituationen (Feuchte, Gips, Salze) mussten Mörtel für Neuverfugungen und Steinerergänzungen entwickelt und erprobt werden. Ebenfalls bestand ein Bedarf an einer Schlämme, die einen Witterungsschutz der Lettenkohlendsteine bewirken sollte. Weiterhin mussten Steinfestigungsmittel gefunden werden, die auf den Lettenkeupersandstein abgestimmt sind.

### **5.1. Entwicklung eines Mörtels für Formergänzungen**

Mörtel für Formergänzungen an geschädigten Oberflächen des Lettenkohlendsteins müssen auf die Steineigenschaften und auch auf die Belastungssituationen abgestimmt werden.

Die Kennwerte der Steinerergänzungen sollten weitestgehend auf die des Sandsteins abgestimmt werden. Kriterien dafür sind zum Beispiel von Snethlage [4] beschrieben worden.

Darüber hinaus waren weitere Kriterien, wie das Ausarbeiten der Ergänzungsmörtel in dünnen Schichten, der weitestgehende Verzicht auf ein zusätzliches Zurückerarbeiten von Oberflächenbereichen und das Ausarbeiten von Anschlusskanten sowie die Antragung auf salzbelasteten Untergründen zu berücksichtigen.

Seit über 20 Jahren werden in Thüringen Mörtel für die Steinerergänzung auf der Basis von Acrylatdispersionen als Bindemittel eingesetzt. Mineralische Bindemittel (Kalke oder Zemente) sind in diesen Mörteln nicht enthalten. Angaben zur Entwicklung dieses Systems sind beispielsweise von Seifert, F. und Zier, H.-W. [5] zusammengestellt worden.

Ergänzungsmörtel auf dieser Basis für Rätssandsteine des Seebergs bei Gotha sind seit 1995 am Palas der Wartburg im Einsatz. Bisher (nach etwa 10 Jahren Standzeit im Außenbereich bei Westexposition) konnten eine gute Verträglichkeit mit den Untergründen und auch eine gute Haltbarkeit festgestellt werden. Die dort gesammelten Erfahrungen können für Mörtelergänzungen an den Sockeln und Gesimsen der Peiler (hier ist ebenfalls Rätssandstein vom Seeberg verbaut worden) genutzt werden.

Ergänzungsmörtel für Lettenkohlendstein sind bisher nicht entwickelt und erprobt worden. Trotzdem können Erfahrungen von anderen Objekten übertragen werden.

In der zweiten Hälfte der neunziger Jahre des letzten Jahrhunderts wurden Ergänzungsmörtel für Schilfsandsteine nach den zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Erfahrungen rezeptiert und am Herren- sowie Frauenerker der Heldburg eingesetzt. Kennwertbestimmungen konnten damals nur sehr eingeschränkt durchgeführt werden. Mit dem eingesetzten Material liegen bisher ebenfalls gute Erfahrungen vor. Da der dort vorhandene Schilfsandstein vom Erscheinungsbild dem Lettenkohlendstein nahe kommt, wurden die damals entwickelten Grundrezepturen für erste Erprobungen im Labormaßstab verwendet. Erkenntnisse, die in den letzten Jahren neu gewonnen wurden, fließen ebenfalls in die Mörtelanpassung mit ein.

Durch die erforderliche sehr dunkle Einfärbung war ein hoher Pigmentzusatz notwendig. Dieser erforderte umfangreiche Vortests zur Abstimmung der Feinststoffgehalte in der Rezeptur. Die Feinststoffe bestimmen in entscheidendem Maße vor allem die hygrischen Eigenschaften der Mörtel.

Für die Erprobung an einer Musterfläche (ausgeführt vom Fachbereich Restaurierung, FH Erfurt) am Objekt wurde die in der nachfolgenden Tabelle angeführte Rezeptur ausgewählt.

**Tabelle 5-1: Rezeptur für Steinerfüllmörtel „Lettenkohlendstein Gotha“**

Bestandteil (Hersteller)	Anteile im Frischmörtel in Masseteilen	Anteile bezogen auf 1 kg Trockenmörtel in g
W12 (Quarzwerke Frechen)	12,1	135,2
F36 (Quarzwerke Frechen)	74,4	831,3
Kaolin (Dorfner Gruppe)	2,6	29,05
Pigment Granufin „Moor“ (Rockwood Pigments Brockhues GmbH & Co. KG*)	0,3	3,35
Pigment Granufin „Mais“ (*)	0,1	1,12
30 %ige Dispersion D340 (Wesutex GmbH)	10,9	121,8

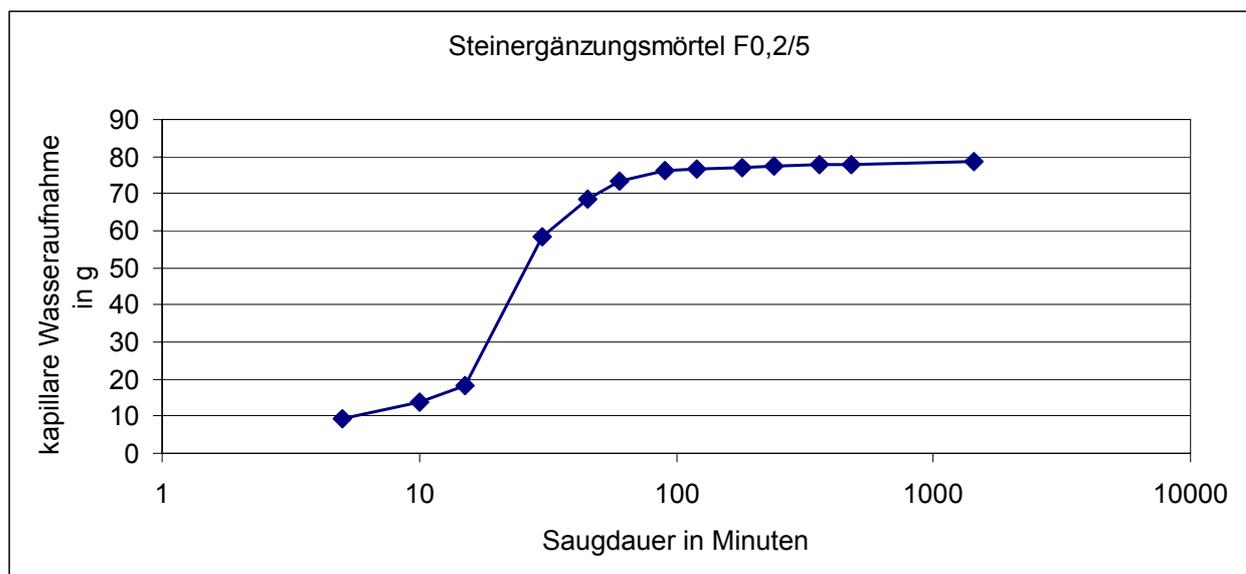
Da die Steinfärbigkeit in gewissen Grenzen variiert, wurde die Färbung des Ergänzungsmörtels heller eingestellt als die des Lettenkohlendsteins. Auf diese Weise können über Retuschen Farbanpassungen an das Material im Bestand besser ausgeführt werden.

Zur Kontrolle der Güte der Anpassung sind einige Kennwertbestimmungen vorgenommen worden.

Aus Mörtel mit der in Tabelle 5-1 angegebenen Rezeptur sind Versuchsplatten in einer Dicke von etwa 20 mm auf einer saugfähigen Unterlage (Filterpappe) hergestellt worden. 28 Tage nach der Herstellung sind Bohrkernscheiben (etwa 100 mm im Durchmesser) und Würfel (2 cm Kantenlänge) aus diesen Platten herausgeschnitten worden.

An den Würfeln sind als Mittelwerte Dichten von 1,23 kg/dm<sup>3</sup> und Druckfestigkeiten von 4,17 N/mm<sup>2</sup> bestimmt worden.

Ergänzend zu den Druckfestigkeiten wurden auch relevante hygrische Kennwerte bestimmt



**Abb. 5-1: Kapillare Wasseraufnahme vom Steinerfüllmörtel „F0,2/5-GF“**

Nach einer Saugdauer von 60 Minuten waren auf der Probenoberfläche die ersten feuchten Flecken erkennbar. Nach 90 Minuten war die gesamte Oberfläche nass.

Im Zeitbereich zwischen 15 und 60 Minuten (in diesem Bereich trat weitgehend ungestörtes kapillares Saugen auf) kann ein Wasseraufnahmekoeffizient von  $7,6 \text{ kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$  berechnet werden. Damit wird eine Größenordnung wie beim Lettenkohlendstein ( $6,3 \text{ kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$ ) erreicht.

Ebenfalls bestimmt wurde die Wasserdampfdurchlässigkeit im Trockenbereichsverfahren (23 – 0/50) nach DIN 52615 an Bohrkernscheiben (Durchmesser 104 mm, Dicke 20,9 mm) Es wurden eine Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  von 9,1 und eine wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke  $s_d$  von 0,19 m bestimmt.



**Bild 5-1:**

**Mörtelergänzungen als Probeachse (angelegt durch den Fachbereich Restaurierung der FH Erfurt) an einem Pfeiler auf der Ostseite des Schlosshofs:**

Das Bild zeigt die Situation der Antragung vor dem Überarbeiten (vorsichtiges Abschleifen der Ergänzungsmörtel auf das Niveau der angrenzenden Steinoberflächen).

Die farbliche Anpassung kann später über Retuschen erfolgen. Falls später eine gesamte farbliche Überfassung der Arkaden erfolgen sollte, kann auch auf eine Retusche verzichtet werden.

In den Sockeln und den Gesimsen sind Rätssandsteine vom Seeberg bei Gotha verbaut. Für Ergänzungen an diesem Material stehen Mörtelrezepturen bereits handelsüblich zur Verfügung, und es erfolgte somit keine gesonderte Erprobung.

Nach den bisherigen Untersuchungen ist die farbliche Anpassung und die Abstimmung relevanter Kennwerte des Steinerfüllungsmörtels als ausreichend einzustufen (vgl. Tabelle 5-2).

**Tabelle 5-2: Kennwertvergleich zwischen Ergänzungsmörtel und Sandstein**

	<b>Lettenkohlen- sandstein Gotha</b>	<b>Steinergänzungs- mörtel „F0,2/5-GF“</b>	<b>Anforderung nach Sneathlage [4]</b>	<b>Bewertung</b>
Druckfestigkeit	27,0 N/mm <sup>2</sup>	4,17 N/mm <sup>2</sup>	bis 60 %	etwa 15 %
Wasseraufnahme- koeffizient	6,3 kg/m <sup>2</sup> √h	7,6 kg/m <sup>2</sup> √h	50 – 100%	etwa 120 %
Wasserdampf- diffusionswider- standszahl (μ)	26 bis 30	9	50 – 100%	etwa 30 %

Die Druckfestigkeit des Steinergänzungsmörtels entspricht den Anforderungen. Die Festigkeiten sind deutlich geringer als die des Steinmaterials.

Die kapillare Wasseraufnahme des Steinergänzungsmörtels ist höher als die des Sandsteins. Aus den ermittelten Werten allein können aber einige charakteristische Merkmale des Sandsteins nicht abgeleitet werden. So saugt der Stein bei Benetzung zunächst sehr stark Wasser auf. Mit der Wasseraufnahme quellen im Stein die enthaltenen Tonminerale und es verringert sich die aufgenommene Wassermenge mit der Zeit. Bei der Anpassung des Steinergänzungsmörtels ist vor allem die anfängliche Wasseraufnahme berücksichtigt worden. Somit kann die Anpassung als gut bewertet werden.

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl der Steinergänzung ist deutlich geringer als die des Sandsteins. Auch hier kann die Anpassung als gut bewertet werden. Wasser, das in das Material eindringt, kann über Diffusion schnell abgegeben werden

Durch die weitere farbliche Anpassung der Oberflächen der Steinergänzungsmörtel mittels Lasuren kommt es zu einer Verringerung der Werte für die kapillaren Wasseraufnahmen und zu einer Erhöhung der Werte für die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen. Somit ist, unter Berücksichtigung der späteren Beschichtung, von einer guten Kennwertabstimmung auszugehen.

## **5.2. Schlämme für die Oberflächenbeschichtung**

Für die Überarbeitung der Sandsteinoberflächen an den Arkaden ergibt sich neben der Ergänzung von Fehlstellen mit Mörteln oder auch mit Vierungen als weitere Variante die Sicherung des Istzustandes durch Festigung geschädigter Steinoberflächen und die anschließende Verbesserung der Witterungsbeständigkeit durch den Auftrag einer Schlämme.

Die Belastungssituation in den Untergründen erlaubt nicht den Einsatz von Schlämmen auf reiner Kalkbasis. Durch die Nitratbelastungen würden sehr schnell Schäden entstehen. Zementschlämmen würden zu hohe Festigkeiten erreichen und die Oberflächen zu stark abdichten.

Schlämmen auf der Basis von Weißkalkhydrat und hochsulfatbeständigem Zement wären stofflich mit modifizierenden Zusätzen auch möglich. In den zuletzt genannten Systemen würden weiße und graue Bindemittel einen hohen Feinstoffanteil ausmachen und zum Erreichen einer dunkelbraunen Färbung wäre ein sehr hoher Pigmentzusatz erforderlich. Durch die hellen und grauen Bindemittelbestandteile wäre bei späterer Anwitterung eine Vergrauung der Oberflächen zu erwarten.

Aus den genannten Gründen wurde auch für die Schlämmen als Bindemittel eine Acrylatdispersion ausgewählt. In Laborversuchen sind die Rezepturparameter und die Färbung abgestimmt worden. Die nachfolgende Tabelle enthält Angaben zur Grundrezeptur.

**Tabelle 5-3: Rezeptur für Schlämme „Lettenkohlendstein Gotha“**

<b>Bestandteil</b>	<b>Anteile im Frischmörtel in Masseteilen</b>	<b>Anteile auf 1 kg Trockenmörtel in g</b>
SF300 (Quarzwerke Frechen)	20,0	<b>196,1</b>
W12 (Quarzwerke Frechen)	20,0	<b>196,1</b>
F36 (Quarzwerke Frechen)	57,1	<b>559,8</b>
Kaolin (Dorfner Gruppe)	2,9	<b>28,4</b>
Pigment Granufin Moor (Rockwood Pigments Brockhues GmbH & Co. KG*)	1,5	14,7
Pigment Granufin Mais (*)	0,5	4,9
30 %ige Dispersion D340 (Wesutex)	22,0	220

Zunächst erfolgten die Anpassung der Verarbeitungseigenschaften der Schlämme und die Abstimmung an die Oberflächentruktur der angewitterten Steinoberflächen.

Die beiden nachfolgenden Bilder zeigen eine Probefläche mit einer Rezeptur, die den geringeren Pigmentgehalt aufweist. Im Vergleich zur Steinfläche, die nur konservatorisch (Festigung, Schalenanklebung) behandelt wurde, erscheint die mit der Schlämme überarbeitete Fläche geschlossener. Gleichzeitig kann aber immer noch die durch Abwitterung entstandene Struktur der Steinoberfläche nachempfunden werden.



**Bilder 5-2 und 5-3: Probefläche an einem Pfeiler auf der Südseite des Schlosshofs**

Zur Anpassung der Färbung wurde der Pigmentanteil in der Schlämme stufenweise erhöht, bis eine auseichende Anpassung an die Steinfarbigkeit gegeben war.

Mechanische Kennwerte können an der Schlämme unter den Anwendungsbedingungen nicht bestimmt werden. Deshalb wurden zunächst die Auswirkungen auf das Diffusionsverhalten ermittelt. Dabei ist neben der Dispersion D340 (Fa. WESUTEX) auch die Dispersion D343 (Fa. WESUTEX) in gleichen Gehalten und gleichen Feststoffanteilen (30 %) für die Schlämmenherstellung verwendet worden. Die Dispersion D343 besitzt u.a. eine höhere Reißdehnung (500 %) im Vergleich zur Dispersion D340 (300%).

**Tabelle 5-4: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen ( $\mu$ ) unbeschichteter und beschichteter Lettenkohlendsteine aus Gotha**

Zustand der Oberfläche	$\mu$
unbehandelter Stein mit sägeglatte Oberfläche	26 bis 30
mit Schlämme (D340) beschichteter Stein – glatte Oberfläche der Schlämme	40, 42
mit Schlämme (D340) beschichteter Stein – raue Oberfläche der Schlämme	40
mit Schlämme (D343) beschichteter Stein – glatte Oberfläche der Schlämme	45, 48
mit Schlämme (D343) beschichteter Stein – raue Oberfläche der Schlämme	47

Ein Vergleich der Werte zeigt, dass durch die Schlämme eine Erhöhung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes verursacht wird. Es ist ebenfalls davon auszugehen, dass sich die kapillare Wasseraufnahme des Verbundsystems verringert. Ein Einfluss der Oberflächenstrukturierung (rau = mit Pinsel grob aufgetupft oder glatt = mit einem feinen Pinsel aufgestrichen) ist nicht nachweisbar.

### 5.3. Mörtel für die Auffüllung von tiefen Fugen und die Verfugung

Im ursprünglichen Baubestand an den Arkaden sind als Verfugmörtel und Mauermörtel im Oberflächenbereich der Fuge Kalkmörtel vorhanden. Diese Mörtel sind teilweise nahezu frei von Gesteinskörnungen (Zuschlägen) oder enthalten an anderer Stelle hohe Anteile teils sehr grober Gesteinskörnungen. Damit ergibt sich eine sehr breite Spanne in der Zusammensetzung und Struktur.

Daneben sind Gipsmörtel und auch zementreiche Mörtel anzutreffen. Die Gipsmörtel sind möglicherweise partiell bereits zur Bauzeit eingesetzt worden. Sie fanden aber auch zum Versatz von älteren Vierungen oder bei Versatz ganzer Ersatzsteine Verwendung.

Verschiedene zementhaltige Mörtel sind vermutlich ab der Mitte des neunzehnten Jahrhunderts für Ausbesserungen an Fugen, zum Versatz von Vierungen und Ersatzsteinen und zur Ergänzung von zurückgewitterten Steinoberflächen verwendet worden.

Besonders an den Kontaktstellen zwischen der Lettenkohlendsteinen und den zementhaltigen Mörteln sind teils erhebliche Schäden durch nicht aufeinander abgestimmte Eigenschaften entstanden. Die Schäden wurden zudem durch Salz- und Feuchtebelastungen verstärkt.

Im Bestand variieren die Fugenbreiten von etwa 2 mm bis über 2 cm. In den breiten Fugen ist fast immer plattiges Zwickelmaterial (Schiefer, Kalkstein, Ziegel) vorhanden.

Ziel der Entwicklung war die Abstimmung eines Mörtels zum Auffüllen von tiefen und breiten Fugen sowie eines weiteren Mörtels für die Verfugung von schmalen als auch breiten Fugen.

Die mechanischen Eigenschaften sollten sich an den im Bestand vorhandenen Kalkmörteln orientieren. Als Puffer für einwandernde Salze war aber gleichzeitig ein hoher Porenraum erforderlich.

Durch den Eintrag von Luftporen in die Mörtel verringern sich die Beträge für die mechanischen Kennwerte. Wird bei Kalkmörteln (Bindemittel Weißkalkhydrat ohne hydraulische Anteile) von einer Druckfestigkeit von etwa 1,5 N/mm<sup>2</sup> ausgegangen, so verringert sich diese beim Eintrag hoher Luftporenanteile erheblich. Eine ausreichende Stabilität für die Anwendung an den Arkaden ist nicht mehr gegeben. Außerdem wäre bei der Anwendung von reinen Kalkmörteln mit Erhärtungsstörungen durch Nitrate zu rechnen. Natürlichhydraulische Kalke und auch Trasskalke besitzen ein stark von Vor- und Nachbehandlungen abhängiges Erhärtungsverhalten. Außerdem wäre mit Einflüssen aus der Sulfatbelastung (Gips) zu rechnen.

Aus den genannten Gründen sind zunächst Grundrezepturen auf der Basis von Weißkalkhydrat und hochsulfatbeständigen Zement als Bindemittel erarbeitet worden. Zur Reduktion der Zementanteile ist bei etwa 700°C gebranntes Kaolin eingesetzt worden. Dieses Material entsteht z.B. auch beim Niedrigbrand von Ziegeln. Durch hohe Anteile an Inertmaterial kommt es in den Ziegeln aber zu einer starken Verdünnung des „Wirkstoffs“. Außerdem wäre bei der Verwendung von niedrig gebranntem Ziegelmehl die im Bestand vorhandene helle Färbung des Verfugmörtels nicht mehr realisierbar.

In Vorversuchen sind zunächst die Bedingungen für optimale Mischungsverhältnisse der Bindemittelanteile erprobt worden. Ziel dieser Versuche war das Erreichen von vergleichbaren Festigkeitseigenschaften unter Normalbedingungen (23°C und 65% rel. Luftfeuchte) und auch bei hohen Feuchtebelastungen (23°C und > 95% rel. Luftfeuchte).

Nach den Vorversuchen mit den reinen Bindemittelmischungen wurden Versuche an Mörteln durchgeführt. Hier sollten vor allem die Auswirkungen von Zusätzen zur Einstellung der Wasserrückhaltung, zum Eintrag von Luftporen und zur Regulierung des Wasseraufnahmevermögens untersucht werden.

Für die Versuche wurde ein aufbereiteter Sand (Betonsand 0/2) als Gesteinskörnung ausgewählt. Zur Verbesserung der Sieblinie (das Material wäre für Verfug- und Putzmörtel ansonsten nur schlecht geeignet) sind zusätzlich feine Quarzkörnungen (F31 und W6) hinzugesetzt worden.

Die Rezepturen sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

**Tabelle 5-5: Rezepturen für Mörtelversuche mit Zusätzen (Angaben in g)**

Rezeptur	M4-50-D	M4-50-E	M4-50-DT	M4-50-DTD1	M4-50-DTD2	M4-50-DTD2ST 1	M4-50-DTD2ST 2
Betonsand 0/2	1107	1107	1107	1107	1107	1107	1107
F31 (Quarzerke Frechen)	222	222	222	222	222	222	222
W6 (Quarzerke Frechen)	147	147	147	147	147	147	147
Kalkhydrat CL90	136,5	136,5	136,5	136,5	136,5	136,5	136,5
CEM I 42,5 HS/NA	109	109	109	109	109	109	109
Metastar „M402“	46	-	46	46	46	46	46
Metastar „M501“ *	-	49	-	-	-	-	-
Tylose MH10001P	-	-	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Dispersion WPC	-	-	-	12,6	25	25	25
Zink-Stearat	-	-	-	-	-	2,7	4
Wasserzugabe	320	320	320	320	320	320	320

\* Dieses Produkt unterscheidet sich nur in der Reinheit (weiß) vom „M402“ und es besitzt eine größere spezifische Oberfläche

Aus den in Tabelle 5-5 angegebenen Rezepturen wurden Trockenmischungen hergestellt. Zu den Trockenmischungen wurde die Hälfte der Wassermenge zugegeben und eine Minute (Stufe 1 Labormischer) gemischt. Danach wurde der Mischprozess für eine Minute unterbrochen („Ruhephase“, der Mörtel ist nicht verändert worden). Im Anschluss wurde die restliche Wassermenge zugesetzt und eine weitere Minute (Stufe 2, Labormischer) gemischt. Die Dispersion ist mit dem Anmachwasser zugegeben worden.

In der Ruhephase sollen die Zusatzstoffe (Methylcellulose, Dispersion, Stearat) durch das im Mörtel vorhandene Wasser aufgeschlossen werden.

Unmittelbar nach der Mischungsherstellung erfolgte die Herstellung von Mörtelprismen (4 x 4 x 16 cm<sup>3</sup>). Die Lagerung der Formen und die Entformungen erfolgten wie bei den Bindemitteluntersuchungen beschrieben. Bis zu Prüfung (nach 28 Tagen) wurden die Prismen im Normalklima gelagert.

Ermittelt wurden die Dichte, die Biegezug- und Druckfestigkeit sowie der dynamische E-Modul (dieser mittels Ultraschall).

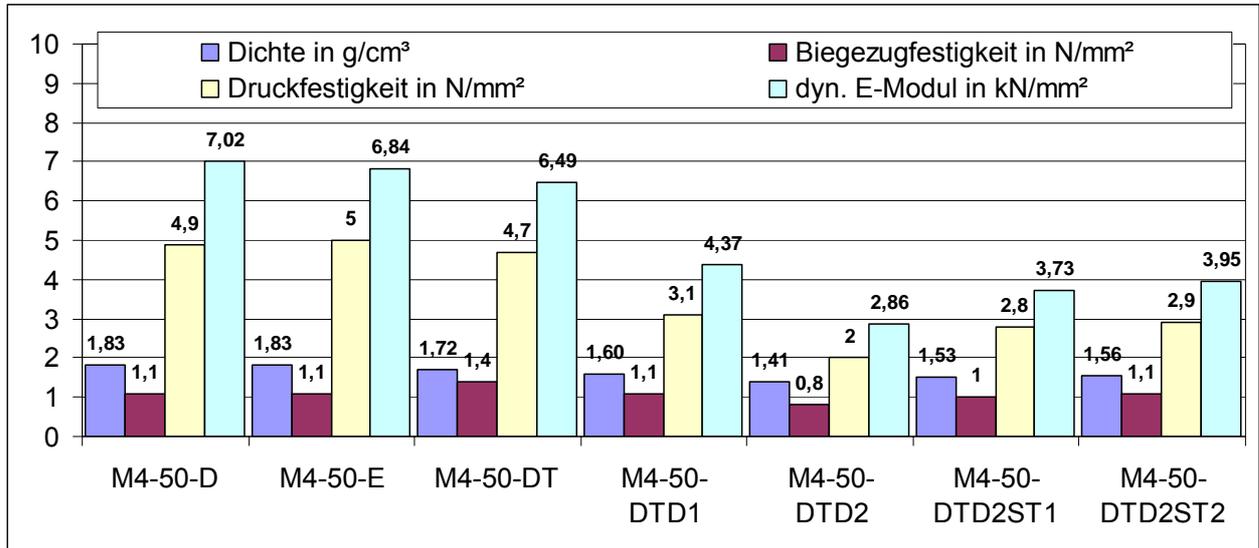


Abb. 5-2: Kennwerte für Mörtelmischungen mit Modifizierungen

Trotz der dunkelgrauen Eigenfärbung des Zementes waren die Mörtel nach 28 Tagen Erhärtungsdauer sehr hell. Auswirkungen der Zusatzstoffe auf die Optik konnten nach Augenschein nicht festgestellt werden

In den Mörteln ohne modifizierende Zusätze (Rezepturen M4-50-D und M4-50-E) werden miteinander vergleichbare Kennwerte erreicht. Somit sind die Produkte „M402“ und „M501“ in ihren Auswirkungen auf die Mörtel Eigenschaften untereinander vergleichbar.

Durch den Zusatz der Methylcellulose (Rezeptur M4-50-DT) kommt es nur zu einer unwesentlichen Verringerung der mechanischen Kennwerte. Dieser Zusatz soll vor allem die zu schnelle Austrocknung des Mörtels im Kontakt mit dem stark saugenden Steinmaterial verhindern und die Flankenhaftung am Sandstein verbessern.

Mit dem Zusatz der Dispersion (Rezepturen M4-50-DTD1 und M4-50-DTD2) verringern sich die mechanischen Kennwerte erheblich. Es deutet sich außerdem eine Abhängigkeit vom Dispersionsgehalt an. Verantwortlich für die Verringerung der Festigkeiten ist der Eintrag von Luftporen. Dieser Eintrag widerspiegelt sich vor allem in den Dichten. Die Dichte sinkt von 1,83 g/cm<sup>3</sup> (M4-50-D) auf 1,60 g/cm<sup>3</sup> (M4-50-DTD1) bzw. 1,41 g/cm<sup>3</sup> (M4-50-DTD2). Der Luftporengehalt im Festmörtel steigt somit deutlich an. Ein hoher Luftporenanteil ist für die Einlagerung von Salzen im Mörtel erforderlich.

Über den Zusatz des Zink-Stearats kann das Wasseraufnahmevermögen des Mörtels reguliert werden. Diese Einstellmöglichkeit ist besonders bei direkter Bewitterung von großer Bedeutung. Durch den Zusatz des Zink-Stearats kommt es zu keiner weiteren Verringerung der Werte für die mechanischen Eigenschaften. Es kommt eher zu einer Erhöhung der Dichten auf ein Niveau wie bei der Rezeptur M4-50-DTD1.

Insgesamt zeigen die Untersuchungen, dass die oben erprobten Bindemittelmischungen mit üblichen Mörtelzusatzstoffen modifiziert werden können.

Die zuvor dargestellten Ergebnisse flossen in die Abstimmung der Rezepturen für die Überarbeitung der Fugen der Arkaden ein. In der nachfolgenden Tabelle sind die Rezepturen zusammengestellt.

**Tabelle 5-6: Rezepturen für die Auffüllung von tiefen Fugen und die Verfugung (Angaben in g)**

	Mörtel für die Auffüllung von tiefen Fugen („M4-50-DTD1“)	Mörtel für die Verfugung („GOFRV1“)	Mörtel für die Verfugung („GOFRV2“)
<b>Gesteinskörnungen</b>			
Betonsand 0/2	1107	-	-
Sand 0 - 0,25 mm (ZuS Haida)	-	885,6	885,6
Sand 0,25 - 0,4 mm (ZuS Haida)	-	88,6	88,6
F31 (Quarzwerke Frechen)	222		
W6 (Quarzwerke Frechen)	147		
F36 (Quarzwerke Frechen)		221,4	221,4
F33 (Quarzwerke Frechen)		221,4	221,4
<b>Bindemittel</b>			
Kalkhydrat (CL90)	136,5	136,5	152,8
Portlandzement (CEM I 42,5 HS/NA)	109	109	76,3
Metastar (M402)	49	49	49
<b>weitere Zusätze</b>			
Methylcellulose (Tylose MH 10001P)	1,8	1,8	1,8
Dispersion (WPC)	12,6	12,6	12,6
Anmachwasser	320	320	320

**Tabelle 5-7: Kennwerte für Auffüll- und Verfugmörtel (nach 28 Tagen Verfestigungsdauer)**

Eigenschaft	Auffüllmörtel „M4-50-DTD1“	Verfugmörtel „GOFRV1“	Verfugmörtel „GOFRV2“
Dichte	1,60 g/cm <sup>3</sup>	1,41 g/cm <sup>3</sup>	1,36 g/cm <sup>3</sup>
Biegezugfestigkeit	1,1 N/mm <sup>2</sup>	1,0 N/mm <sup>2</sup>	0,7 N/mm <sup>2</sup>
Druckfestigkeit	3,1 N/mm <sup>2</sup>	2,4 N/mm <sup>2</sup>	1,7 N/mm <sup>2</sup>

Die Druckfestigkeiten aller drei Rezepturen sind geringer als die der Lettenkohlendsteine und auch geringer als die der an diesen Stein angepassten Steinerfüllmörtel.

Für die Erprobung an einer Testfläche an einem Pfeiler auf der Ostseite des Schlosshofs sind die Rezeptur für Auffüllungen M4-50-DTD1 und die Rezeptur für Verfugungen GOFRV1 ausgewählt worden. Von beiden Rezepturen waren im Labormaßstab Trockenmörtelmischungen hergestellt und der FH Erfurt FB Restaurierung für die Erprobung an der Testfläche zur Verfügung gestellt worden.

## 5.4. Untersuchungen zur Festigung von geschädigten Lettenkohlendsteinen

### 5.4.1 Auswahl der Festigungsmittel

Ausgehend von den Ergebnissen der in den letzten Jahren vorgenommenen Untersuchungen an Schilf- und Lettenkohlendsteinen wurden durch uns folgende Festigungsmittel für ein Testprogramm an den Gothaer Lettenkeupersandsteinen ausgewählt:

#### REMMERS Funcosil - Steinfestiger KSE 100:

Bezeichnung: K1

- lösemittelhaltiger Steinfestiger auf Basis Kieselsäureethylester
- Gelabscheidungsrate: 100 g/l
- Kieselsäureestergehalt 20 %
- 1-Komponentensystem
- keine hydrophobierenden Zusätze
- neutraler Katalysator
- Dichte bei 10 ° C 0,79 kg/l
- Farbe klar, leicht gelbstichig
- Reaktionsbedingtes Nebenprodukt: Ethanol (entweicht)

#### REMMERS Funcosil - Steinfestiger KSE 300:

Bezeichnung: K3

- lösemittelfreier Steinfestiger auf Basis Kieselsäureethylester
- Gelabscheidungsrate: 300 g/l
- Kieselsäureestergehalt 99 %
- 1-Komponentensystem
- keine hydrophobierenden Zusätze
- neutraler Katalysator
- Dichte bei 10 ° C 1,0 kg/l
- Farbe klar, leicht gelbstichig

#### REMMERS Funcosil - Steinfestiger KSE 300 E :

Bezeichnung: K3E

- Elastifizierter Steinfestiger auf Basis Kieselsäureethylester
- Lösemittelhaltig
- mit elastifizierenden Polyether-Weichsegmenten
- Gelabscheidungsrate: 300 g/l
- Kieselsäureestergehalt >40 %
- 1-Komponentensystem
- keine hydrophobierenden Zusätze
- neutraler Katalysator
- Dichte bei 10 ° C 0,92 kg/l
- Farbe klar, leicht gelbstichig
- Reaktionsbedingtes Nebenprodukt: Ethanol (entweicht)

Epoxidharz Epilox T 19-20, 10 % ig :

Bezeichnung: K1EP

- zweikomponentiges EP-Harzsystem
- niedrigmolekular
- wird unter Zugabe von Härter vernetzt
- Härter: DPTA der Leuna-Werke AG, 13 % vom Harzanteil
- Wird mit Lösemittelgemisch auf 10 % Harzanteil in der Gesamtlösung gebracht
- Lösemittelgemisch besteht aus Toluol und Aceton im Verhältnis 2:1
- Gesundheitsgefährdend

#### **5.4.2 Applikation der Festigungsmittel**

Für die Laboruntersuchungen wurden je nach Anforderung verschiedene Prüfkörper (Würfel und Prismen) gesägt oder gebohrt (Kernbohrung). Im Schnitt wurden jeweils 3 Prüfkörper pro Messung verwendet. Für jede Messreihe wurde der arithmetische Mittelwert angegeben.

Die Probekörper wurden jeweils ca. zur Hälfte in das Festigungsmittel eingetaucht und mussten den Festiger aus eigener Kraft aufsaugen. Wenn die Probekörper sichtbar durchtränkt waren (zu erkennen an der Dunkelfärbung), erfolgte ein Auffüllen des Festigers, so dass die Proben ca. 1 cm überdeckt waren. Jetzt verblieben die Proben noch ca. 1 Stunde im Tränkbad, bis sie herausgenommen und bei 40 ° C getrocknet wurden.

Die Bedingungen bei der Festigung im Labor betragen immer ca. 23 ° C und 20 % r.F.

Ein Teil der Proben KSE Proben wurde nach der 1. Tränkung im feuchten Zustand gleich noch zweimal getränkt (immer nass in feucht) und erst danach getrocknet.

Bei dem Kombinationspräparat mit EP-Harz, erfolgte die 1. Tränkung mit KSE 100 wie oben beschrieben. Nach der Trocknung und einer Zwischenzeit von 3 Wochen, in der der Kieselester ausgeschieden wurde, erfolgte eine weitere Tränkung mit 10 % igem EP-Harz nach oben beschriebenem Muster.

Bezeichnung der Proben:

1K1	1 x mit KSE 100 getränkte Proben
3K1	3 x mit KSE 100 getränkte Proben
1K3	1 x mit KSE 300 getränkte Proben
3K3	3 x mit KSE 300 getränkte Proben
1K3E	1 x mit KSE 300 E getränkte Proben
3K3E	3 x mit KSE 300 E getränkte Proben
K1EP	1x mit KSE 100 und anschließend 1 x mit EP-Harz 10 % ig getränkte Proben

### 5.4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse zur Steifigung

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind ausführlich im Zwischenbericht des DBU-Projektes beschrieben und werden nachfolgend nur zusammenfassend dargestellt.

Das Ziel der Festigung besteht darin, durch Bindemittelzufuhr oder Verklebung der Körner vom unverwitterten Kern bis zur Oberfläche einen gleichmäßig gefestigten Kornverband herzustellen. Dabei sollen sich die physikalischen Eigenschaften der behandelten Zone gegenüber dem unverwitterten Kern nicht nennenswert ändern.

Tabelle 5-8 gibt einen Überblick über die Eigenschaftsänderungen im Vergleich zum unbehandelten Stein.

**Tabelle 5-8: Zusammenfassende Darstellung der durch die Festigung hervorgerufenen Veränderungen im Vergleich zum unbehandelten Gestein**

Untersuchung	Festigungsmittel						
	1K1	3K1	1K3	3 K3	1K3E	3 K3E	K1EP
Optische Veränderungen	/	/	/	+	++	++	++
Rohdichte	+	++	+	++	+	++	+
Reindichte	/	/	/	/	/	/	/
Porosität	-	--	-	--	-	--	-
Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck	-	-	--	--	-	-	-
Wasseraufnahme unter Vakuum 150 bar	-	-	--	--	-	-	-
Sättigungswert	-	-	--	--	-	--	-
Wasseraufnahmekoeffizient	-	-	--	--	--	--	-
Wassereindringkoeffizient	-	-	-	--	-	--	-
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	+	+	+	++	+	++	+
Druckfestigkeit	/	/	+	++	+	++	+
Biegezugfestigkeit	+	+	++	++	++	++	+
Statischer E-Modul	+	+	++	++	++	++	+
Dynamischer E-Modul	+	+	++	++	++	++	+
Abriebfestigkeit		+		+		+	+
Beständigkeit gegen Frost-Tau-Wechsel	+	+	+	++	++	++	+

**+ Erhöhung ++ starke Erhöhung / keine Änderung - Verringerung --starke Verringerung**

#### Behandlung mit KSE 100 (K1):

Die mit KSE 100 (ca. 10 % Gelabscheidungsrate) behandelten Messreihen zeigten bei den Untersuchungen nur geringfügige Änderungen im Vergleich zum unbehandelten Stein. Bei der 1xigen Applikation waren bei der Druckfestigkeit keine und bei der Biegezugfestigkeit nur geringe Festigkeitszunahmen zu verzeichnen. Dreimalige Applikationen brachten bessere Werte. Andererseits wurden durch die Behandlung mit KSE 100 auch keine negativen Eigenschaftsveränderungen erzielt, was besonders in Hinblick auf die Vermeidung einer möglichen Schalenbildung positiv zu verzeichnen ist.

#### Behandlung mit KSE 300, ohne elastifizierende Komponenten (K3):

Bei der mit KSE 300 (ca. 30 % Gelabscheidungsrate) vorgenommenen Festigung konnten höhere Eindringtiefen erreicht werden als mit allen anderen Festigungsmitteln. Generell ist festzustellen, dass Veränderungen der hygrischen Eigenschaften und der Festigkeiten stattgefunden haben, die bei der dreifachen Applikation besonders groß sind. Hier kam es zu einer starken Erhöhung der Festigkeiten und der E-Module, die über das gewünschte Maß hinausgehen. Weiterhin wurde die Wasserdampfdiffusion stark reduziert. Im ersten Moment entsteht so der Eindruck, dass eine Behandlung mit KSE 300 nicht infrage kommt, weil die Gefahr der Schalenbildung zu groß ist.

Man darf aber nicht vergessen, dass sämtliche Versuche an ungeschädigtem Steinmaterial vorgenommen wurden, und an geschädigtem Material von geringeren Festigkeiten ausgegangen werden muss. Hier muss also durchaus überlegt werden, ob die Festigung auf vorgeschädigtem Sandstein erfolgversprechend ist, vorausgesetzt es gelingt, einen fließenden Übergang zum ungeschädigten Stein herzustellen (z.B. durch aufbauende Tränkung im Übergangsbereich).

#### Behandlung mit KSE 300, mit elastifizierenden Komponenten (K3E):

Bei der mit KSE 300 E (ca. 30 % Gelabscheidungsrate) vorgenommenen Festigung wurden die geringsten Eindringtiefen und die stärkste Farbveränderung erzielt.

Der Anstieg der Biegezugfestigkeit und des E-Moduls ist nicht ganz so hoch wie bei dem unelastifizierten KSE 300. Dies ist zwar günstig zur Vermeidung von Schalenbildungen, wird aber durch die geringeren Eindringtiefen wieder kompensiert. Die Wasserdampfdiffusion wird bei den 3x gefestigten Proben erheblich beeinträchtigt.

Insgesamt gesehen stellen sich nach dem jetzigen Stand der Untersuchungen keine überzeugenden Vorteile gegenüber einer Behandlung mit unelastifiziertem KSE dar. Möglicherweise werden hygrische Quell- und Schwindvorgänge günstig beeinflusst. Dies wäre im Rahmen weiterer Untersuchungen zu klären.

#### Behandlung mit KSE 100 und 10 % igem EP-Harz (K1EP):

Bei den mit KSE 100 in Kombination mit 10 % igem EP-Harz gefestigten Proben kam es zu starken Farbtonvertiefungen des Steins.

Die durch die Festigung hervorgerufenen Eigenschaftsveränderungen entsprechen in etwa denen einer dreifachen Behandlung mit KSE 100. Der E-Modul wird stärker als bei dieser erhöht, die Wasserdampfdiffusion mehr reduziert.

Insgesamt gesehen können wir derzeit keine Vorteile gegenüber einer Behandlung mit Kieseestern erkennen. Dazu kommt, dass die Applikation des EP-Harzes aufgrund der Lösungsmittel (Toluol und Aceton) bedeutend schwieriger ist (schlechte Arbeitshygiene, Gesundheitsschutz).

Eventuell können durch Erhöhung der Wirkstoffkonzentration bei EP-Harz günstigere Ergebnisse erzielt werden. Diese Ergebnisse werden durch Patzelt [6] bestätigt, die einen Wirkstoffgehalt von 10 % als unterste Wirksamkeitsgrenze ermittelt hat, vorausgesetzt, es liegen optimale, den kapillaren Saugvorgang unterstützende Porenparameter vor.

## 5.5. Recherche nach Ersatzsandstein für Vierungen und Neuteile

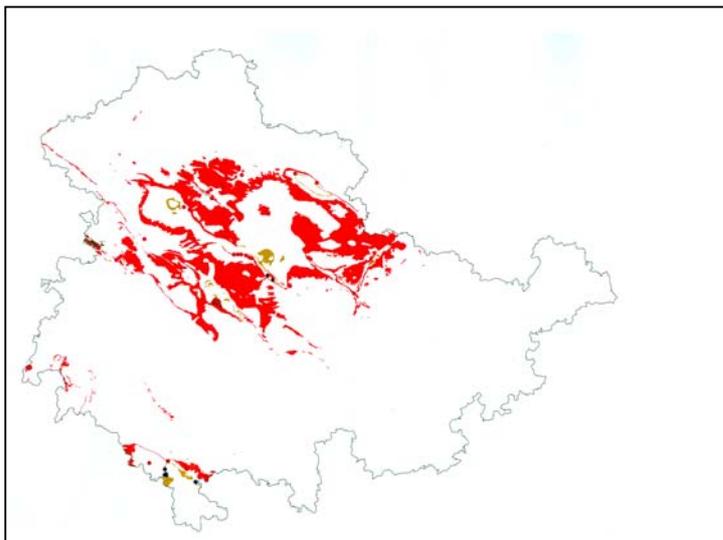
Ersatzmaterial für Vierungen und Neuteile sollte möglichst ähnliche Eigenschaften wie das Originalmaterial haben. Dabei spielt die Bindung, Körnung, Struktur und Farbe des Gesteins eine wesentliche Rolle. Aber auch die hygrischen Kennwerte und die Festigkeitskennwerte sollten angepasst sein. Bei Nichtbeachtung dieser Anforderungen sind Schäden im Ersatzmaterial oder auch im Originalstein zu erwarten. Bekannt sind Beispiele von Vierungen oder Ergänzungen aus zu hartem oder zu dichtem Material, die dazu geführt haben, dass der umliegende Originalbestand zerstört wurde.

Es liegt deshalb nahe, Ersatzsandsteine in der gleichen geologischen Formation zu suchen (Unterer Keuper). Darüber hinaus ist bekannt, dass die sog. Schilfsandsteine aus der Formation des Mittleren Keupers ähnliche Eigenschaften wie die Lettenkohlsandsteine haben. Diese Sandsteine wurden daher in unsere Recherche einbezogen.

### 5.5.1 Lettenkohlen- und Schilfsandsteine in Thüringen

In Thüringen treten Keupersedimente in geschlossener Verbreitung im zentralen Teil des Thüringer Beckens, im nördlichen Vorland des Thüringer Waldes und südlich des Thüringer Waldes im Grabfeld auf (Abb. 5-3).

Nördlich des Thüringer Waldes überwiegen die Sandsteine des Unteren Keupers, die als Werksteine hier in mindestens 50 Steinbrüchen abgebaut wurden. Dabei handelte es sich überwiegend um kleinere Brüche, die nur lokale Bedeutung hatten, deren Materialbestand sich aber bis heute deutlich in den Gebäuden der umliegenden Orte widerspiegelt. Südlich des Thüringer Waldes wurde der Lettenkeupersandstein in mehreren großen Steinbrüchen um Adelhausen (bei Rodach) und Bedheim (östlich des großen Gleichberges) abgebaut. Auch im Schilfsandstein (Mittlerer Keuper), der dem Lettenkeupersandstein sehr ähnlich ist, sind in Südthüringen kompakte Sandsteinbänke ausgebildet. Sie wurden in Hindfeld (bei Römhild) und Streufdorf abgebaut.



**Abb. 5-3:**  
**Verbreitung der Schilf- und**  
**Lettenkohlsandsteine in Thüringen [7]**

Sowohl im Lettenkohlen- als auch im Schilfsandstein überwiegen Sandsteine mit grünlicher, bräunlicher oder gelblicher Färbung. Rotbraune Sandsteine, wie an den Schlossarkaden verwendet, sind deutlich in der Minderzahl.

Häufig befinden sich innerhalb eines Steinbruchs einzelne Bänke mit rotbraunem Sandstein, die aber nicht eine ausreichende Mächtigkeit erreichen, um systematisch abgebaut zu werden.

Von vierzig durch uns ermittelte Vorkommen in Thüringen konnten wir neben den Gothaer Steinbrüchen nur sieben weitere ermitteln, in denen rote Keupersandsteine gebrochen wurden. Dazu gehören:

Nördlich des Thüringer Waldes:

- |                   |                           |       |                    |
|-------------------|---------------------------|-------|--------------------|
| - Freienbessingen | (Messtischblatt Ebeleben  | 4730) | in geringem Umfang |
| - Lauterbach      | (Messtischblatt Mihla     | 4928) | in großem Umfang   |
| - Henningsleben   | (Messtischblatt Behringen | 4929) | in geringem Umfang |
| - Markvippach     | (Messtischblatt Weimar NW | 4933) | in geringem Umfang |

In der Altstadt von Erfurt wurden neben grünen auch rote Keupersandstein verbaut, bei denen es sich vermutlich um Schilfsandsteine (Mittlere Keuper) handelt, die in lokalen - nicht mehr vorhandenen - Steinbrüchen im Stadtgebiet gewonnen wurden.

Südlich des Thüringer Waldes:

- |              |                         |       |                  |
|--------------|-------------------------|-------|------------------|
| - Bedheim    | (Messtischblatt Römheld | 5629) | in großem Umfang |
| - Adelhausen | (Messtischblatt Rodach  | 5630) | in großem Umfang |

Die Steinbrüche in Henningsleben und Markvippach sind verfüllt (Müllhalde). Die Steinbrüche in Freienbessingen, Lauterbach, Bedheim und Adelhausen sind gegenwärtig noch zugänglich, aber nicht mehr in Betrieb.

Nur noch der Steinbruch in Lauterbach verfügt über Blockgrößen (Bruchwand ca. 10 m), aus denen Steine für Denkmalzwecke gewonnen werden könnten, vorausgesetzt, es werden die erforderlichen Genehmigungen erteilt. Allerdings liegen im Moment nur die Bänke mit dem grünen Sandstein frei, der darunter liegende rote Sandstein ist verfüllt.

### **5.5.2 Lettenkohlen- und Schilfsandsteine in den übrigen Bundesländern**

Lettenkohlsandsteine sind im übrigen Bundesgebiet nur wenig vertreten. Von 12 beschriebenen Sandsteinen des Mittleren und Unteren Keupers sind nur 3 Lettenkohlsandsteine.

Von den bundesweit erfassten Keupersandsteinen sind folgende Vorkommen bekannt, in denen rote Varietäten beschrieben werden [8]:

- |  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| - Freudenbach bei Creglingen (Württemberg) | Lettenkeupersandstein                |
| - Renfrizhausen (Württemberg)              | Schilfsandstein, nicht mehr im Abbau |
| - Maulbronn (Württemberg)                  | Schilfsandstein                      |

### 5.5.3 Ähnliche Sandsteine anderer geologischer Formationen

Bei einer Recherche im Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine [8] und in der Internationalen Natursteinkartei konnten mehrere feinkörnige, tonig gebundene, rote Sandsteine aus der Formation des Buntsandsteins ermittelt werden (z.B. Rote Mainsandsteine), die jedoch meist eine wesentlich geringere Porosität und Wasseraufnahme und höhere Festigkeiten als die Lettenkeupersandsteine aufweisen und daher nicht als Ersatzmaterial geeignet sind.

### 5.5.4 Vergleich möglicher Ersatzgesteine

Folgende der o.g. Sandsteine sollen hinsichtlich ihrer Eigenschaften mit dem Gothaer Lettenkeupersandstein verglichen werden (Tabelle 5-9).

- Lauterbacher Sandstein
- Freudenbacher Sandstein
- Maulbronner Sandstein

**Tabelle 5-9: Vergleich der Petrographie**

Herkunft	Gotha	Lauterbach	Freudenbach [8]	Maulbronn [8]
<b>Stratigraphie</b>	Unterer Keuper	Unterer Keuper	Unterer Keuper	Mittlerer Keuper
<b>Farbe</b>	rotbraun	rotbraun	rotbraun	rot geflammt
<b>Korngrößen</b>	0,05-0,3 mm feinkörnig	0,1 – 0,3 mm feinkörnig	i.M. 0,13 mm feinkörnig	i.M. 0,12 mm feinkörnig
<b>sichtbarer Porenraum</b>	25-29 % inhomogen verteilt Porengröße 0,05 mm – 0,2 mm	25 % inhomogen verteilt Porengröße 0,06 mm	9 % inhomogen verteilt Porengröße i.M. 0,07 mm	11 % inhomogen verteilt Porengröße i.M. 0,03 mm oft auch größer
<b>Bindemittel</b>	Vorwiegend tonig-ferritisch			
<b>Textur</b>	nur gering angedeutet	unregelmäßig feine Parallel- schichtung Schrägschichtung	feine Parallel- schichtung, Schrägschichtung	feine Parallel- schichtung, Schrägschichtung Typ. Strömungs- rippelmarken
<b>Klassifikation</b>	Feldspatführender Sandstein mit vielen Gesteinsbruchstücken			

**Tabelle 5-10: Vergleich der gesteintechnischen Kennwerte**

Herkunft	Gotha	Lauterbach	Freudenbach	Maulbronn [8]
Reindichte [g/cm <sup>3</sup> ]	2,69 - 2,79	2,72	2,86	2,68
Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	1,97 - 2,01	2,05	2,13	2,08
Gesamtporosität [Vol.-%]	25 - 29	24,63	20,73	22,20
Spezifische Oberfläche [m <sup>2</sup> /g]	8,7 - 9,1			3,45
Wasseraufnahme [M-%] unter Atmosphärendruck	10,4	8,55	6,83	7,26
Wasseraufnahme Bei 150 bar [M-%]	12,7	11,2	9,75	10,66
Sättigungsgrad [-]	0,81 - 0,83	0,76	0,70	0,68
Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> ]	8 - 10			3,5
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [-] 0-85% r.F.	25			25
Druckfestigkeit, trocken [N/mm <sup>2</sup> ]	30	44,6		72 35
Biegezugfestigkeit, trocken [N/mm <sup>2</sup> ]	3,2	5,7		7,0

### 5.5.5 Empfehlungen für geeignete Ersatzgesteine

Unsere Recherchen zeigen, dass es sehr schwierig ist, geeignetes Ersatzmaterial für den Gothaer Lettenkeupersandstein zu finden.

Dieser Sandstein besitzt im Vergleich zu anderen Sandsteinen eine hohe Porosität und Wasseraufnahme. Die spezifische Oberfläche des Steins ist sehr hoch, ein Beleg für den hohen Anteil toniger Bestandteile. Dagegen sind die Festigkeitskennwerte um ca. 50 % niedriger als die anderer, im Handel verfügbarer Keupersandsteine. Gut angepasstes Austauschmaterial steht nicht mehr zur Verfügung!

Das bedeutet, dass man auf Werksteine zurückgreifen muss, die den gewünschten Eigenschaften sehr nahe kommen. Aus unserer Sicht kommt der Lettenkohlsandstein aus **Freudenbach** den genannten Kriterien am Nächsten.

Eine weitere Möglichkeit, zumindest für die kleinformatigeren Vierungen, ist die Verwendung von Altmaterial aus abgebrochener Bausubstanz in Gotha. Das Abbruchmaterial muss hinsichtlich seiner Wiederverwendbarkeit (Versalzung, Maße, Schäden) geprüft werden, ehe es für Vierungen Verwendung finden kann.

## 6. Erprobung von Technologien und Materialien an Testflächen

Die Erprobung von Technologien zur restauratorischen Behandlung der Natursteinoberflächen und die Anwendungserprobung von Mörteln und Schlämmen erfolgten im Rahmen von studentischen Arbeiten durch die FH Erfurt.

An zwei Pfeilern der Arkaden wurden von April bis September 2005 Testflächen zur Erprobung von Restaurierungstechnologien angelegt (Lageplan im Anhang).

### 6.1. Konservatorische Maßnahmen

#### 6.1.1. Reinigung

Vor der Reinigung der Oberflächen erfolgte ein manuelles Ausräumen der Fugen mit Hilfe entsprechender Handwerkzeuge. Ursprünglichen Verfugungen (Kalkmörtel) wurden belassen und nur die jüngeren, nachträglichen Verfugungen (meist Zementmörtel) entfernt wurden.



**Bilder 6-1 und 6-2:**  
Nach Süden exponierte Seite des Pfeilers „TF-3“ vor und nach der Entfernung von Altmörteln

### Mechanische Reinigung:

Die Reinigung der Oberflächen erfolgte mit Hilfe eines Feinsandstrahlgerätes. Als Strahlgut wurde Glasmehl verwendet. Ziel der Maßnahme war vor allem das Ausdünnen der aufliegenden Krusten sowie der Filmen. Ein weiteres Ziel war die Entfernung von Zement- und Farbspritzern. Im Bereich der Gesimse und Sockel wurden Probeflächen angelegt.



**Bild 6-3:**  
Teilbereich des Sockels auf der Nordseite des Pfeilers TF-3 nach der Reinigung mit einem Feinsandstrahlgerät

### Manuelle Reinigung:

Eine manuelle Reinigung mittels Steinmetzhandwerkzeug erfolgte in Bereichen mit aufliegenden Krusten. Diese wurden entfernt oder gegebenenfalls ausgedünnt um die Natursteinoberfläche zu erhalten.

### **6.1.2. Steinfestigung**

In Bereichen mit aktiven und passiven Absandungen, wurde in einer aufbauenden Festigungstechnologie mit Kieselsäureestern mit verschiedenen Gelabscheidungsraten gearbeitet. Zum Einsatz kamen hierbei die Produkte Funcosil Steinfestiger 100 und Funcosil Steinfestiger 300 E der Firma Remmers. Der Auftrag erfolgte durch Tränkung oder Injektion der Oberflächen mittels Spritzen und Spritzflaschen. Auf horizontalen Oberflächen konnten Kompressen aus Baumwollwatte als Reservoir aufgelegt werden.

Zur Überbrückung von Mikrorissen, Klüften und zur Konsolidierung von Mürbezonen an stabilere Untergründe kam eine aufbauende Festigung mit Epoxydharzlösungen zum Einsatz. Verwendet wurde hier das Produkt Epilox 19-32, als Lösung in den Konzentrationen 10% und 20%.

Einer definierten Menge Harz wurden 12 % Härter zugegeben. Das Lösungsmittelgemisch (Toluol-Aceton) wurde im Verhältnis 3 Teile Toluol auf 2 Teile Aceton gemischt. Für eine 10 %ige Epoxydharzlösung wurden dann 1 Teil Harz-Härter-Gemisch mit 9 Teilen Lösungsmittelgemisch vermischt. Für eine 20 %ige Epoxydharzlösung wurden 2 Teile Harz-Härter und 8 Teile Lösungsmittel gemischt.



**Bild 6-4:**  
Nordseite des Pfeilers TF-2 mit einer  
Probefläche unmittelbar nach der Festigung mit  
KSE 300 E



**Bild 6-5:**  
Nordseite des Pfeilers TF-2 mit einer  
Probefläche unmittelbar nach dem  
Festigen/Hinterfüllen mit Epoxydharzlg. 20%ig

#### 6.1.4. Konservatorischer Oberflächenverschluss

Ein konservatorischer Oberflächenverschluss erfolgte auf zwei Teilflächen der Testfläche TF-2 in Form einer ganzflächigen dünn aufgetragenen Schlämme und einem Anböschten aufstehender Schalen und Ablätterungen mittels acrylatgebundenem Mörtel (siehe auch Abschnitt Entwicklung von Technologien und Materialien zur Sanierung).



**Bild 6-6:**  
Nordseite des Pfeilers  
TF-2: Probefläche mit  
konservatorischem  
Oberflächenverschluss  
mit Schlämme



**Bild 6-7:**  
Nordseite des Pfeilers  
TF-2: Probefläche mit  
konservatorischem  
Oberflächenverschluss  
durch Anbösch (helle  
Stellen auf der  
Steinoberfläche)

#### 6.1.4. Restauratorische Maßnahmen

##### Restauratorischer Oberflächenverschluss:

Der restauratorische Oberflächenverschluss beschränkt sich auf die Teilflächen am Pfeiler TF-3. Nicht berücksichtigt wurden die Bereiche des Gesimses und des Sockels aus Rätsandstein. Im Gegensatz zum konservatorischen Oberflächenverschluss sollten beim restauratorischen Oberflächenverschluss ursprüngliche Formverläufe und Proportionen wieder aufgenommen und weitergeführt werden. Zur Anwendung kam der im Rahmen des Projektes entwickelte acrylatgebundene Steinerfüllmörtel.



**Bild 6-8:**  
Nach Westen exponierte Fläche des Pfeilers  
TF-3: Vorzustand vor Oberflächenformulierung  
mit Steinerfüllmörtel



**Bild 6-9:**  
Nach Westen exponierte Fläche des Pfeilers  
TF-3: Zustand nach dem Abschluss der Ober-  
flächenformulierung mit Steinerfüllmörtel



**Bild 6-10:**  
Nach Westen exponierte Fläche des Pfeilers  
TF-3: Oberflächenformulierung nach dem  
Antrag des Steinerfüllungsmörtels an einer  
zurückgewitterten Steinkante



**Bild 6-11:**  
Nach Westen exponierte Fläche des Pfeilers  
TF-3: Steinkante nach dem Anpassen der  
Oberflächen des Steinerfüllungsmörtels an  
den ursprünglichen Bestand

Neuverfugung:

Die Neuverfugung erfolgte in zwei Schritten. In einem ersten Schritt erfolgte das Einbringen eines groben Mörtels („M4-50-DTD1“) zum Auffüllen tiefer und breiter Fugen. Der Auftrag erfolgt bis ca. 1 cm unter die Steinoberkanten. Bei sehr breiten Fugen wurden Schieferstücke zum Auffüllen und Stabilisieren mit eingelegt.

In einem zweiten Schritt erfolgte die Verfugung mit dem Mörtel „GOFRV1“ bis auf das Niveau der Steinoberflächen.



**Bild 6-12:**  
Nach Süden exponierte Fläche des Pfeilers  
TF-3: Neue Tiefenverfugung und Auswicklung  
mit Schieferplatten



**Bild 6-13:**  
Nach Süden exponierte Fläche des Pfeilers  
TF-3: Neue Tiefenverfugung mit  
Oberflächenstrukturierung für eine gute  
Anbindung der Deckverfugung



**Bild 6-14:**  
Nach Norden exponierte Fläche des Pfeilers  
TF-3: Neue Tiefenverfugung mit  
Oberflächenstrukturierung für eine gute  
Anbindung der Deckverfugung unter einem  
Gesims (oberer Bildbereich) und Fuge mit  
fertiger Deckverfugung

## **7. Nachuntersuchungen an den Testflächen**

Erste Vorbewertungen auf visuell wahrnehmbare Veränderungen (Risse, Ausblühungen, Abschalungen) an den durch die Fachhochschule Erfurt angelegten Testflächen erfolgten im November 2005 und im April 2006. Es waren keine sichtbaren Veränderungen, die auf Schäden hindeuten, erkennbar.

### **7.1. Nachuntersuchungen an den Mörteln**

Im Juli 2006 sind Untersuchungen an den Testflächen mit Steinerfüllungsmörteln und Schlämmen vorgenommen worden.

Für die Erprobung von Steinerfüllungen am Objekt war der Mörtel „F0,2/5-GF“ (Kennzeichnung durch die MFPA) ausgewählt worden. Mit diesem Mörtel ist eine gute strukturelle Anpassung an den Lettenkohlendstein der Arkaden des Schlosses Friedenstein möglich. Um auf Farbschwankungen im Bestand reagieren zu können, wurde der Farbton etwas heller eingestellt als die originale Steinfarbe. So kann bei gewollter Anpassung der Steinfarbe eine Farbkorrektur über Lasuren erfolgen. An der äußeren Erscheinung der Ergänzungsmörtel waren nach 10 Monaten Standzeit keine Veränderungen, die auf Schäden hindeuten, sichtbar.

Zur Ermittlung des Haftverbundes sind an einigen Stellen Haftzugfestigkeiten bestimmt worden. An ausgewählten Stellen wurde die Umlagerung von Salzen in die Steinerfüllungsmörtel untersucht. Untersuchungen zum Wasseraufnahmevermögen an den Testflächen und auch an Probekörpern im Labor sind gemeinsam mit der FH Erfurt vorgenommen worden.

Die Mörtel für die Erneuerung und Ausbesserung von Fugen waren bisher unpigmentiert. Es ergab sich eine nahezu weiße Färbung. Die historischen Mörtel im Bestand waren ebenfalls weiß und besaßen oft ockerfarbige Fassungsrückstände auf den Oberflächen. Für die Erprobung an der später auszuführenden Musterachse sind pigmentierte Mörtel auf Basis der bisher erprobten Rezepturen hergestellt worden.

#### **7.1.1. Ermittlung von Haftfestigkeiten an den Steinerfüllungsmörteln**

Die Bestimmung der Haftfestigkeiten erfolgte in Anlehnung an DIN EN 1015-12:2000 Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk, Teil 12 „Bestimmung der Haftfestigkeit von erhärteten Putzmörteln“.

Flächen mit Steinerfüllungsmörteln auf Lettenkohlendstein und als Vergleich auch Sandsteinflächen sind mit einem Diamantkernbohrgerät (Durchmesser der entstehenden Prüffläche 4,3 cm) bis etwa 5 mm Tiefe in das Steinmaterial des Untergrundes angebohrt worden. Anschließend sind runde Metallstempel mit Gewindeanschluss für die Ankopplung eines mobilen Prüfgerätes (Typ F15D-EASY-M) aufgeklebt (Kleber RI/21 auf Basis von Methylmetacrylat mit Diphenylperoxid als Härter der Fa. Silikal GmbH & Co. KG Mainhausen) worden. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 125 N/s.

Die Ergebnisse können Tabelle 7-1 entnommen werden.

**Tabelle 7-1: Haftfestigkeitswerte und Angaben zu den Bruchbildern**

Bezeichnung	Angaben zum Untergrund und zur Exposition	Haftfestigkeit in N/mm <sup>2</sup>	Anmerkungen zum Bruchbild
<b>Pfeiler TF-3</b>			
GOFH1	Mörtelergänzung auf Sandstein – zum Arkadengang exponiert	0,48	Der Abriss erfolgte anteilig im Stein (etwa 70 %) und im Ergänzungsmörtel.
GOFH2	Mörtelergänzung (0,3 bis 1 cm dick) auf Sandstein und etwa zu ¼ der Fläche auf Mörtel – nach Norden exponiert	-	Die Bohrkernscheibe ist beim Anbohren herausgefallen.
GOFH3	Mörtelergänzung auf Sandstein unter einem Gesims - nach Westen exponiert	0,23	Der Abriss erfolgte anteilig im Stein (etwa 75 %) und im Ergänzungsmörtel.
GOFH4	Mörtelergänzung auf Sandstein unter einem Gesims - nach Westen exponiert	0,38	Der Abriss erfolgte im Stein.
GOFH5	Mörtelergänzung auf Sandstein unter einem Gesims - nach Westen exponiert	0,21	Der Abriss erfolgte im Stein.
GOFH6	Mörtelergänzung auf Sandstein im unteren Pfeilerbereich - nach Westen exponiert	0,24	Der Abriss erfolgte im Stein.
GOFH7	Mörtelergänzung auf Sandstein im unteren Pfeilerbereich - nach Westen exponiert	0,25	Der Abriss erfolgte im Stein.
GOFH8	Mörtelergänzung auf Sandstein in mittlerer Pfeilerhöhe - nach Süden exponiert	0,20	Der Abriss erfolgte im Stein. Unter der Abrissstelle war eine Störung im Steingefüge vorhanden.
GOFH9	auf abgeschalter Sandsteinoberfläche unmittelbar über dem Sockel - nach Westen exponiert	-	Beim Ansetzen des Haftzugprüfgerätes brach die Bohrkernscheibe in einer Tiefe von 5 bis 7 mm aus dem Untergrund heraus.
GOFH10	auf Sandstein unmittelbar über dem Sockel - nach Westen exponiert	1,21	
<b>Pfeiler TF-2</b>			
GOFH11	im Sommer2005 gefestigte Sandsteinoberfläche unmittelbar unter einem Gesims – nach Osten exponiert	-	Die Bohrkernscheibe riss beim Ansetzen des Haftzugprüfgerätes in einer Tiefe von 1 mm aus dem Untergrund ab.
GOFH12	im Sommer 2005 gefestigte Sandsteinoberfläche unter GOFH11– nach Osten exponiert	0,06	Der Abriss erfolgte in ca. 1 mm Tiefe.

Für die Steinerergänzungen auf dem Lettenkohlendstein kann nach der Antragung auf homogen aufgebauten Steinuntergründen nach einem Jahr Standzeit und Freibewitterung eine ausreichende Haftfestigkeit nachgewiesen werden.

Deutliche Verschlechterungen in der Haftfestigkeit können festgestellt werden wenn partiell Kalkmörtel vorhanden sind oder Inhomogenitäten (gelblich bis grünlich erscheinende Stellen im Stein mit vermutlich sehr hohen Tonanteilen) im Steinmaterial. Die Haftfestigkeiten sind in der Größenordnung aber immer noch vergleichbar mit üblichen Baustoffen wie z.B. Kalkputzen ohne hydraulische Bindemittelanteile.

Sehr große Unterschiede sind bei den Oberflächenzugfestigkeiten im Steinmaterial selbst festzustellen. Der Stein mit nahezu ungeschädigter Oberfläche an der Stelle GOFH10 weist mit 1,21 N/mm<sup>2</sup> eine sehr hohe Oberflächenzugfestigkeit auf. Unmittelbar daneben auf einer vorgeschädigten Fläche (GOFH9) unter einer abgeschalteten Steinschicht ist kein Wert bestimmbar. Der Bohrkern brach in einer Tiefe von 5 bis 7 mm beim Ansetzen des Prüfgerätes ab.

Auf Flächen (Stellen GOFH11 und GOFH12) mit feinschuppigen dünn-schichtigen Abschalungen, die im Sommer 2005 mit KSE gefestigt worden waren, sind nur sehr geringe Oberflächenzugfestigkeiten im Material vorhanden. Die Steinoberflächen brechen in etwa 1 mm dünnen Schichten aus.

Aus den Untersuchungen ergibt sich, dass die Steinoberflächen und die oberflächen-nahen Schichten im Stein selbst Schwachstellen im Verbund mit Beschichtungssystemen wie z.B. Steinerergänzungsmörteln darstellen. Diese Schwachstellen konnten an den Testflächen durch die im Sommer 2005 ausgeführten Festigungsmaßnahmen an den beprobten Stellen nicht beseitigt werden.

### **7.1.2. Ermittlung des Wasseraufnahmevermögens an Stein- und Mörteloberflächen**

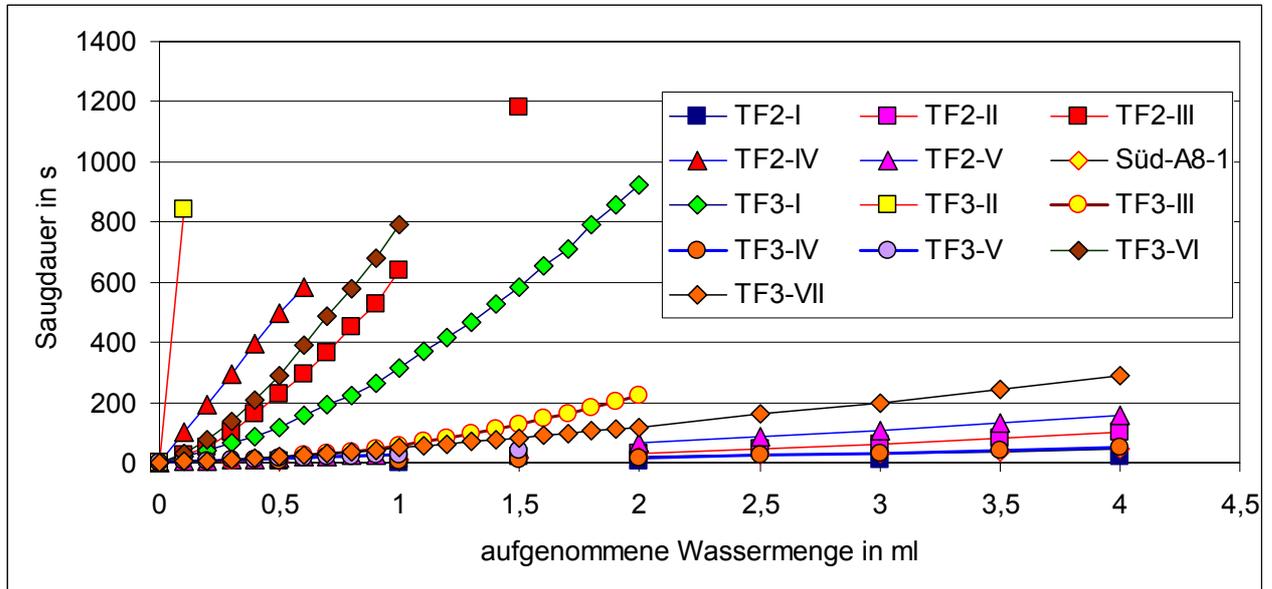
Ein großer Teil der Schäden an den in den Arkaden verbauten Lettenkohlendsteinen ist auf die Einwirkungen von Feuchtigkeit und damit verbundener teils dramatischer Veränderungen von Gesteinseigenschaften zurückzuführen. Aus diesem Grund waren die Arkaden ursprünglich farbig gefasst. Die Farbe hatte somit nicht nur eine ästhetische Funktion sondern auch eine Schutzfunktion.

Ein Ziel bei der Sanierung der Arkaden muss die Verbesserung des Witterungsschutzes sein. Der Weg über Maßnahmen direkt im Stein (Festigungen) ist begrenzt. Direkte Hydrophobierungen der Steinoberflächen dürfen zur Vermeidung von dramatischen Steinschäden nicht ausgeführt werden. Somit bleibt nur der Schutz über Beschichtungen (Anstriche, Schlämmen). Um die Notwendigkeit dieser Maßnahmen zu untermauern, wurden Untersuchungen zum kapillaren Wasseraufnahmevermögen an Pfeileroberflächen durchgeführt.

**Tabelle 7-2: Beschreibung der Proben**

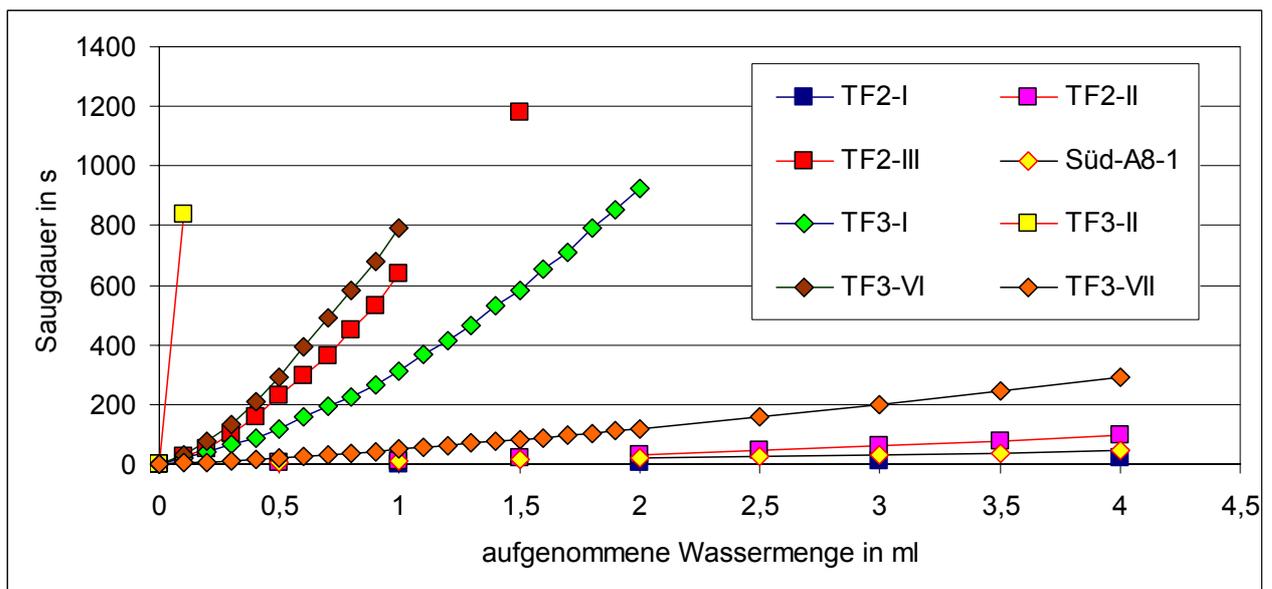
<b>Probe</b>	<b>Exposition der Fläche / Schadbild</b>	<b>Material</b>	<b>Angaben zur Oberflächenbehandlung</b>
<b>Pfeiler TF 2</b>			
TF2-I	Exposition nach Osten 1. Steinreihe unter dem Gesims / oberflächenparallele Abblätterungen und Absandungen	Lettenkohlendstein	Festigung mit KSE 300 E im Sommer 2005
TF2-II	wie TF2-I – 2. Steinreihe unter dem Gesims	Lettenkohlendstein	Festigung mit KSE 300 E im Sommer 2005
TF2-III	wie TF2-I – 3. Steinreihe unter dem Gesims	Lettenkohlendstein	Festigung mit KSE 300 E im Sommer 2005
TF2-IV	Exposition nach Norden 1. Steinreihe unter dem Gesims / oberflächenparallele Abblätterungen und Absandungen	Lettenkohlendstein mit Schlämme	Festigung mit KSE 300 E im Sommer 2005 und Beschichtung mit einer Schlämme (hell)
TF2-V	Exposition nach Norden 1. Steinreihe unter dem Gesims / oberflächenparallele Abblätterungen und Absandungen	Lettenkohlendstein mit Schlämme	Festigung mit KSE 300 E im Sommer 2005 und Beschichtung mit einer Schlämme (dunkel – höherer Pigmentanteil)
<b>Pfeiler westlich des Pfeilers TF2</b>			
Süd-A8-I	Exposition nach Osten 1. Steinreihe unter dem Gesims / oberflächenparallele Abblätterungen und Absandungen	Lettenkohlendstein	keine konservatorischen Maßnahmen
<b>Pfeiler TF-3</b>			
TF3-I	Exposition nach Norden 3. Steinreihe unter dem Gesims / nahezu schadfrei mit Bearbeitungsspuren	Lettenkohlendstein	keine konservatorischen Maßnahmen
TF3-II	Exposition nach Norden 4. Steinreihe unter dem Gesims / verwittrte Oberfläche, keine Bearbeitungsspuren mehr erkennbar	Lettenkohlendstein	Festigung mit KSE 100 im Sommer 2005
TF3-III	Exposition nach Norden 2. Steinreihe unter dem Gesims / keine sichtbaren Schäden	Verfugmörtel	Verfugmörtel wurde im Sommer 2005 eingebracht
TF3-IV	Exposition nach Norden 4. Steinreihe unter dem Gesims / keine sichtbaren Schäden	Steinergänzungsmörtel in einer Schichtdicke von 2 cm	Der Mörtel wurde im Sommer 2005 nach Vorfestigung mit KSE 100 aufgebracht.
TF3-V	Exposition nach Westen 1. Steinreihe unter dem Gesims / keine sichtbaren Schäden	Steinergänzungsmörtel in einer Schichtdicke von 1 bis 1,5 cm	Der Mörtel wurde im Sommer 2005 nach Vorfestigung mit KSE 100 aufgebracht.
TF3-VI	Exposition nach Westen 1. Steinreihe unter dem Gesims / deutlich sichtbare Bearbeitungsspuren und Farbreste	Lettenkohlendstein	keine konservatorischen Maßnahmen
TF3-VII	Exposition nach Westen 5. Steinreihe unter dem Gesims unmittelbar über dem Sockel / oberflächenparallele Abblätterungen und Absandungen	Lettenkohlendstein	keine konservatorischen Maßnahmen

Die Ermittlung der kapillaren Wasseraufnahme erfolgte mit Prüfröhrchen nach Karsten. In den nachfolgenden Abbildungen sind die Ergebnisse der Wasseraufnahmeversuche zusammengestellt. Dargestellt wurde die Saugdauer der über das Prüfröhrchen aufgenommenen Wassermenge.



**Abb. 7-1: Saugverhalten von unterschiedlich vorbehandelten Lettenkohlendandsteinoberflächen, Steinerfüllungs- und Verfugmörteln**

Das Saugverhalten der hier untersuchten Oberflächen variiert extrem. Es gibt Proben, die nehmen in weniger als drei Minuten 4 ml Wasser auf und solche die in 15 Minuten nur 0,1 ml aufnehmen. In den nachfolgenden Abbildungen sind Probengruppen aus der Abbildung 7-1 auszugswise zusammengestellt.

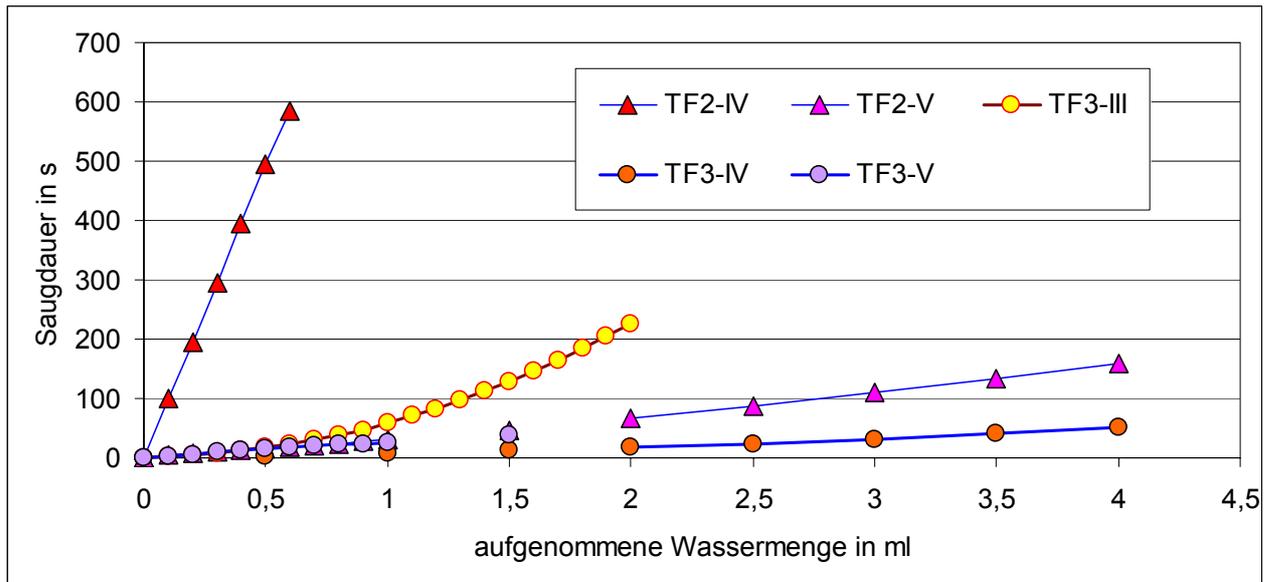


**Abb. 7-2: Saugverhalten von unbehandelten Lettenkohlendandsteinen und gefestigten Steinen**

In Abbildung 7-2 ist das Saugverhalten von unbehandelten Lettenkohlendsteinen und gefestigten Steinen dargestellt. Die Saugkurven der gefestigten Steine sind mit Quadraten gekennzeichnet und die der unbehandelten Oberflächen mit Rhomben.

Es sind hier keine signifikanten Unterschiede zwischen gefestigten und ungefestigten Steinen nachweisbar. Die Variationsbreite beider dargestellter Gruppen ist gleich.

Auswirkungen von Festigungsmaßnahmen können wahrscheinlich nur bewertet werden, wenn gleiche Teilflächen vor und nach der Festigung untersucht werden.



**Abb. 7-3: Saugverhalten von Steinoberflächen mit Schlämmen, Steinerfüllungsmörteln und Verfugmörteln im Einbauzustand**

Das Saugverhalten der Steinerfüllungsmörtel (mit Kreis gekennzeichnet), des Verfugmörtel (mit Kreis, innen gelb, gekennzeichnet) und der Steinflächen mit Schlämmen (mit Dreieck gekennzeichnet) umfasst das gleiche Spektrum wie das der Lettenkohlendsteine selbst.

In der nachfolgenden Abbildung 7-4 ist das Saugverhalten von unbehandelten Steinoberflächen mit unterschiedlichen Erhaltungszuständen zusammengestellt.

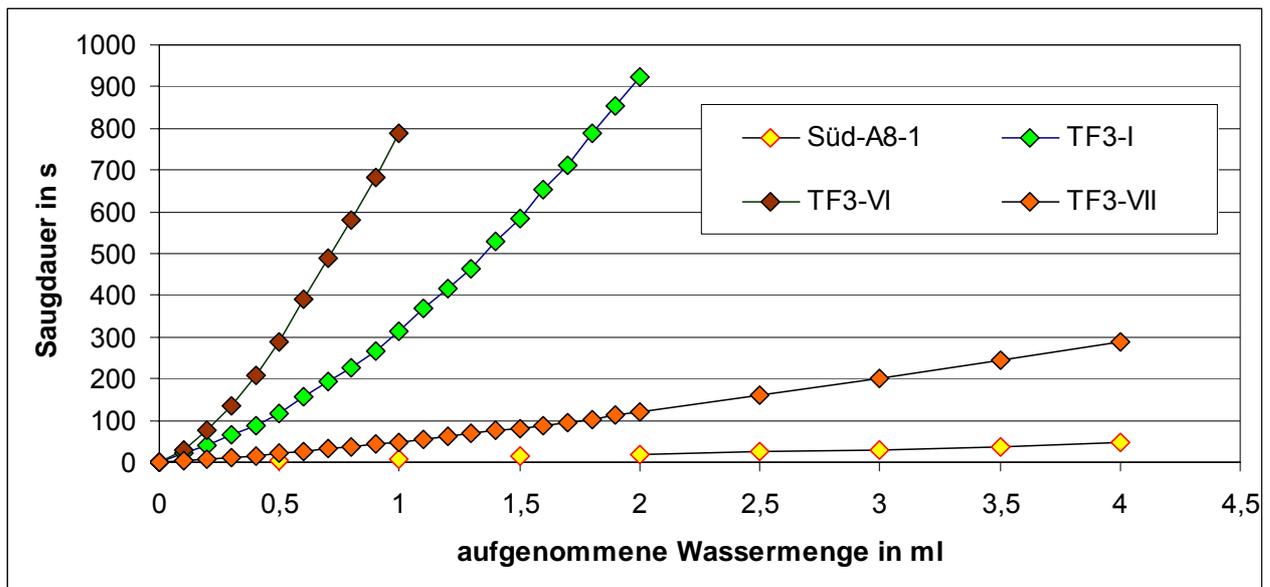


Abb. 7-4: Saugverhalten von unbehandelten Steinoberflächen

Es kann festgestellt werden, dass die Steine mit nahezu ungeschädigten Oberflächen („TF3-I“ und „TF3-VI“), an denen noch Bearbeitungsspuren sichtbar und Farbreste vorhanden waren, wesentlich langsamer Wasser aufnehmen als Steine („Süd-A8-1“ und „TF3-VII“) mit absandenden und abblätternen Oberflächen. Die Untersuchungen zeigen, dass scheinbar ein Zusammenhang zwischen Schädigungsgrad der Steinoberflächen und dem Wasseraufnahmevermögen besteht. Das Wasseraufnahmevermögen wird durch die Festigungsmaßnahmen nicht signifikant verändert bzw. die Veränderungen sind hier nicht immer eindeutig erfassbar.

Die auf den Testflächen eingesetzten Steinerfüllmörtel und Verfugmörtel besitzen im Einbauzustand ein mit leicht vorgeschädigten Lettenkohlendandsteinen vergleichbares Wasseraufnahmevermögen. Das Wasseraufnahmevermögen von vorgeschädigten Steinoberflächen muss durch präventive Maßnahmen (Anstriche oder Schlämmen) reduziert werden. Nur auf diese Weise kann die weitere Rückwitterung der Steine verhindert und deren Tragfähigkeit bewahrt werden.

### 7.1.3. Weiterentwicklung von Rezepturen für Mörtel und Schlämmen

Während einer Bemusterung im Frühjahr 2006 wurde eine weitere Abstimmung der Schlämme vereinbart. Die Oberflächenstrukturen der angewitterten Steine sollten sichtbar bleiben, der Farbton an den der Steine angepasst und die Verarbeitungseigenschaften verbessert werden.

Die historischen Mörtel in den Fugen sind weiß. Da nach der Sanierung und Herstellung der historischen Farbfassung im Laufe der weiteren Nutzung mit Abblättern der Anstriche gerechnet werden muss, sollen die zur Verfugung eingesetzten neuen Mörtel in Anlehnung an die im Bestand vorhandenen Farbreste und unter Berücksichtigung der Färbung der ebenfalls verbauten Rättsandsteine eingefärbt werden.

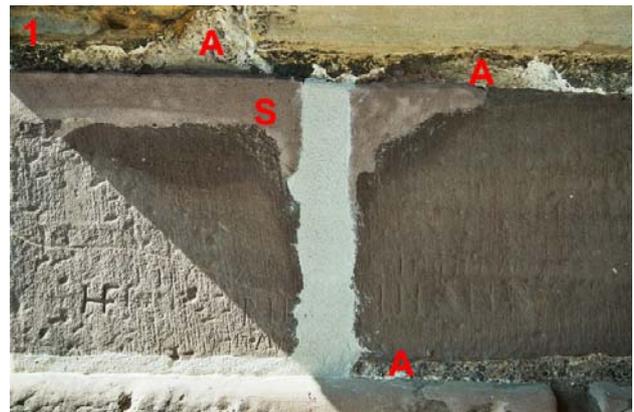
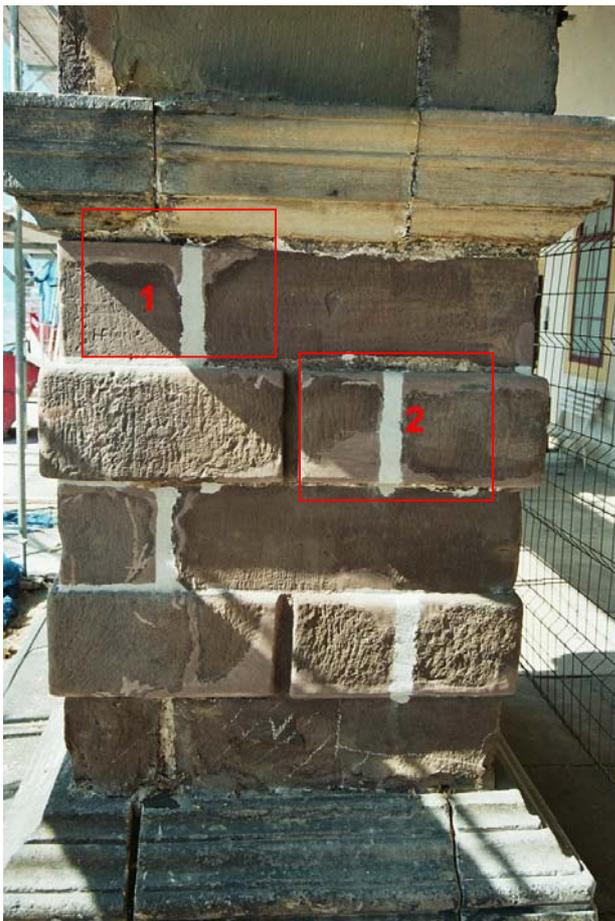
Mit Beginn der Arbeiten an der Musterachse im Bereich der Osthälfte der Arkaden auf der Südseite des Schlosshofs wurde von der Ausführungsfirma der Wunsch nach Einsatz eines Baustellenmörtels für den Versatz von Neusteinen geäußert. In Abstimmung mit der Projektleitung ist die Rezepturanpassung zusätzlich in die Untersuchungen aufgenommen worden.

### Abstimmung der Farbigkeit von Verfumörteln:

Zur partiellen Neuverfugung und für Ausbesserungen an Verfugungen waren drei Rezepturen entwickelt worden.

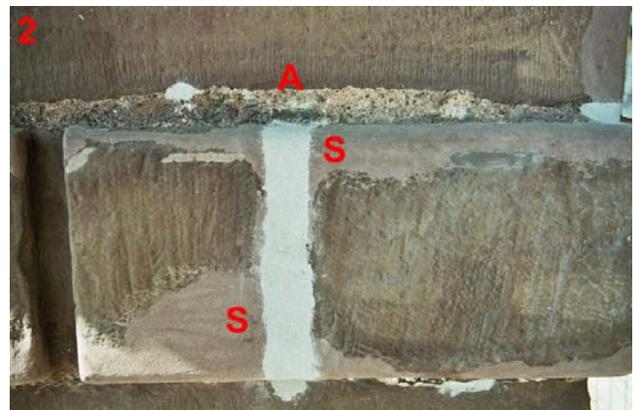
Zwei dieser Rezepturen sind an den durch die FH Erfurt im Sommer 2005 angelegten Testflächen zum Einsatz gekommen. Für die Auffüllung von tiefen Fehlstellen wurde Mörtel der Rezeptur „M4-50-DTD1“ (auch mit Schieferstücken als Zwickelmaterial) eingesetzt und für den äußeren Bereich der Fuge Mörtel der Rezeptur „GOFRV1“.

An den Testflächen waren nach einem Jahr Standzeit keine sichtbaren Schäden nachweisbar. In den nachfolgenden Bilder sind typische Bereiche dargestellt.



Bildausschnitt 1

Bildausschnitt 2



### **Bilder 7-1 bis 7-3:**

**Nach Süden exponierte Testflächen: Es können gute Anbindungen an alle vorkommenden Materialien („A“ – Altmörtel, „S“ – Steinerfüllungsmörtel) festgestellt werden.**

Eine Einfärbung der Verfugmörtelrezeptur GOFRV1 ist optional vorgenommen worden. Der Verfugmörtel im historischen Bestand selbst ist weiß (Kalk als Bindemittel). Auf der Oberfläche befinden sich aber auch ockerfarbige Fassungsreste.

Zur farblichen Anpassung an die gegenwärtige Bestandsituation (ockerfarbige Farbreste, Vierungen und Steinaustausch mit Rätssandsteinen) sind pigmentierte Varianten des an der Testfläche eingesetzten Verfugmörtels erarbeitet worden.

Im nachfolgenden Bild sind pigmentierte Varianten der Rezeptur GOFRV1 zusammengestellt.



**Bild 7-4:**

**Muster für die Verfugung an den Pfeilern und Bögen der Arkaden**

Für den Einsatz an den Musterflächen ist die Rezeptur GOFRV1F-0,5 ausgewählt worden.

Für den Einsatz am Objekt wurde die Verwendung von werksmäßig vorgemischtem Trockenmörtel nach der angegebenen Rezeptur empfohlen. Eine exakte Dosierung der Mörtelbestandteile unter Baustellenbedingungen ist nicht möglich.

#### Abstimmung der Farbigkeit von Schlämmen:

Im Sommer des Jahres 2005 waren in der MFPA entwickelte Schlämme auf der Basis von Acrylatdispersion als Bindemittel bereits an Testflächen durch die FH Erfurt erprobt worden.

Auf der Basis dieser Erprobung sind weitere Entwicklungen vorgenommen worden.



**Bilder 7-5 und 7-6:**

**Testflächen mit acrylatgebundenen Schlämmen (A=wenig pigmentiert, B=stärker pigmentiert)**

Beide Schlämmen (mit „A“ und „B“ gekennzeichnet) unterscheiden sich lediglich im Pigmentgehalt. Nach einem Jahr Standzeit waren visuell keine Veränderungen an den Oberflächen wahrnehmbar. In der Rezepturvariante „A“ hatte die strukturelle Anpassung das Primat vor der Farbanpassung.

Bei der Weiterentwicklung ging es vor allem um die Farbanpassung und die Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften. Ziel war die Beibehaltung der Struktur nach Variante A und das Erreichen einer Färbung nach der Variante B.

#### Erarbeitung einer Baustellenmischung für das Versetzen von Neusteinen:

Neben der Ergänzung von Fehlstellen durch Steinergänzungsmörtel und durch Vierungen müssen ganze Steine neu versetzt werden. Dafür sind geeignete Mauermörtel erforderlich.

Basis für die nachfolgende Rezepturanpassung waren die Belastungssituation im Bestand und Sande, die die Ausführungsfirma für Baustellenmischungen einsetzen wollte.

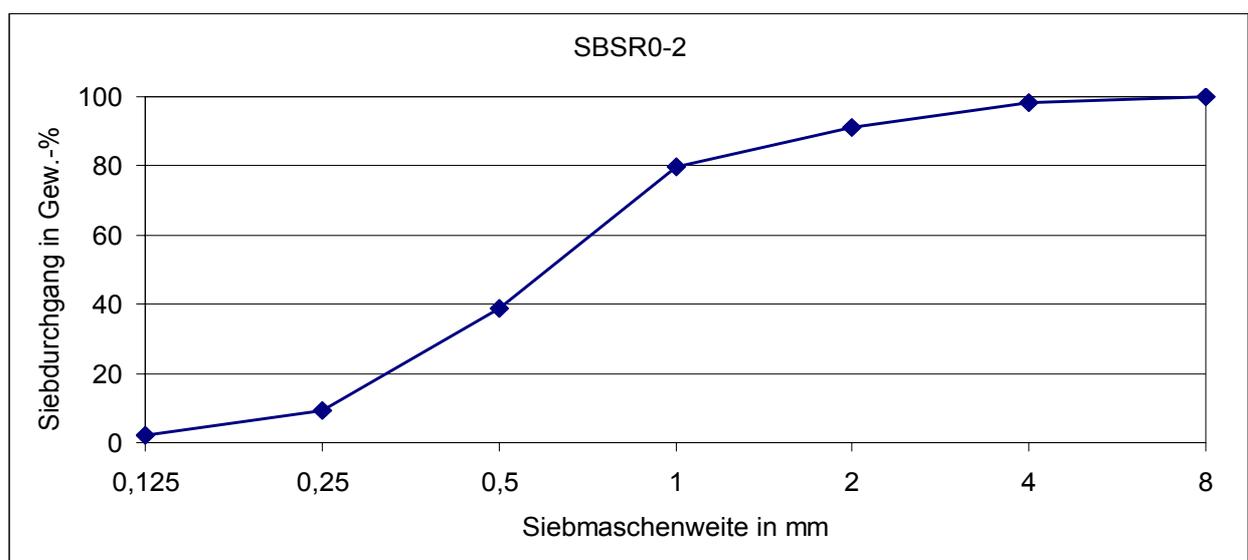
Bereitgestellt wurde ein als „Sandsteinbrechsand Rimberger Sand 0 – 2“ bezeichnetes Material. Nachfolgend ist dieser Sand als „SBSR0-2“ gekennzeichnet.

Vom angelieferten Sand ist unmittelbar nach der Übergabe der Feuchtegehalt durch Trocknung bei 105°C und vier Tage nach der Lagerung bei Raumklima (etwa 22°C und 60% rel. Luftfeuchte) bestimmt worden. Unmittelbar nach der Anlieferung betrug die Materialfeuchte 8,7 Gew.-% und nach vier weiteren Tagen 6,5 Gew.-%. Damit soll verdeutlicht werden, dass die Lagerungsbedingungen des Sandes erhebliche Auswirkungen auf die Eigenschaften der damit hergestellten Mörtel haben können.

Bei der Bindemittelauswahl musste die Sulfatbeständigkeit berücksichtigt werden. Aus dem Grund sind ein Portlandzement CEM I/42,5/HS/NA und ein Kalkhydrat der Qualität CL90 ausgewählt worden.

Für die Berechnung von Mischungsverhältnissen sind Informationen zur Zusammensetzung der Sande erforderlich [9].

Die Sieblinie ist an einer repräsentativen Teilprobe, die zuvor bei 105°C getrocknet wurde, bestimmt worden.



**Abb. 7-5: Siebdurchgangslinie des Sandes SBSR0-2**

Nach Simulationsberechnungen und labortechnischen Untersuchungen zur Abstimmung von Wasserzugaben zur Einstellung einer verarbeitungsgerechten Konsistenz als Mauermörtel sind für die beiden nachfolgenden Rezepturen orientierende Kennwertbestimmungen vorgenommen worden.

**Tabelle 7-3: Rezepturen für Mauermörtel (Angaben in Gewichtsteilen)**

Bezeichnung	feuchter Sand* SBSR0-2	Kalkhydrat CL90	Zement CEM I/42,5/HS/NA	Wasserzugabe
SFG-MW7	1500*	72	144	290
SFG-MW6	1500*	84	168	340

\* Der Wassergehalt betrug etwa 6 Gew.-%.

Nach den angegebenen Rezepturen sind Mörtelprismen (4x4x16 cm) hergestellt worden. Die Lagerung erfolgte einen Tage in der Form danach 6 Tage bei 95% rel. Luftfeuchte und 20°C und anschließend bei 20°C und 65% rel. Luftfeuchte.

Bestimmt wurden Orientierungswerte für den dynamischen E-Modul sowie für die Biegezug- und Druckfestigkeit nach 28 Tagen.

**Tabelle 7-4: Orientierungswerte für Mörtelcigenschaften nach 28Tagen Verfestigungsdauer**

Bezeichnung	dyn. E-Modul in kN/mm <sup>2</sup>	Dichte in kg/m <sup>3</sup>	Biegezugfestigkeit in N/mm <sup>2</sup>	Druckfestigkeit in N/mm <sup>2</sup>
SFG-MW7	4,22	1772	0,9	3,5
SFG-MW6	3,43	1728	0,7	3,3

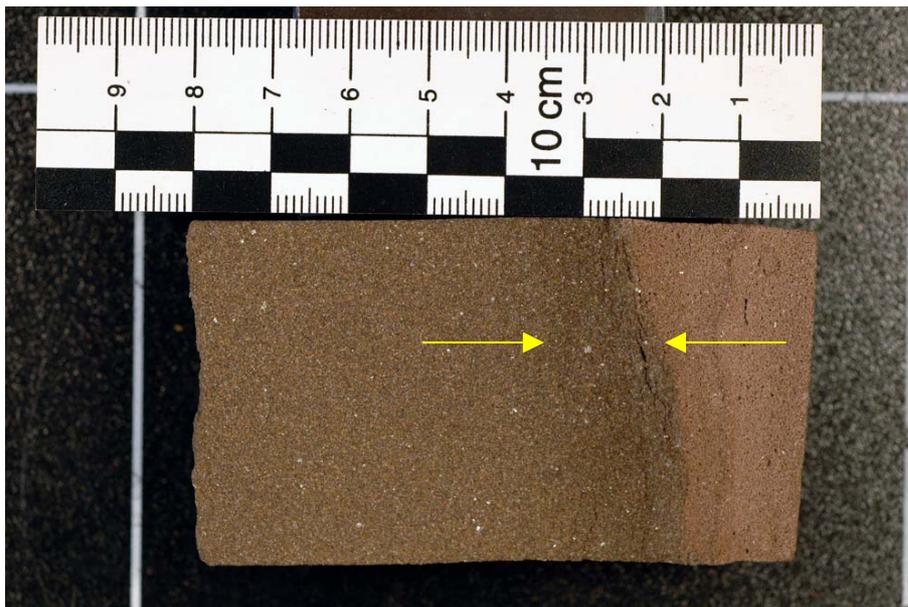
## 7.2. Nachuntersuchungen zur Steifigung

### 7.2.1. Ergebnisse

Bei visueller Betrachtung der gefestigten Steinflächen und beim mechanischen Abreiben konnten keine Einschränkungen hinsichtlich des Festigungserfolges festgestellt werden. Die Steinoberflächen sandeten nicht ab, Abschuppungen konnten so konsolidiert werden, dass ein Schlämmen möglich wurde.

Um die Eindringtiefe des Steifigers zu überprüfen, wurde ein Bohrkern gezogen. Dabei konnte bereits durch die bestehende Dunkelfärbung des Steins in Bereichen die mit KSE 300 E getränkt worden waren, die Eindringtiefe festgestellt werden. Es zeigte sich, dass die Eindringtiefe dieses Festigers nur etwa 10 bis 15 mm beträgt (Bild 7-7).

Dieses Ergebnis korreliert mit den Erkenntnissen aus den Laboruntersuchungen, bei denen das Eindringverhalten des elastifizierten Kieselsäureesters beim Gothaer Lettenkohlendstein deutlich schlechter war, als das der unelastifizierten Kieselsäureester.



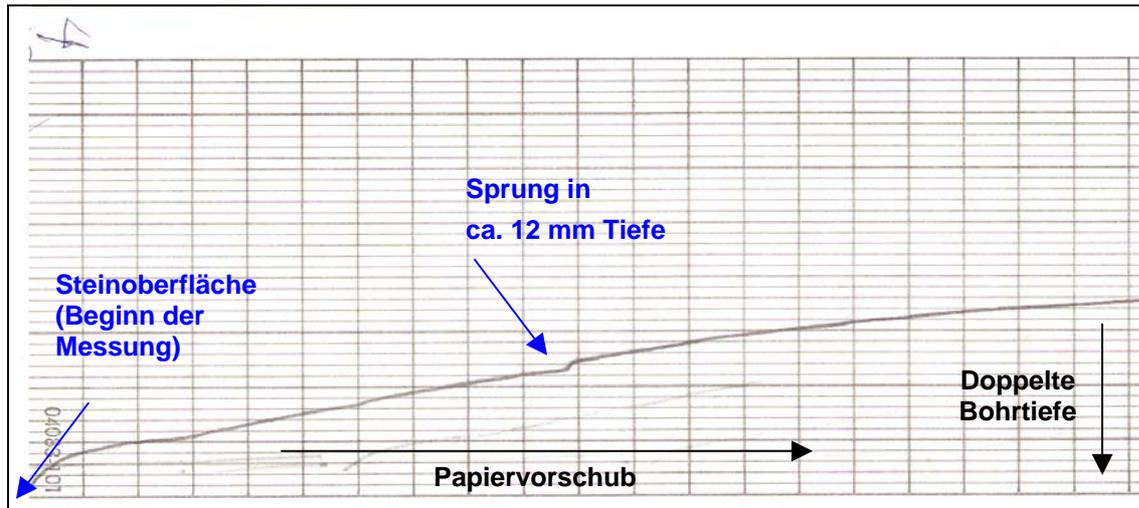
**Bild 7-7: Profilschnitt eines Bohrkerns aus dem Probepfeiler der Arkadenostseite (TF 3)**

Rechts befindet sich der Restauriermörtel (hellbraun) auf der schräg verlaufenden ehemaligen Steinoberfläche. Links daneben deutet sich durch eine geringfügige Verdunklung in einer Stärke von 10 bis 15 mm der gefestigte Bereich an (Pfeile).

Es ist auch zu erkennen, dass kurze, feine Risse vom Festiger „umflossen“ wurden, so dass auch dahinter liegenden Bereiche getränkt wurden.

Zusätzlich wurde am Probepfeiler der Ostseite (TF3) eine Bohrwiderstandsmessung an einer weiteren mit KSE 300 E gefestigten Stelle (ohne Aufmörtelung von Restauriermörtel und ohne Schlämme) durchgeführt.

Dabei wurde in ca. 12 mm Tiefe ein geringer Versprung festgestellt, der die Eindringgrenze des Steinfestigers markieren könnte (Bild 7-8).



**Bild 7-8: Bohrdiagrammkurve der Probe TF 3 an der Musterfläche mit einem Härtesprung in ca. 12 mm Steintiefe**

Es ist allerdings festzustellen, dass sich der Kurvenanstieg nach diesem Sprung nicht signifikant verändert. Es wäre eigentlich zu erwarten gewesen, dass der Kurvenanstieg in den ungefestigten Bereichen steiler wird. Das dies nicht so ist, könnte auch auf ein ausgeglichenes Festigkeitsprofil hindeuten.

Trotzdem ist die Eindringtiefe mit 12 mm als zu gering einzuschätzen, da die gestörte, verwitterte Steinzone beim Gothaer Lettenkohlendstein ca. 30 mm beträgt. Dieser Bereich muss im Rahmen der Steinfestigung mindestens überbrückt werden, um an den gesunden Steinbestand anzuschließen.

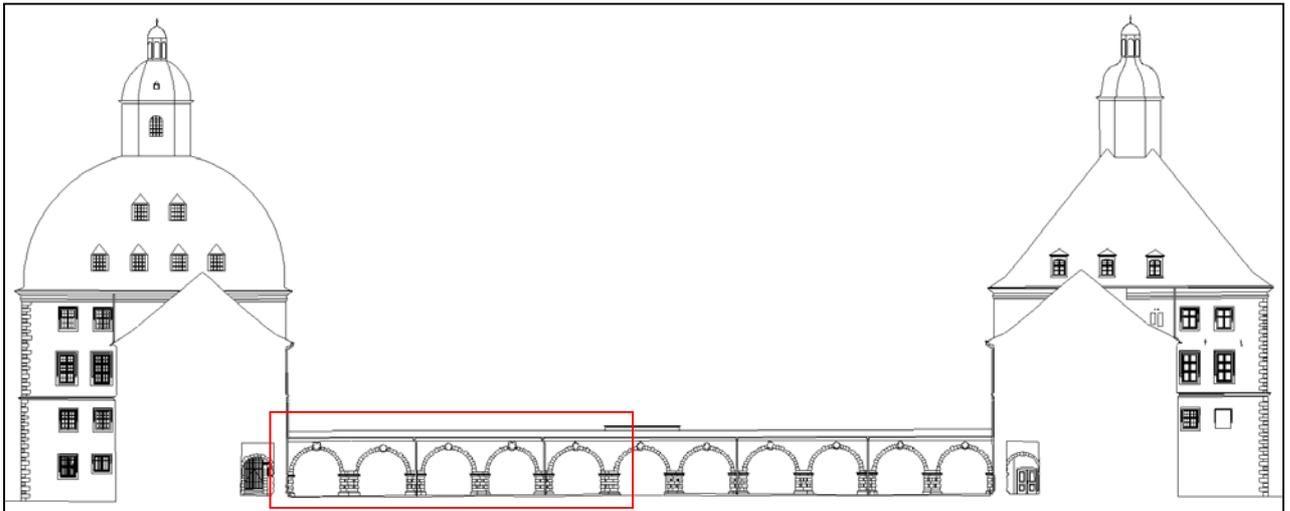
### **7.2.2. Schlussfolgerungen für die Anwendung an einer Musterachse**

Im Ergebnis der Laboruntersuchungen und der Probefestigung sollte an der großflächigen Musterachse eine **aufbauende Festigung** mit Kieselestern **ohne elastifizierende Komponenten** erfolgen. Dabei sollte die Gelabscheidungsrate mindestens 10 % und maximal 30 % betragen. Es muss der niedrigmolekulare, gut eindringende KSE 300 verwendet und durch Verdünnung auf die entsprechenden Wirkstoffkonzentrationen gebracht werden. Welche Wirkstoffkonzentration im konkreten Fall eingesetzt werden muss, ist abhängig vom Entfestigungsgrad des Steins und muss vor Ort überprüft werden.

## 8. Umsetzung der Ergebnisse an einer großflächigen Musterachse

### 8.1. Zielstellung

Auf Grundlage der Voruntersuchungen und der Erkenntnisse aus den Probeflächen wurde eine großflächige Musterachse im Bereich der Südarkaden angelegt, an der die für geeignet befundenen Materialien und Technologien zur Konservierung und Restaurierung des Gothaer Lettenkohlendandsteins angewandt wurden. Die Musterachse beinhaltet 6 Pfeiler (alle Seiten) und die zwischen ihnen liegenden Bögen (Abbildung 8-1).



**Abb. 8-1: Südarkaden des Schlosshofes mit Kennzeichnung der Musterachse**

Zuvor erfolgte eine detaillierte Kartierung der Schäden an den Werksteinen, die die Grundlage für alle weiteren Dokumentationsarbeiten darstellte. Ein exemplarisches Beispiel für die Vorzustandskartierung kann der Anlage 2 entnommen werden.

Für die Konservierungs- und Restaurierungsarbeiten wurde folgende Zielstellung formuliert:

- Entfernung schädigender Auflagerungen (Salze, Krusten, dichte Altanstriche)
- Entfernung von zementgebundenen oder schadhafte Mörtelergänzungen
- Entfernung von Eisenteilen, sofern sie nicht aus statischer oder bauhistorischer Sicht erforderlich sind
- Aufbauende Festigung geschädigter Werksteine bis in eine Tiefe von mind. 3 cm
- Klebung, ggf. Fixierung und Anböschung von Schalenbildungen
- Klebung, ggf. Klammerung und Verschluss von Rissbildungen
- Steinerergänzungen an kleinen Fehlstellen mit Restauriermörtel
- Steinersatz an großen Fehlstellen mit Sandstein
- Schlämmen von abschuppenden Oberflächen (nach einer konsolidierenden Festigung), so dass die Schuppen an das Kerngestein angebunden und Angriffspunkte für die Verwitterung minimiert werden
- Neuverfugung
- Schutz der Steinoberflächen vor Niederschlägen

Da bei den Lettenkohlendsteinen dem Oberflächenschutz, d.h. dem Fernhalten von Feuchtigkeit, eine zentrale Rolle zukommt, sich hydrophobierende Imprägnierungen aber nicht bewährt haben, wurde festgelegt, die Werksteine der Arkaden mit einem schützenden Anstrich zu versehen. Dieser Anstrich war auch insofern gerechtfertigt, als er historisch belegt ist.

Eine Farbgebung an den Werksteinen verlangt einen höheren Ergänzungsgrad, als bei ungefassten Oberflächen, deshalb waren Steinergänzungen erforderlich, die über das rein konservatorische Maß hinaus gehen. Im Sinne der Ablesbarkeit der Form sollten Ecken und wichtige Kanten ergänzt werden, interne Fehlstellen in den Binnenflächen jedoch erhalten bleiben, wenn sie die Wasserführung nicht beeinträchtigen. Vierungen und Steinergänzungen sollten auch nach einem Anstrich ablesbar bleiben.

## 8.2. Durchgeführte Maßnahmen

Die Erstellung der Musterfläche erfolgte in zwei Bauabschnitten vom Juli bis Oktober 2006 und vom März bis Juli 2007. Die Unterbrechung wurde erforderlich, als sich herausstellte, dass die Gründung der Pfeiler nicht mehr in Ordnung war und statische Sicherungsmaßnahmen vorgenommen werden mussten. Dadurch konnte der Zeitplan des Projektes nicht mehr eingehalten und es musste eine Verlängerung beantragt werden. Die Vergabe der Arbeiten erfolgte im Rahmen einer beschränkten Ausschreibung an die Steinrestaurierungsfirma Morgenweck. Die Betreuung und Kontrolle der Arbeiten erfolgte durch das Ingenieurbüro für Steinsanierung. Die durchgeführten Maßnahmen und der Zeitpunkt ihrer Ausführung können der folgenden Tabelle entnommen werden. Im Anhang befindet sich ein Beispiel für die Kartierung der Maßnahmen an der Musterfläche.

**Tabelle 8-1: Maßnahmen an der Musterfläche**

Maßnahmen	Beschreibung / verwendete Materialien	Zeitpunkt der Ausführung
<b>Vorbereitende Arbeiten</b>		
Entfernung von Mörtelplomben	Manuelle Entfernung zementgebundener und schadhafter Mörtelergänzungen mit Steinmetzwerkzeugen	Juli 2006
Entfernung des Fugenmörtels	Manuelle Entfernung zementgebundener und schadhafter Fugenmörtel mit Steinmetzwerkzeugen. Bei zementgebundenen Fugen wurde z.T. vorher ein Entspannungsschnitt mittels Trennschleifer vorgenommen, ohne die Steinflanken dabei zu verletzen.	Juli 2006
Entfernung von Eisenteilen	Ausbohren (mit Schlagbohrmaschinen) von Eisenteilen, die keinen historischen Wert oder statische Funktionen hatten. Einzelne große Eisen wurden mittels Kernbohrung entfernt. Einzelne Teile wurden mit einer Zange gezogen.	Juli 2006
<b>Reinigung</b>		
Entfernung von Krusten und Altanstrichen	Fest anhaftende Versinterungen, Krusten und Altanstriche wurden durch mechanische Bearbeitung gedünnt oder entfernt (Krustenhammer, Glasfaserpinsel, Skalpell etc.)	August 2006
Pulverwirbelstrahlreinigung mit Normaldüse	Reinigung der Werksteine mit einem Pulverwirbelstrahlverfahren (Kleffler). Düse: Standarddüse der Fa. Clemco; Luftdruck: 1,9 Pa, Reinigungsabstand ca. 40 cm; Strahlgut: Asilit Fa. ASIKOS A0	August 2006

**Tabelle 8-1 (Fortsetzung): Maßnahmen an der Musterfläche**

Maßnahmen	Beschreibung / verwendete Materialien	Zeitpunkt der Ausführung
<b>Steinfestigung</b>		
Basisfestigung	Basisfestigung aller Lettenkohlsandsteine mit Kieselsäureester Funcosil 300 (Fa. REMMERS) verdünnt mit Lösungsmittel V110 im Verhältnis 1:2 (Wirkstoffgehalt ca. 10 %). Applikation 2 x flutend mittels Sprühpumpen der Fa. Gloria nass in feucht, Verbrauch: ca. 9 l/m <sup>2</sup>	2. Augsthälfte 2006
Hauptfestigung	Hauptfestigung aller Lettenkohlsandsteine mit Kieselsäureester Funcosil 300 (Fa. REMMERS) verdünnt mit Lösungsmittel V110 im Verhältnis 1:0,5 (Wirkstoffgehalt ca. 20 %). Applikation 2 x flutend mittels Sprühpumpen der Fa. Gloria nass in feucht, Verbrauch: ca. 9 l/m <sup>2</sup>	1. Septemberhälfte 2006
Nachfestigung	Nachfestigung aller Lettenkohlsandsteine mit Kieselsäureester Funcosil 300 (Fa. REMMERS) verdünnt mit Lösungsmittel V110 im Verhältnis 1:0,5 (Wirkstoffgehalt ca. 20 %). Applikation 2 x flutend mittels Sprühpumpen der Fa. Gloria nass in feucht, Verbrauch: ca. 9 l/m <sup>2</sup>	2. Septemberhälfte 2006
<b>Schalen- und Rissanierung</b>		
Schalen- und Rissanierung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reinigung, ggf. Aufweitung der Rissufer</li> <li>- aufbauende Festigung der Rissufer mit EP-Harz-Lösung (Epilox T19-32 10 %ig in Toluol-Aceton)</li> <li>- punktuelle Überbrückung/Verklebung der Schale mit niedrigviskosem EP-Harz (Epilox T19-32 30 %ig in Toluol-Aceton) (bei Erfordernis auch durch Anbohren der Schale)</li> <li>- Verschluss der Schalen- und Rissbildung, ggf. auch der Bohrlöcher mit Hinterfüllmassen auf Acrylatbasis</li> <li>- Anböschern mit Restauriermörtel auf Acrylatbasis</li> </ul>	August 2006
Verklammerung von Rissen	Durchgerissene Werksteine oder große Schalenbildungen erhielten eine Verdübelung aus Glasfieberdübeln mit schnell härtendem Multicompoundsystem der Fa. Berber	August 2006
<b>Vierungen und Neuteile</b>		
Vierungen aus Seeberger Rätsandstein an den Pfeilern	In Bereichen, die bereits ursprünglich aus Rätsandstein bestanden (Zwischen- und Sockelgesimse) wurden bei großen Schadstellen Vierungen und (in Einzelfällen) Neuteile aus Seeberger Sandstein eingebaut. Außerdem wurden an den Pfeilern in Bereichen, in denen sich bereits Altergänzungen aus Seeberger Sandstein befanden, auch bei Fehlstellen im Lettenkohlsandstein, Vierungen aus Seeberger Sandstein eingebaut. Versatz der Vierungen mit ausreichend Platz für eine Hintermörtelung mit folgendem Mörtel: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Rimberger Sand (Feuchte ca. 6 Gew.-%); 8-9 Volumenteile</li> <li>- Zement CEM I/42,5/HS/NA; 1 Volumenteil</li> <li>- Kalkhydrat CL90; 1 Volumenteil</li> <li>- Wasser; nach erforderlicher Konsistenz</li> </ul> Bei Vierungen ohne ausreichend Platz für Hinterfüllung wurden diese punktuell mit EP-Harz Epoxy BH 100 (Fa. REMMERS) eingeklebt.	September/ Oktober 2006
Vierungen aus Lauterbacher Lettenkohlsandstein an den Pfeilern	An den Pfeilern erfolgten Vierungen mit geborgenem Altmaterial aus Lettenkohlsandstein aus Lauterbach bei Miha. Versatzmörtel wie vor	September/ Oktober 2006
Vierungen aus Freudenbacher Lettenkohlsandstein an den Bögen	An den Bögen erfolgten sämtliche Vierungen aus Freudenbacher Lettenkohlsandstein. Versatzmörtel wie vor	Mai/Juni 2007

**Tabelle 8-1 (Fortsetzung): Maßnahmen an der Musterfläche**

Maßnahmen	Beschreibung / verwendete Materialien	Zeitpunkt der Ausführung
<b>Statische Sicherungsmaßnahmen an den Pfeilern</b>		
Verfüllung von Hohlstellen	Verfüllung von Hohlstellen vor der eigentlichen Vernadelung Material: Injektionsschaummörtel nach Patent der Bauhaus-Uni Weimar, Trockenrohddichte begrenzt auf 0,6-0,8 kg/dm <sup>3</sup> - 25 kg Deuna HS Doppel - 12,5 l Wasser - 20 l Porschaum - 200 ml Stabilisator	Oktober 2006
Verdämmung von breiten Klüften	Verdämmung von sehr breiten Fugen und Klüften mit folgendem Mörtel: - CEM 3; 1 Volumenteil - Kalkhydrat CL 90; 1 Volumenteil - Sand; 8 Volumenteile	Oktober 2006
Vernadelung und Verankerung	Mauerwerksvernadelungen an den Pfeilern mit Edelstahlankern	November 2006
Ertüchtigung der Fundamente	Teilfundamentierung der Pfeilerfundamente 1-6 mit Beton	November 2006
<b>Steinergänzungen mit Restauriermörtel</b>		
Mineralische Steinergänzungen	Steinergänzungen an Fehlstellen des Seeberger Sandsteins und zum Unterfüttern tiefer Fehlstellen des Lettenkohlsandsteins mit einem mineralischen Steinrestauriermörtel (Fa. REMMERS)	Mai/Juni 2007
Acrylatische Steinergänzungen	Steinergänzungen am Lettenkohlsandstein Rezeptur nach Vorgabe MFPA: Rezeptur: <b>F0,2/5-GF</b> als Baustellenmischung vor Ort - Sand W12 (Quarzwerke Frechen) 135,2 g/kg Trockenmörtel - Sand F 36 (Quarzwerke Frechen) 831,3 g/kg Trockenmörtel - Kaolin (Dorfner Gruppe) 29,05 g/kg Trockenmörtel - Pigment Granufin „Moor“ (Rockwood Pigments Brockhues GmbH) 3,35 g/kg Trockenmörtel - Pigment Granifin „Mais“ (Rockwood Pigments Brockhues GmbH) 1,12 g/kg Trockenmörtel - 30 %ige Dispersion D340 (Wesutex GmbH) Verarbeitung wie folgt: - Ausarbeiten der Schadstelle - Benetzung mit einer 10 % igen Lösung des Acrylbindemittels - Auftragen des Restauriermörtels in Schichten von max. 15 mm - jeweils Aufkratzen der Sinterschicht vor Antragen einer neuen Schicht / Nachschleifen der fertigen Oberflächen	Mai/Juni 2007
<b>Schlämmen der Lettenkohlsandsteine</b>		
Schlämmen der Lettenkohlsandsteine	Aufbringen einer Schlämme auf Acrylatdispersionsbasis auf alle Lettenkohlsandsteine (auch auf Vierungen); Rezeptur nach Vorgabe MFPA: Rezeptur <b>SGSFB-A</b> als Sonderanfertigung (Fa. Romstedt, Kirchheim) - Sand SF 300 (Quarzwerke Frechen) 49 g - Sand W12 (Quarzwerke Frechen) 49 g - Sand F 36 (Quarzwerke Frechen) 140 g - Kaolin (Dorfner Gruppe) 4,97 g - Pigment Granufin „Moor“ (Rockwood Pigments Brockhues GmbH) 2,59 g - Pigment Granifin „Mais“ (Rockwood Pigments Brockhues GmbH) 0,84 g - 30 %ige Dispersion D340 (Wesutex GmbH); 55 g - Wasser; 10 g	Juli 2007

**Tabelle 8-1 (Fortsetzung): Maßnahmen an der Musterfläche**

Maßnahmen	Beschreibung / verwendete Materialien	Zeitpunkt der Ausführung
	Verarbeitung der Schlämme wie folgt: - Benetzung des Steins mit einer 25 % igen Lösung des Acrylbindemittels - Auftragen der Schlämme auf die noch feuchte Oberfläche - Einarbeiten (einmassieren) mittels Pinsel	
<b>Neuverfugung</b>		
Unterstopfen tiefer Fugen	Unterstopfen tiefer und breiter Fugen mit einem Mörtel folgender Rezeptur: - Rimberger Sand (Feuchte ca. 6 Gew.-%); 8-9 Volumenteile - Zement CEM I/42,5/HS/NA; 1 Volumenteil - Kalkhydrat CL90; 1 Volumenteil - Wasser; nach erforderlicher Konsistenz Nach dem Erhärten wurde die Sinterschicht entfernt.	Juni 2007
Neuverfugung	Neuverfugung aller Fugen Rezeptur nach Vorgabe MFPA: Rezeptur <b>GOFRV1F0,5m2</b> als Sonderanfertigung (Fa. Romstedt, Kirchheim) - Sand 0-0,25 mm (UsS Haida) 885,6 g - Sand F 36 (Quarzwerke Frechen) 221,40 g - Sand F 33 (Quarzwerke Frechen) 221,40 g - Kalkhydrat (CL90) - Portlandzement (CEM I/42,5/HS/NA), 109 g - Metastar (M402) 49 g - Pigment Granufin „Moor“ (Rockwood Pigments Brockhues GmbH) 1,6 g - Pigment Granifin „Mais“ (Rockwood Pigments Brockhues GmbH) 7 g - Methylcellulose (Tylose MH 10001P) 1,8 g - Dispersion (WPC) 12,6 g - Wasser 320 g Verarbeitung des Fugenmörtels wie folgt: - Benetzung des Steins mit Wasser - Verfugen der Fugen - Kratzen der Oberfläche nach der Erhärtung, um die Sinterschicht zu entfernen - Nachbehandlung innerhalb von 15 Tagen durch Besprühen mit Wasser und Folienverwahrung	Juli 2007

Die vorgesehene Farbfassung wurde bis zum Ende der Projektlaufzeit nicht aufgebracht, da noch kein Farbkonzept für die Schlosshoffassaden und -arkaden feststand.

### 8.3. Dokumentation der Maßnahmen

Die Dokumentation der Maßnahmen und der jeweiligen Rahmenbedingungen (Wetter, Temperaturen, Niederschlag) erfolgte kontinuierlich während des gesamten Zeitraums der Ausführung durch die Restaurierungsfirma und die Bauleitung in Form von Bautagebüchern und Protokollen. Die Arbeiten wurden fotografisch erfasst und kartiert. Durch die ausführende Firma wurde eine Maßnahmendokumentation angefertigt. Ein Beispiel für die Maßnahmenkartierung kann der Anlage 3 entnommen werden.

Tabelle 8-2: Fotodokumentation zur Durchführung der Arbeiten an der Musterfläche



Bild 8-1 und 8-2: Steinerergänzungen und Schalenanböschungen aus Acrylatmörtel



Bild 8-3: Einkleben von Mauerankern zur statischen Ertüchtigung der Pfeiler

Bild 8-4: Zustand eines Pfeilers nach der Fertigstellung der Sicherungsarbeiten und dem Ausarbeiten der Vierungen

Tabelle 8-2 (Fortsetzung): Fotodokumentation zur Durchführung der Arbeiten an der Musterfläche



Bild 8-5: Eindringtiefe (4-5 cm) des Festigers an senkrechten Bossen nach der Hauptfestigung



Bild 8-6: Eindringtiefe (ca. 1 cm) des Festigers an überhängenden Bossen nach der Hauptfestigung



Bild 8-7: Vierungen aus Lauterbacher Lettenkohlendstein (gelber Pfeil)

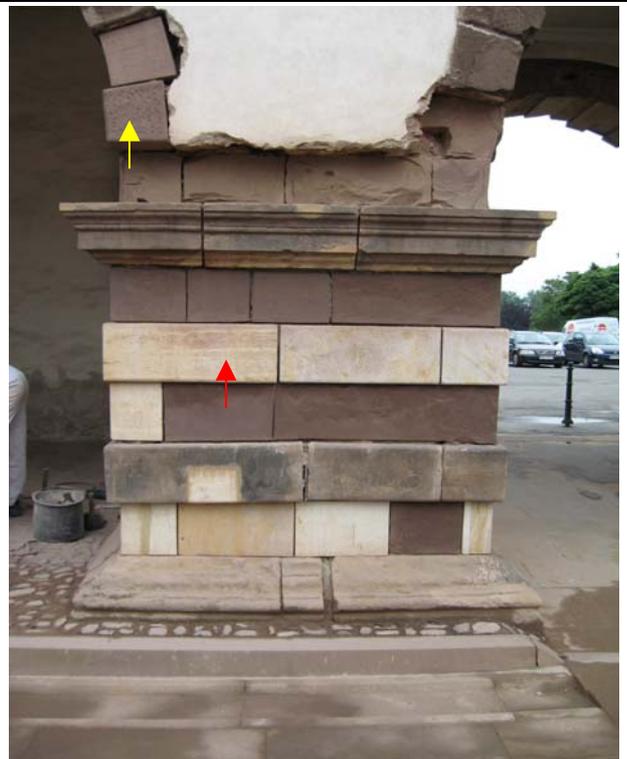


Bild 8-8: Vierungen aus Freudenbacher Lettenkohlendstein (gelber Pfeil) und Seeberger Sandstein (roter Pfeil)

**Tabelle 8-2 (Fortsetzung): Fotodokumentation zur Durchführung der Arbeiten an der Musterfläche**



**Bild 8-9 und Bild 8-10: Schlammproben an Musterpfeilern**



**Bild 8-11: Endzustand eines Arkadenbogens der Musterfläche nach der Verlegung (linke Bildhälfte) im Vergleich zu einem Bogen der nicht restauriert wurde (Bildmitte und rechts)**

#### **8.4. Erkenntnisse während der Ausführung der Musterachse**

##### Zur Steinfestigung:

Bei der Festigung der Gothaer Lettenkohlendsteine zeigte sich, dass an senkrechten Oberflächen bereits durch einfaches Fluten mühelos Eindringtiefen bis zu 5 cm erreicht werden können (vgl. Bild 8-5). An gewölbten Untersichten hingegen konnten diese Eindringtiefen trotz geänderter Applikation (durch Packer) nicht erreicht werden (vgl. Bild 8-6).

Wir vermuten, dass durch die hohe Vergipsung der Bogenunterseiten am Südflügel (defekte Dächer über einen langen Zeitraum) der Porenraum des Sandsteins so stark reduziert ist, dass nicht in ausreichendem Maße Festiger aufgenommen werden kann. Hier wären noch klärende Untersuchungen erforderlich.

##### Zum Steinaustausch:

Der Freudenbacher Sandstein erwies sich auch vor Ort hinsichtlich Struktur und Verarbeitung als geeignetes Austauschmaterial für den Gothaer Lettenkohlendstein. Er besitzt eine geringfügig graubraunere Färbung, die jedoch nicht negativ auffällt.

##### Zur Steinergänzung (acrylatisch gebunden):

Bedingt durch das acrylatische Bindemittel konnten immer nur kleine Mengen des Restauriermörtels, die innerhalb von 20 bis 30 Minuten verarbeitet werden können, angemischt werden, was von der Ausführungsfirma als nachteilig empfunden wurde. Positiv bewertet wurde die Konsistenz des Mörtels.

##### Zur Schlämme:

Die Schlämme musste während der Verarbeitung häufig umgerührt werden, da es sonst zu einer Entmischung der Bestandteile gekommen wäre. Beim Auftrag kam es häufig zu Schaumbildung was dazu führte, dass die entstandenen Bläschen von der Steinoberfläche getupft werden mussten. Beim Aufbringen von zu viel Material kam es zur Bildung von Krakeleen und Schlieren, so dass diese Bereiche überarbeitet werden mussten. Durch unterschiedliches Saugverhalten von Sandstein und Ergänzungen trocknete die Schlämme unterschiedlich schnell auf. Farblich und strukturell sind die Schlämmen sehr gut an den vorliegenden Lettenkohlendstein angepasst.

##### Zur Verfugung:

Die Nachbehandlung des Fugenmörtels gestaltete sich sehr aufwendig, da zu diesem Zeitpunkt starke Sonneneinstrahlungen zu verzeichnen waren. Häufig war das Saugverhalten der unbehandelten Sandsteine größer als das der Ergänzungen, so dass der Fugenmörtel unterschiedlich schnell austrocknete. In diesen Bereichen kam es bereits während der 14-tägigen Nachbehandlung zu feinen Rissbildungen an den Fugenflanken.

## 9. Nachuntersuchungen an der Musterachse

Die Nachuntersuchungen an der Musterachse wurden ca. 8 Monate nach Fertigstellung der Arbeiten im Februar 2008 durchgeführt.

### 9.1. Visuelle Bewertung und Perkussionsproben

Die visuelle Bewertung der Musterfläche ergab nach der 1. Winterperiode keine Hinweise auf Schäden oder Schadensprozesse an den Lettenkohlendsteinen. Die Schlämme war überall noch fest, ließ sich nicht abreiben und zeigte keine Rissbildungen oder sonstige Schäden.

An einigen Mörtelfugen, vorzugsweise an den nördlich (zum Schlosshof) ausgerichteten, konnten Abrisse an den Steinflanken und teilweise Absandungen festgestellt werden (Bild 9-1). Diese Schäden waren an anderer Stelle bereits kurz nach Fertigstellung zu verzeichnen und sind wahrscheinlich auf zu schnelle Austrocknung während des Abbindeprozesses zurückzuführen.

Die Fugenrisse wurden im Rahmen der Nachuntersuchungen kartiert und müssen zukünftig beobachtet werden. Für den Fall, dass es zu weiteren Problemen kommt, sind Materialvergleiche über Rückstellproben möglich.



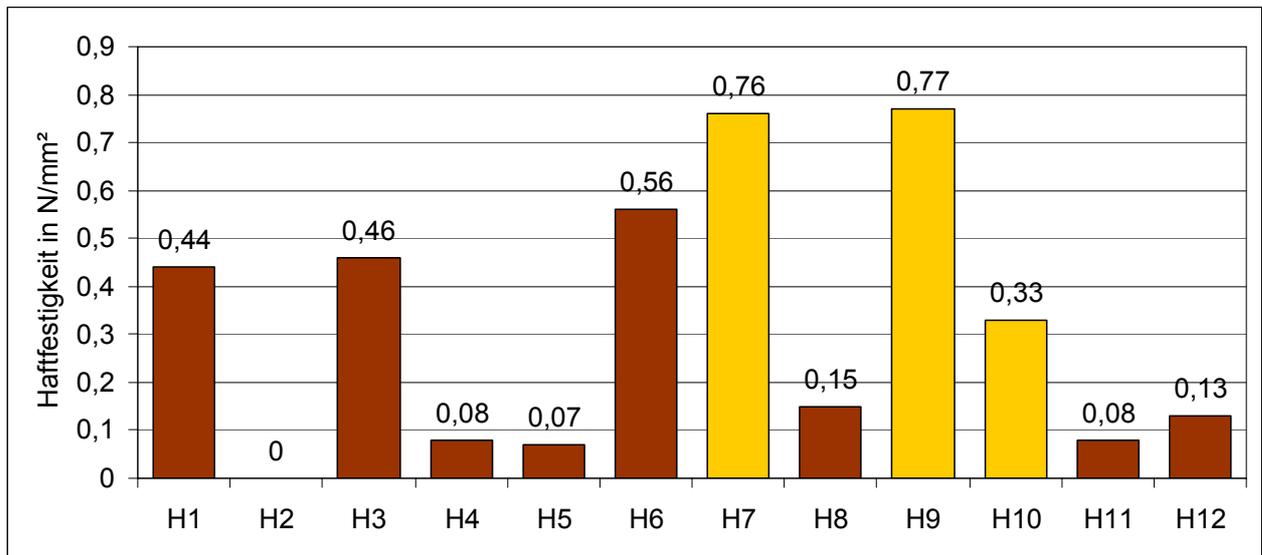
**Bild 9-1: Haarriss im Fugenmörtel, entlang der Steinflanke**

Weiterhin wurden an den Oberflächen der Pfeilerwerksteine Perkussionsproben vorgenommen, um festzustellen, ob es Hohlstellen gibt, die auf Schalenbildungen oder Ablösungen von Restauriermörteln vom Untergrund hindeuten. Diesbezüglich konnten keine Auffälligkeiten festgestellt werden.

Ungeachtet dieser überwiegend positiven Bewertung wurden die nachfolgenden Untersuchungen vorgenommen, um weitere Aussagen zum Zustand der Konservierungsmaterialien und der Werksteine treffen zu können.

### 9.3. Haftfestigkeitsprüfungen

Im Bereich der Musterachse sind 12 Stellen für Haftfestigkeitsprüfungen ausgewählt worden. Ziel der Untersuchungen war die Erfassung der Festigkeit im Verbund zwischen Steinerfüllungsmörteln und den Natursteinuntergründen.



**Abb. 9-1: Haftfestigkeiten von Steinerfüllungsmörteln auf Sandsteinoberflächen (gelb - mineralische Ergänzungen auf Rättsandstein, braun – acrylatgebundene Ergänzungen auf Lettenkohlendstein)**

Die Werte für die Haftfestigkeiten unterliegen insgesamt einer breiten Streuung. Geringe Werte wurden an den Stellen H4, H5, H8, H11 und H12 gemessen. In diese Größenordnung muss auch die Stelle H2 eingeordnet werden. An dieser Stelle erfolgte der Ausbruch im Steinmaterial beim Ansetzen des Prüfgerätes. Von der Größenordnung her sind die Werte vergleichbar mit der Haftfestigkeit von Luftkalkmörteln auf Mauerwerk. Wird das Bruchbild berücksichtigt, erfolgt der Abriss überwiegend oberflächennah im Steinmaterial. Die Größe der Haftfestigkeitswerte widerspiegelt somit nicht den Verbund zwischen Stein und Steinerfüllung sondern die Haftfestigkeit der Steinschalen auf den Steinoberflächen zum Untergrund.

Deutlich höhere Werte wurden an den Stellen H1, H3 und H6 ermittelt. Werte dieser Größenordnung werden auch für acrylatgebundene Steinerfüllungen auf sägeglatten, nicht vorgeschädigten Sandsteinen erreicht.

Werte der gleichen Größenordnung bzw. noch höhere Werte werden an den Stellen H7, H9 und H10 erreicht. Hier handelt es sich um völlig andere Mörtelsysteme und Steinuntergründe.

Für acrylatgebundene Steinerfüllungen auf Lettenkohlendsteinen waren während der 2006 durchgeführten Erprobungen Haftfestigkeitswerte in vergleichbaren Größenordnungen wie aktuell gemessen ermittelt worden. Auch damals erfolgte die Abriss bevorzugt im Steinmaterial.

### 9.3. Lichtmikroskopische Untersuchungen an Bohrkernen

Zur Bewertung der Qualität der Steinergänzung mit acrylatgebundenen Mörteln auf Untergründen aus vorgefestigtem Lettenkohlendstein sind drei Bohrkern im Durchmesser von 67 mm und bis zu einer Tiefe von etwa 100 mm mittels Diamantrockenkernbohrungen entnommen worden.

Zur Vorbereitung der Herstellung von Dünnschliffpräparaten sind die Bohrkern längs aufgeschnitten worden.



**Bild 9-2:**  
Profilschnitt des Bohrkerns BK1 von der Westseite des Pfeilers Nr. 6



**Bild 9-3:**  
Profilschnitt des Bohrkerns BK2 von der Nordseite des Pfeilers Nr. 6



**Bild 9-4:**  
Profilschnitt des Bohrkerns BK3 aus dem 6. Pfeiler von Süden auf der Ostseite der Arkaden

Aus den mikroskopischen Untersuchungen ergeben sich folgende Ergebnisse:

- **Bohrkern BK1:** Der Acrylatmörtel als Steinergänzung ist zweilagig ausgeführt. Auf der Mörteloberfläche befindet sich eine dünne Schlämme. Die Verbindungen zwischen den Mörtellagen und zur Steinoberfläche sind flächig ausgebildet, und auch die Schlämme ist gleichmäßig an die Mörteloberfläche angebunden. In einer Tiefe von 5 bis 7 mm unter der Steinoberfläche sind oberflächenparallele Rissansätze erkennbar. Risse und kleinere Hohlstellen unmittelbar unter der Steinoberfläche sind auch bis etwa 1 mm Tiefe sichtbar. In diesem Bereich erfolgte bei den Prüfungen zu Haftfestigkeiten überwiegend der Bruch im Steinmaterial bei mechanischer Beanspruchung. In 3 bis 5 cm Tiefe erfolgte ein Bruch bei der Bohrkernentnahme. Auch hier ist der Verlauf wie das Oberflächenprofil des Steines. Vermutlich waren hier Rissansätze im Stein vorhanden, die mit denen in 5 bis 7 mm Tiefe vergleichbar sind. In größerer Tiefe (>> 5 cm) sind im Stein keine Rissansätze oder andere Störungszonen sichtbar.

- **Bohrkern BK2:** Der Acrylatmörtel als Steiner Ergänzung ist zweilagig ausgeführt. Auf der Mörteloberfläche befindet sich eine dünne Schlämme. Die Verbindungen zwischen den Mörtellagen und zur Steinoberfläche sind flächig ausgebildet, und auch die Schlämme ist gleichmäßig an die Mörteloberfläche angebunden. In Tiefen von etwa 1,3 und 3,5 mm unter der Steinoberfläche sind oberflächenparallele Rissansätze erkennbar. Unmittelbar unter der Steinoberfläche sind Gefügeveränderungen (Rissansätze, gelockerte Strukturen, kleine Hohlstellen) im Stein sichtbar. In größerer Tiefe ( $>> 5$  cm) sind im Stein keine Rissansätze oder andere Störungszonen sichtbar.

- **Bohrkern BK3:** Der Acrylatmörtel als Steiner Ergänzung ist zweilagig ausgeführt. Eine Schlämme ist nicht vorhanden. Die Verbindungen zwischen den Mörtellagen und zur Steinoberfläche sind flächig ausgebildet. Bis zu 3 mm Tiefe unter der Steinoberfläche sind Rissansätze und Schalenbildungen im Steinmaterial vorhanden. In größerer Tiefe ( $>> 5$  cm) sind im Stein keine Rissansätze oder andere Störungszonen sichtbar.

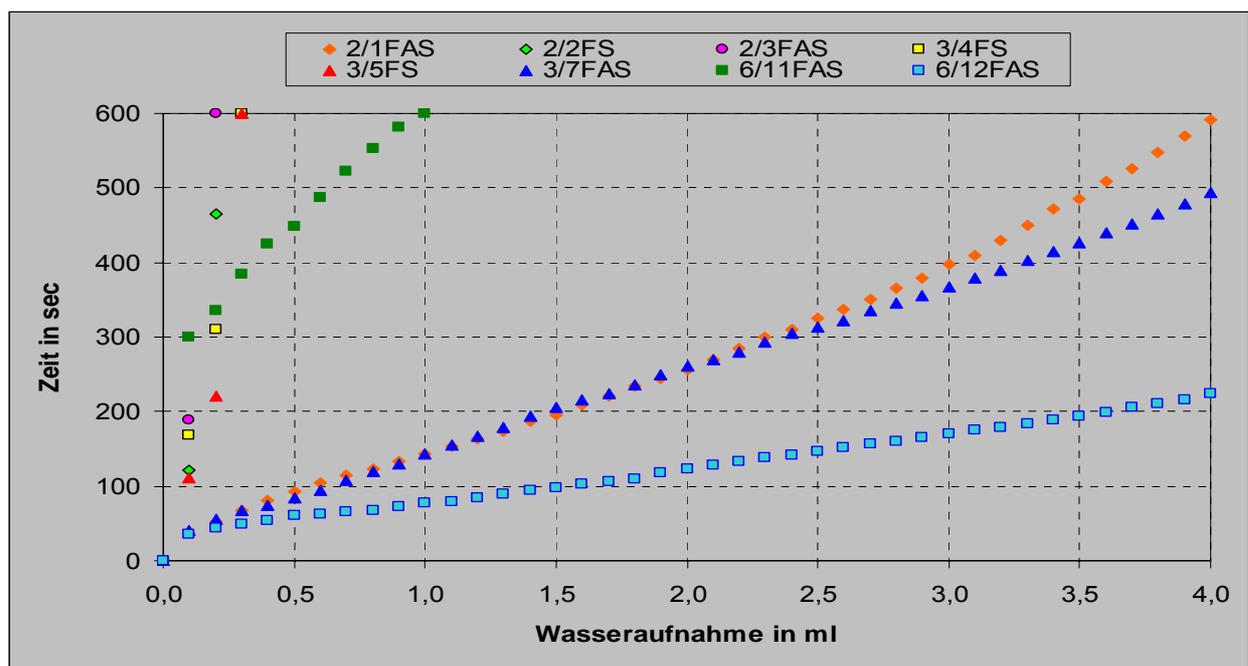
Als Schwachstelle zeichnet sich in allen drei Bohrkernen der Oberflächenbereich der Sandsteine ab. Unmittelbar unter der Steinoberfläche (bis 2 mm Tiefe) treten Rissansätze, kleinere Hohlstellen und Schalenbildungen auf. In diesem Tiefenbereich erfolgte auch der Bruch bei den Haftfestigkeitsprüfungen. In größeren Tiefen (unterschiedlich bei den drei Proben) waren weitere Rissansätze erkennbar. Die Rissverläufe folgten immer etwa dem Oberflächenprofil der Steine.

Gute und flächige Verbindungen konnten bei allen drei Bohrkernen zwischen den Steiner Ergänzungsmörtellagen und zwischen den acrylatgebundenen Steiner Ergänzungsmörteln und den Steinoberflächen nachgewiesen werden.

#### 9.4. Wasseraufnahmevermögen geschlammter Oberflächen

Die Prüfung der Wasseraufnahme erfolgte nach der Methoden nach Karsten an 12 Probestellen der Pfeiler 2, 3, 4 und 6 mit entsprechend unterschiedlich aufgebauten Untergründen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur kapillaren Wasseraufnahme sind in Abb. 9-2 dargestellt.



An den beprobten Stellen waren sehr große Unterschiede in der Wasseraufnahme nachweisbar. Die stärkste Wasseraufnahme war an der Probestelle 12 am Pfeiler 6 zu verzeichnen. Von der Größenordnung in etwa identische Wasseraufnahmen zeigten die Probestellen 1 Pfeiler 2 und 7 Pfeiler 3. Geringe und sehr geringe Wasseraufnahmen wurden bei den Probestellen 11 Pfeiler 6, 4 Pfeiler 3, 5 Pfeiler 3, 2 Pfeiler 2 und 3 Pfeiler 2 ermittelt.

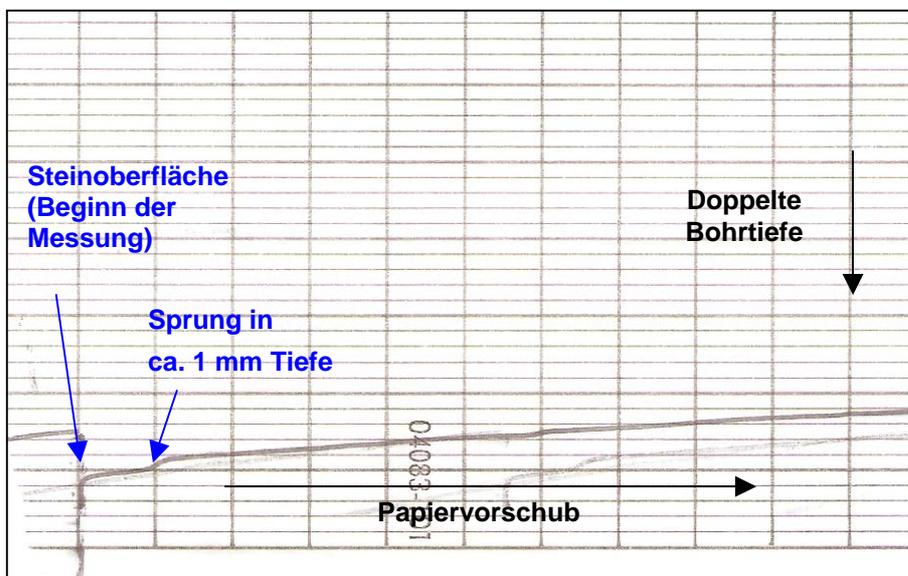
An den Probestellen 6 am Pfeiler 3 und 8, 9, 10 am Pfeiler 4 konnte nach 600 Sekunden kein Eindringen des Wassers festgestellt werden.

Eine Abhängigkeit der Wasseraufnahme von den beprobten Untergründen konnte nicht nachgewiesen werden. Die Werte variierten sehr stark. Ursachen könnten z.B. in der Eindringtiefe des Festigers und in der Schichtdicke der aufgetragenen Schlämme zu suchen sein. Ähnliche Spannbreiten der Werte für das Saugverhalten wurden auch bei den Untersuchungen zur Entwicklung und Erprobung von Rezepturen für Steinerfüllmörtel und Schlämmen gemessen.

### 9.5. Bohrwiderstandsmessungen

Zur Untersuchung der Wirksamkeit der Steinfestiger und zur Nachkontrolle der Schalenkonsolidierung wurden direkt an der Musterfläche Bohrwiderstandsmessungen vorgenommen. Diese erwiesen sich in der Ausführung vor Ort als schwierig, da - bedingt durch die Bossierung des Mauerwerks - die Justierung des Bohrgerätes und der Bohrwinkel nicht immer einheitlich zu gewährleisten waren und damit die Werte untereinander nicht vergleichbar sind. Trotzdem ist der Festigkeitsverlauf, der durch die Bohrhärte widerspiegelt wird, innerhalb einer Messung aussagekräftig.

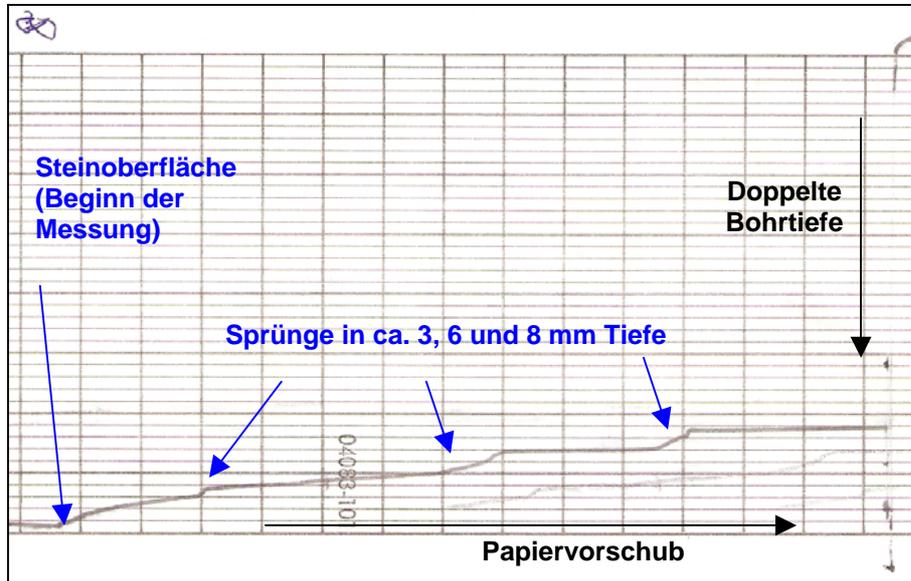
An der Mehrzahl der beprobten Stellen konnte in ca. 0,5 bis 1 mm Tiefe eine sprunghafte, geringfügige Verringerung der Bohrwiderstandes festgestellt werden (Bild 9-5), um anschließend wieder größer zu werden.



**Bild 9-5: Bohrdiagrammkurve der Probe 7 an der Musterfläche mit einem Festigkeitssprung in ca. 1 mm Steintiefe**

Dabei könnte es sich um die Schlämme handeln, die weicher eingestellt ist als der Stein, so dass ein stärkerer Anstieg der Bohrdiagrammkurve zu erwarten ist.

An einem Werkstein, an dem Schalenbildungen verklebt, hinterfüllt und angebösch worden waren, wurde ebenfalls der Bohrwiderstand ermittelt (Bild 9-6).



**Bild 9-6: Bohrdiagrammkurve der Probe 8 an der Musterfläche mit mehreren Festigkeitssprüngen, die die Schalenbildung verdeutlichen**

Dabei konnten mehrere Sprünge in der Bohrdiagrammkurve registriert werden, die die weicheren Bereiche (Hinterfüllmörtel) zwischen den Schalenbildungen markieren. Hohlräume, die durch einen senkrechten Anstieg der Kurve deutlich würden, konnten nicht festgestellt werden.

In Hinblick auf den Nachweis der Festigungswirkung erwies sich die Bohrwiderstandsmessung vor Ort als ungeeignet. Ab einer Bohrtiefe von ca. 25 bis 30 mm verlangsamte sich die Bohrgeschwindigkeit wegen des Transportes des Bohrmehls so, dass eine Bewertung des Bohrwiderstandes nicht mehr möglich war. Innerhalb dieser Spanne konnten, abgesehen von den o.g. Beobachtungen, an den 11 beprobten Werksteinen keine signifikanten Änderungen der Bohrhärte festgestellt werden.

Da unmittelbar nach der Festigung (vgl. Abschnitt 8.4.) Eindringtiefen des Steinfestigers von 40 bis 50 mm festgestellt wurden, konnten der Übergangsbereich zwischen gefestigtem und ungefestigtem Stein mit der Bohrwiderstandsmessung nicht erreicht werden. Hier wären weiterführende Nachuntersuchungen an Bohrkernen erforderlich.

## 9.6. Schlussfolgerungen aus den Nachuntersuchungen

Mit den Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass die acrylatgebundenen Steinerergänzungen eine gute Verbindung mit den Steinoberflächen und bei mehrlagigem Anstrich auch untereinander eine gute Verbindung besitzen. Die Anbindung an die neuen mineralisch gebundenen Verfugmörtel ist ebenfalls gut.

Auch die zum Schutz der Steinoberflächen und zum Farbabgleich der Oberflächen eingesetzte Schlämme besitzt eine gute Verbindung zu den Oberflächen. Hier konnten keine Zugfestigkeiten ermittelt werden. Durch die Durchdringung der dünnen Schlämmschicht mit Kleber wäre es zu einer Verfälschung der Ergebnisse gekommen. Eine Reduktion der Wasseraufnahme über die Steinoberflächen war an den hier beprobten Stellen nachweisbar.

Bei der Steinfestigung hat sich der elastifizierte Kieselsäureester hinsichtlich der erreichten Eindringtiefen als ungeeignet herausgestellt. Deutlich bessere Eindringtiefen konnten mit Kieselsäureestern ohne elastifizierende Komponenten und mit Wirkstoffgehalten von 10 bis 20 % erreicht werden, die als „aufbauende Festigung“ in 2 bis 3 Arbeitsgängen appliziert wurden. Beim Einbringen von Festigern in die Steine der überhängenden Bogenflächen wurden nur ungenügende Eindringtiefen erreicht, hier muss über andere Applikationsmethoden nachgedacht werden.

Als problematisch sind auch nach der Festigung die oberflächennahen Bereiche der vorgeschädigten Lettenkohlendsteine anzusehen. Die Bruchzonen bei den Haftfestigkeitsprüfungen befanden sich überwiegend im Bereich von oberflächenparallelen Rissansätzen in bis zu 2 mm Tiefe im Stein. Aktuell konnte ein ausreichender Verbund nachgewiesen werden. Mit der Zeit muss aber mit weiteren Salzeinwanderungen in diese Bereiche gerechnet werden und damit auch mit einer erneuten Schädigung.

Durch die Poren in den Ergänzungsmörteln kann ein Teil der Salzbelastungen aufgenommen werden und somit ist auch eine Reduktion der Belastungen in den Oberflächenbereichen der Steine möglich. Der Anreicherungschorizont für Salze verlagerte sich von den oberflächennahen Bereichen im Stein in den Ergänzungsmörtel.

An Steinoberflächen und in Mauermörteln sind teils hohe Gipsgehalte nachgewiesen worden. Somit war die Entscheidung für acrylatgebundene Steinerergänzungen und Schlämme richtig. Hier muss längerfristig nicht mit chemischen Wechselwirkungen unter Bildung von Treibmineralen zwischen den Bindemitteln und dem Gips gerechnet werden.

Gips kann als Luftschadstoff an den Steinoberflächen abgelagert worden sein. Möglich ist aber auch eine Umlagerung aus gipshaltigen Mörteln mit in die Pfeiler eindringenden Wässern auf Steinoberflächen und in oberflächennahe Steinbereiche.

An einzelnen Stellen zeigten sich Verarbeitungsmängel bei der Verfugung. Durch unzureichende Nachbehandlung oder beim Einsatz der Verfugmörtel im Kontakt zu trockenem Vierungsmaterial waren Fugenflankenabrisse nachweisbar.

## 10. Resümee

Das Schloss Friedenstein in Gotha wurde in der Zeit von 1643 bis 1654 errichtet. Der in den Arkaden des Schlosses verbaute Lettenkohlendstein weist starke Schädigungen auf. Im Rahmen des Projektes wurde nachgewiesen, dass diese Schäden teilweise auf natürliche Verwitterung (Feuchte- und Frosteinwirkungen) zurückzuführen sind. An allen geschädigten Oberflächen sind aber auch Einwirkungen von Luftschadstoffen, die zu Vergipsungen führten, nachweisbar. Aus nutzungsbedingten Einflüssen stammen Belastungen mit Chloriden und Nitraten.

Bei den Untersuchungen waren Fassungsreste auf den Oberflächen der Arkaden nachweisbar. Im Laufe der Zeit fand aber eine Wandlung in steinsichtige Oberflächen statt. Damit verbunden war eine stärkere Abwitterung der Steinoberflächen. Als Maßnahme zum Erhalt der Pfeiler sind in der Vergangenheit Vierungen mit witterungsstabileren Sandsteinen (Rät- und Elbsandsteine) oder Steinerergänzungen mit verschiedensten Mörteln (z.B. Gips- und Zementmörtel) ausgeführt worden.

Ausgehend von den Ergebnissen der Untersuchungen zu Feuchte- und Salzbelastungen als auch unter Berücksichtigung der Materialeigenschaften (verschiedene Mörtel, Steine) des Bestandsmauerwerks wurden Steinerergänzungsmörtel, Verfugmörtel und Schlämme für den Schutz von Steinoberflächen entwickelt und an Test- sowie Musterflächen erprobt. Untersucht und getestet wurden ebenfalls Materialien und Technologien zur Steinfestigung. Weiterhin wurde ein Ersatzsandstein für Vierungen und Neuteile gefunden, der den technischen und optischen Parametern des Gothaer Lettenkohlendsteins sehr nahe kommt.

Resultierend aus den Untersuchungen und Anwendungen an Test- und Musterflächen können folgende Materialien für Konservierung und Restaurierung der umweltgeschädigten Lettenkohlendsteine Gothas empfohlen werden:

- Bei der Entscheidung für Steinaustausch und Vierungen kann der Freudenbacher Sandsteins als gleichwertiges Ersatzmaterial verwendet werden.
- Für die Steinfestigung hat sich bisher Kieselsäureester ohne elastifizierende Komponenten und mit niedrigen Wirkstoffgehalten (10 bis 20 %) bewährt, der als „aufbauende Festigung“ in 2 bis 3 Arbeitsgängen mittels Fluten appliziert wird. Das Einbringen von Festigern in die Steine der überhängenden Bogenflächen konnte noch nicht zur Zufriedenheit gelöst werden, hier muss nach anderen Applikationsmethoden gesucht werden.
- Für die Steinerergänzung steht ein auf den Lettenkohlendstein abgestimmter acrylatgebundener Mörtel zur Verfügung, der sich optisch und strukturell gut anpasst und auf die Versalzungssituation abgestimmt ist.
- Für den Schutz von angewitterten Steinoberflächen wurde eine acrylatgebundene Schlämme entwickelt. Die Schlämme muss hinsichtlich ihrer Verarbeitungseigenschaften (schnelles Entmischen der Komponenten) noch optimiert werden.
- Für die Erneuerung von Verfugungen sind Rezepturen für zwei Mörtel für den Einsatz an den Arkaden erstellt worden, die die unterschiedlichen Fugenbreiten und -tiefen berücksichtigen. Es ist zu beachten, dass eine sorgfältige Nachbehandlung dieser Mörtel erforderlich ist (Schutz vor zu schneller Austrocknung).

Bisherige Nachkontrollen zeigen, dass mit den entwickelten technologischen Sanierungsansätzen die Arkaden überarbeitet und erhalten werden können. Für eine Bewertung des Langzeitverhaltens war die Standzeit der Musterflächen bisher zu kurz. Nach längerer Standzeit (z.B. 5 Jahre) sollten weitere Nachkontrollen erfolgen!

Die im Konservierungskonzept vorgesehene Farbfassung der Sandsteine muss nach Festlegung der Farbigkeit noch vorgenommen werden, sie ist Bestandteil des gesamten Schutzkonzeptes für den Lettenkohlsandstein.

Die konsequente Wartung und Instandhaltung der Hofentwässerung (offene Rinne) ist Voraussetzung für die Langlebigkeit der vorgenommenen Maßnahmen.



**Abb. 10-1:**  
**Endzustand eines**  
**Arkadenbogens der**  
**Musterfläche (linke**  
**Bildhälfte) im Vergleich zu**  
**einem Bogen der nicht**  
**restauriert wurde (rechte**  
**Bildhälfte)**

Die an den Arkaden des Schlosses Friedenstein gesammelten Erfahrungen sind auf andere mit vergleichbaren Gesteinen gebaute Objekte übertragbar. Es müssen aber in jedem Fall ausreichende Voruntersuchungen und spezielle Abstimmungen der Sanierungstechnologien vorgenommen werden.

## 11. Veröffentlichung der Ergebnisse / Abschlusskolloquium

Die Ergebnisse des DBU-Förderprojektes wurden während des gesamten Bearbeitungszeitraumes in Form von Publikationen und Tagungsbeiträgen öffentlich gemacht.

- Mai 2005, Natursteintag in Osnabrück, Vortrag zur Zielstellung des Projektes und 1. Ergebnissen, Veröffentlichung im Buch „Stein-Zerfall und Konservierung“ [10]
- Dezember 2005, Vortrag im Rahmen eines Kolloquiums an der FH Hildesheim im Rahmen des DBU-Projektes „Schilfsandstein Melle“
- September 2006, Natursteintag an der FH Erfurt, Vortrag zum Stand der Kenntnisse, Veröffentlichung im Tagungsband [11]
- März 2007, Natursteintag in Stuttgart, Vortrag zum Stand der Kenntnisse, Veröffentlichung im Tagungsband [12]

Am 4. April fand in Gotha das Abschlusskolloquium des DBU-Projektes statt, bei dem ca. 60 Teilnehmer anwesend waren. Der Interessenkreis setzte sich aus Vertretern verschiedener Landesdenkmalämter, Unterer Denkmalschutzbehörden, Studenten und Lehrkräften der Fachhochschule Erfurt, Architekten, Bauingenieuren und Restauratoren zusammen.

Das Programm beinhaltete folgende Beiträge:

10.00-10.15 Uhr	Begrüßung durch Dipl.-Ing. Arch. Philipp Jung
10.20-10.40 Uhr	Vorkommen, Eigenschaften und Konservierung von Sandsteinen des Unteren Keupers in Thüringen (Dipl.-Ing. Heike Hopp)
10.45-11.15 Uhr	Belastungssituation an den Schlossarkaden Entwicklung geeigneter Sanierungsmaterialien (Dr. Hans-Werner Zier)
12.00-12.20 Uhr	Schilfsandstein in Niedersachsen - Aspekte der Geologie, Materialkunde und Denkmalpflege (Prof. Dr. Erwin Stadlbauer)
12.25-12.50 Uhr	Durchgeführte Maßnahmen an der Musterfläche (Dipl.-Ing. Heike Hopp, Prof. Thomas Staemmler)
12.55-13.10 Uhr	Ergebnisse der Nachkontrolle / Ausblick (Dr. Hans-Werner Zier)
14.00-14.30 Uhr	Besichtigung und Erläuterungen an der Musterfläche

Die Teilnehmer der Kolloquiums erhalten auf Anforderung eine CD mit dem Abschlussbericht zugeschickt.

## Literaturverzeichnis

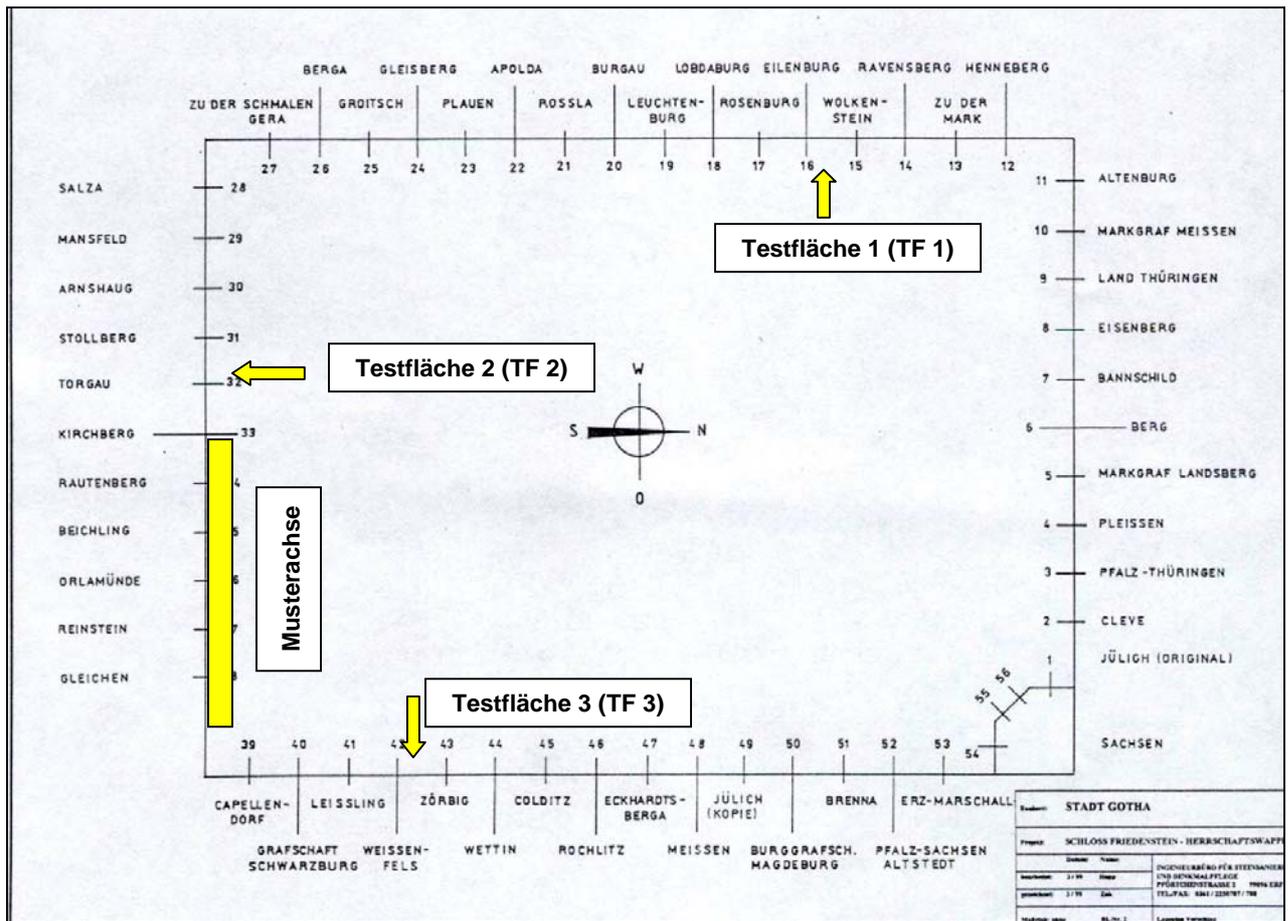
- [1] Meinhardt-Degen, J. et al.: Evaluierung von Schutzmaßnahmen an umweltgeschädigten Denkmälern aus Naturstein am Beispiel Alte Pinakothek in München und Schloss Schillingsfürst in Franken (Bayern). In Abschlussbericht des DBU Projektes AZ 17619, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, München, 2003.
- [2] Hopp, H.: Untersuchungen zur Festigung von Sandsteinen des Mittleren und Unteren Keupers, Unveröffentlichter Untersuchungsbericht für die Stadtverwaltung Erfurt, 1995.
- [3] Stadlbauer, E & Niemeyer, R.: Abschlussbericht des DBU-Projektes AZ 21859-45, Hannover, 2007.
- [4] Snethlage, R.: Leitfaden Steinkonservierung, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Fraunhofer IRB-Verlag, 2005.
- [5] Seifert, F. und Zier, H.-W.: Zusammenfassende Darstellung zum Stand der Entwicklung des acrylatdispersionsgebundenen Steinerfüllungssystemes, In : Arbeitsheft des Thüringischen Landesamtes für Denkmalpflege, Neue Folge 1, 2001, Seiten: 29 – 59.
- [6] Patzelt, S.: Sandsteine des Unteren und Mittleren Keupers in Thüringen - Eigenschaften, Verwitterungsverhalten und Konservierungsmöglichkeiten. Unveröffentlichte Diplomarbeit, der Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, 1995.
- [7] Auszug aus der Geologischen Karte von Thüringen, Thüringische Landesanstalt für Umwelt und Geologie, Weimar 2001.
- [8] Grimm, W.-D.: Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der BRD. Arbeitsheft Nr. 50, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, München, 1990.
- [9] Zier, H.-W. und Weise, G.: Untersuchungen zur Ermittlung von Zusammenhängen zwischen Mischungsverhältnissen, Zuschlagstoffparametern und Druckfestigkeiten bei Putzmörteln“, In: Betontechnik (1989) Heft 1, S. 27-30.
- [10] Hopp, H. & Zier, H.-W.: Entwicklung einer Konservierungstechnologie für umweltgeschädigte Werksteine aus Lettenkeupersandstein, In: Stein-Zerfall und Konservierung, Edition Leipzig, 2005, S. 256-260.
- [11] Hopp, H. & Zier, H.-W.: Entwicklung einer Konservierungstechnologie für Lettenkeuper-sandsteine der Schlossarkaden in Gotha, In: Bericht des IfS Nr. 24 (2006), S. 23-31.
- [12] Hopp, H. & Zier, H.-W.: Erfahrungen bei der Konservierung von Lettenkeupersandstein am Schloss Friedenstein in Gotha, In: Natursteinsanierung Stuttgart 2007, Fraunhofer IRB-Verlag, S. 40-47.

## Anlagen

- I Lageplan des Schlosshofes mit Kennzeichnung der Testflächen und der Musterachse
- II Beispiel für die Kartierung der Schäden an der Musterachse
- III Beispiel für die Kartierung der durchgeführten Maßnahmen an der Musterachse

## Anlage I

### Lageplan des Schlosshofes mit Kennzeichnung der Testflächen und der Musterachse



Anlage II

Beispiel für die Kartierung der Schäden an der Musterachse (unmaßstäblich)



Anlage III

Beispiel für die Kartierung der durchgeführten Maßnahmen an der Musterachse (unmaßstäblich)

