

Molassesandsteine und ihre Verwitterung - Techniken und Mittel zur Verfestigung von Oberflächen und zur Verbindung von losen Schichten und Schalen

Diplomarbeit

**vorgelegt dem Fachbereich 5, Gestaltung
Studiengang Restaurierung/Grabungstechnik
der Fachhochschule für Technik und Wirtschaft Berlin**

von Gerhard Roth

Augsburg, den 30. September 2011

Fachhochschule für Technik und Wirtschaft Berlin

Fachbereich 5, Gestaltung

Studiengang Restaurierung/Grabungstechnik

- 1. Prüfer/Betreuer: Prof. Dr. Christian Stadelmann, Berlin**
- 2. Prüfer/Gutachter: Dr. Eberhard Wendler, München**

Kurzzusammenfassung

Bedingt durch ihre geologische Entstehung im riesigen voralpinen Molassebecken sind Molassesandsteine als verbaute Werksteine im deutsch-österreichisch-schweizerischen Voralpenland häufig zu finden. Dabei unterscheiden sie sich je nach Entstehungs- und Abbauort in Qualität und Verwitterungseigenschaften erheblich.

Ziel der Diplomarbeit ist es, Molassesandsteine in ihrem historischen und gegenwärtigen Variantenreichtum kurz vor zu stellen, ihr typisches Verwitterungsverhalten zu zeigen und die damit einhergehenden Schadensbilder, sowie Möglichkeiten der Konsolidierung dieser Schäden.

Wesentlicher Bestandteil der Betrachtungen und Untersuchungen ist die Konsolidierung des Sandsteines in der Tiefe, in der Interaktion des Materials mit Mörteln und Bindemitteln verschiedener Art – von mineralischen Systemen bis hin zu Systemen mit Kunstharzen. Dabei sollen die in der praktischen Denkmalpflege entwickelten und verwendeten Standards an bauphysikalischen Untersuchungen und der Konservierungstechniken angewandt werden, sowie wesentliche Gruppen von Konsolidierungsmitteln und deren Wirksamkeit exemplarisch untersucht werden.

Molasse – Molassesandstein – Sandstein

Restaurierung – Konservierung – Konsolidierung

Injektionen – Injektionsanker – Injektionstechnik - Packer

Mörtel - Reaktionsharze – Bauharze

Natursteinprüfung - Natursteinsanierung

Abstract

In consequence of the geological genesis of huge molasse bassins do molasse sandstones frequently appear in form of manufactured stone in the german- austrian- swiss alpine- upland. Its quality and alteration attributes do highly differ, depending on its place of acruement and advancing.

The ambitions of the paper are to show:

- o the historical und actual background of the molasse sandstone
- o its typical way of alteration and the adversities connected with it
- o opportunities to avoid such adversities

The main component of the paper deals with the consolidation of the sandstone`s interior interacting with several materials (e.g. grout, synthetic resin). To reach that consolidation already developed standards of preservation of ancient monuments are applied. Main groups of consolidation aids and its effectiveness are analysed exemplarily.

Vorwort

Bedingt durch ihre geologische Entstehung im riesigen, sogenannten voralpinen Molassebecken des Tertiärs sind Molassesandsteine als verbaute Werksteine im deutsch-österreichisch-schweizerischen (D-A-CH) Voralpenland häufig zu finden.

Als oberflächennahes Baumaterial wurde der Stein leicht gewonnen. Dabei unterscheidet er sich je nach seinem Entstehungs- und Abbauort in Qualität und Verwitterungseigenschaften erheblich.

Ziel der Diplomarbeit ist es, Molassesandsteine in ihrem historischen und gegenwärtigen Variantenreichtum kurz vor zu stellen, ihr typisches Verwitterungsverhalten zu zeigen und die damit einhergehenden Schadensbilder, sowie Möglichkeiten der Konsolidierung dieser Schäden

Wesentlicher Bestandteil der Betrachtungen und Untersuchungen ist die Konsolidierung des Sandsteines in der Tiefe, in der Interaktion des Materials mit Mörteln und Bindemittel verschiedener Art – von mineralischen Systemen bis hin zu Systemen mit Kunstharzen.

Dabei sollen die in der praktischen Denkmalpflege entwickelten und verwendeten Standards bei bauphysikalischen Untersuchungen und bei Konservierungstechniken angewandt werden, sowie wesentliche Gruppen von Konsolidierungsmitteln und deren Wirksamkeit exemplarisch untersucht werden.

Da nur mehr schweizer Molassesandsteine abgebaut und in Deutschland als Austauschgestein verwendet werden, konzentriert sich die Diplomarbeit beispielhaft auf den Rorschacher Sandstein vom Bodensee. Die oben genannten, noch zur Verfügung stehenden weiteren schweizer Molassesandsteine werden vergleichend gezeigt.

Danksagung

Die nötigen gesteintechnischen Untersuchungen wurden u.a. in folgenden Einrichtungen gemacht:

- Labor für Konservierungsfragen in der Denkmalpflege von Dr. Wendler in München
- Gesteinsprüfungslabor des Steinzentrums des Europäischen Fortbildungszentrums für das Steinmetz- und Steinbildhauerhandwerk in Wunsiedel
- Werkstatt des Autors in Augsburg

Ich danke den Mitarbeitern der obigen Labors für ihre Hilfsbereitschaft und Unterstützung!

Großer Dank gilt auch meinen Kollegen des Arbeitskreises Natursteinrestaurierung im Referat 3 der Wissenschaftlich-Technischen Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., die immer ein offenes Ohr für meine Fragen haben.

Inhaltsverzeichnis

Diplomarbeit	1
Kurzzusammenfassung	3
Abstract	4
Vorwort.....	5
Danksagung.....	6
1. Molassesandstein.....	11
1.1. Natursteine	11
1.1.1. Mineralienbestand und Bindung	11
1.1.2. Technische Eigenschaften von Gesteinen	12
1.1.3. Verwitterung von Natursteinen	15
1.2. Sandsteine	16
1.2.1. Faktoren für die Varietäten von Sandsteinen.....	17
1.2.2. Störungen bei Sandsteinen.....	18
1.3. Molassesandsteine	19
1.3.1. Molasse.....	19
1.3.2. Überblick Molasse-Gesteine	22
1.3.3. Varietäten.....	24
1.3.4. Molassesandsteine der Schweiz	25
1.3.5. Verwitterungserscheinungen bei Molassesteinen	27
2. Konsolidierungsmittel.....	36
2.1. Bindemittel und Bindemittelsysteme	37
2.1.1. Bindemittelbezeichnungen.....	37
2.1.2. Bindemittelklassifizierung nach ihrer Herkunft	37
2.2. Konsolidierungsmittel und ihre Wirk-mechanismen	38

2.2.1.	Verfestigungsmittel (Siliziumorganische Mittel)	39
2.2.2.	Anorganische Mittel	40
2.2.3.	Mineralische Verfüllmittel, Mörtel	40
2.2.4.	Klebstoffe und Reaktionsharze	42
2.3.	Anforderungen an die Konsolidierungs-materialien	44
3.	Techniken und Verfahren zur Verbindung und Stabilisierung loser Schichten und Lager	45
3.1.	Vorbemerkungen.....	45
3.2.	Oberflächenverfahren	47
3.2.1.	Applikationsverfahren	47
3.2.2.	Druckverfahren (Injektionen über Oberflächen-packer und Injektionshilfen).....	49
3.2.3.	Anböschungen und Hinterfüllungen	49
3.2.4.	Verfüllungen in Rissen und Spalten	50
3.3.	Tiefenverfahren	50
3.3.1.	Bohrloch- oder Rissinjektionen	51
3.3.3.	Schleierinjektionen	52
3.3.4.	Anker und Nadeln.....	52
3.4.	Sonstige Verfahren.....	53
3.4.1.	Fügen, Kitten, Kleben.....	53
3.4.2.	Mechanische Verbindungen	53
3.4.3.	Kombinationstechniken	54
3.5.	Unterscheidung von drucklosen und druckintensiven Injektionstechniken.....	56
3.5.1.	Injektion ohne künstlich ausgeübten Druck.....	56
3.5.2.	Niederdruck (bis ca. 10 bar)	56

3.5.3.	Hochdruck (bis ca. 250 bar).....	57
4.	Versuche zur Verbindung und Stabilisierung loser Schichten	58
4.1.	Vorüberlegungen zu Techniken und praxismgerechten Simulationen 58	
4.2.	Anforderungen an Prüfkörper.....	61
4.3.	Herstellung der Prüfkörper	63
4.3.1.	„Gesunde“ Gesteinsprismen 50 x 50 x 370 mm, bzw. Würfel 50 x 50 x 50 mm	63
4.3.2.	Verbundprüfkörper aus Sandwichscheiben	63
4.3.3.	Verbundprüfkörper als „Chaosverbindungen“	64
4.3.4.	Würfel aus gegossenem, reinem Harz-Bindemittel	67
4.4.	Durchführung der Simulationen	68
4.4.1.	Ausbreitversuche	68
4.4.2.	Verfüllen der Sandwichkörper	69
4.4.3.	Verfüllen der „Chaosverbundkörper“	72
5.	Vorstellung der Prüfverfahren zur Untersuchung der Molassesandsteine und der Prüfkörper	79
5.1.	Vorbemerkung	79
5.2.	Überblick über genormte bzw. normative Prüfungsthemata und Prüfverfahren	81
5.2.1.	DIN 52100 und DIN 52008 - Gesteinsuntersuchungen im Labor	81
5.2.2.	WTA-Merkblatt Kenndatenermittlung und Qualitätssicherung bei der Restaurierung von Natursteinbauwerken	81
5.2.3.	Denkmalpflegerische Untersuchungen gemäß Sneithlage/Wendler	82
5.3.	Verwendete Untersuchungstechniken / durchgeführte Prüfungen	82

6. Prüfungen an ausgewählten Steinen, den eingesetzten Konsolidierungsmitteln und Prüfkörpern	84
6.1. Beschreibung der eingesetzten Prüfverfahren.....	84
6.1.1. Rohdichte (Porosität).....	84
6.1.2. Festigkeiten	85
6.1.3. Wasseraufnahme und –Abgabe (Feuchtedurchgang).....	88
6.1.3.3. Hygrische Längendehnung (Dilatation).....	90
6.2. Testergebnisse.....	92
6.2.1. Rohdichte	92
6.2.2. Festigkeit	93
6.2.3. Wasseraufnahme und – Abgabe	97
6.2.4. Dehnungen.....	104
7. Schlusswort.....	107
7.1. Der Weg zur Molasse.....	107
7.2. Zu Prüfkörpern und Test	107
8. Anhang	110
8.1. Abkürzungsverzeichnis.....	110
8.2. Abbildungsverzeichnis	112
8.3. Diagrammverzeichnis	117
8.4. Quellenverzeichnis	120
8.5. Index.....	122
8.6. Sonstige Anlagen	123
8.7. Eidesstattliche Erklärung Ehrenwörtliche Erklärung	124



Abb. 1: Molassewand am Halblech im Allgäu

1. Molassesandstein

1.1. Natursteine

1.1.1. Mineralienbestand und Bindung

Natursteine entstehen in geologischen Prozessen auf verschiedene Weisen und bilden so die Gesteinsgruppen Magmatite (Erstarrungsgesteine), Metamorphite (Umwandlungsgesteine) und Sedimente (Ablagerungsgesteine) zu welchen auch die Molassesandsteine gehören.

Je nach ihrer Genese werden diese aus verschiedenen Mineralien gebildet, die in jeweils typischer Art, Textur und Struktur miteinander verbunden sind.

Als ihre Komponenten werden Hauptgemengeteile, Nebengemengeteile und Übergemengeteile (in der Regel sehr untergeordnet, lokal aber sehr häufig vorkommend) unterschieden. Sie können poly- oder monomineralisch vorhanden sein.

Die Bindung der Minerale untereinander erfolgt direkt kristallin (Kornverwachsungen), indirekt durch Diagenese als physikalische Kompaktion (Verpressung/Verkrallung) oder durch chemische Zementation mit einem Bindemittel.

So entstehen Gesteine mit charakteristischer Bindung, Mineralbestand, Korngefüge und Porenräumen.

1.1.2. Technische Eigenschaften von Gesteinen

Die technischen Eigenschaften der Gesteine werden wesentlich bestimmt durch Art und Härte der Mineralien, die Bindung und das Korngefüge, die Porosität und die Permeabilität, durch thermisches Verhalten und die Fähigkeit Feuchte aufzunehmen und abzugeben, sowie durch Raumbeständigkeit und Dehnungsverhalten.

1.1.2.1. Härte und Festigkeit

Die Härte von Mineralien wird definiert durch die Mohs'sche Härteskala. Nach dieser wird ein Mineral von dem nächst-festeren geritzt. Es entstehen zehn Härtegrade vom weichen Talk bis zum harten Diamant.

Die Härte allein sagt nichts über die Festigkeit von Gesteinen aus. Wesentlich ist die oben beschriebene Bindung der Minerale über Kornkontaktflächen und Zementation: je inniger und fester verwachsen, desto widerstandsfähiger ist der Verband.

Die Bindungsfestigkeit kann über Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit, Haftzugfestigkeit oder dem Spannungs-Dehnungsverhalten ermittelt und definiert werden.

1.1.2.2. Permeabilität

Permeabilität bezeichnet die Durchlässigkeit eines Steines für Flüssigkeiten und Gase. Da im Porenraum von Steinen immer wechselnde Anteile von Wasser und Luft vorhanden sind, kann es bei zu geringer Durchlässigkeit zu Schäden kommen.

1.1.2.3. Porosität und Feuchtigkeitsaufnahme

Die Porosität ist das Verhältnis des Porenvolumens zum Gesteinsvolumen der einzelnen Gesteine. Man unterscheidet u.a., ob es sich um isolierte Poren handelt oder nicht. Porengeometrie und Porengößenverteilung bestimmen die Beweglichkeit von Gasen und Flüssigkeiten und damit wesentlich die chemisch-physikalischen Vorgänge im Gestein.

Die Porosität ist einfach über Dichte oder Wassersättigung fest zu stellen und gibt einen Hinweis, wie der Zugang zum Inneren von Werksteinen ist.

Der Wasseraufnahmegrad ergibt sich aus der aufgenommenen Wassermenge in einer bestimmten Zeit. Er kann auf die Gesteinsmasse oder auf die Volumen der miteinander verbundenen Poren bezogen werden. Der massebezogene Wasseraufnahmegrad nach DIN darf unter Atmosphärendruck bis 0,9% betragen, um ein Gestein als verwitterungsbeständig gelten zu lassen. In der Praxis sind aber höhere Werte ohne Zerstörungswirkung möglich.

Unter einem Druck von 150 bar wird der Sättigungswert, als der Quotient von Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck durch die Wasseraufnahme unter Druck berechnet: liegt er unter 0,75 ist von Verwitterungsbeständigkeit auszugehen.

Die Wasser- oder Feuchtigkeitsaufnahme kann durch ein Fluten und Tränken der Pore oder durch kapillares Saugen¹ geschehen. Darüber hinaus spielen Adhäsionskräfte der Wasserstoffbrücken eine Rolle beim Verfüllen der Poren, sowie die Luftfeuchte, die in den Poren zu finden ist (bis hin zur Kapillarkondensation). Der Feuchteausaustausch kann auch über Wasserdampfdiffusion erfolgen.

Der Vorgang von Wasseraufnahme und Wasserabgabe kann über Lösungerscheinungen oder Schadstoffeinträge bereits schädigend auf Gesteine wirken.

¹ Kapillares Saugen ist abhängig von den vorhandenen Porenradien: je kleiner der Porenradius, desto höher das kapillare Saugen. Eine Pore kann so viel Wasser kapillar in vertikaler Richtung saugen, bis das Gewicht der Wassersäule die kapillaren Anziehungskräfte ausgeglichen hat, das heißt, das eine enge Pore weniger Wasser aufnehmen muss als eine weite große.

1.1.2.4. Frost- und Salzsprengung

Die gefährlichste, schädigende Wirkung von eingebrachtem Wasser ist die Volumenausdehnung bei Frost: gefrierendes Wasser kann bei einer Volumenvergrößerung von ca. 9% einen Druck bis ca. 200 N/mm² auf die Porenwand ausüben². Häufige Frost-Tau-Wechsel führen zu einem schnellen mechanischen Zermürben des Gesteins und damit zu seinem schnellen Verfall.

Ein ähnliches Phänomen stellt die Volumenausdehnung bei der Kristallisation von Salzen dar und die damit verbundene Salzsprengung.

1.1.2.5. Dehnungen

Dehnungen im Gestein führen zu inneren Scherspannungen. Diese können durch hygri-sche Feuchteaufnahme und der damit verbundenen Längendehnung oder durch Wärmedehnung bei Temperaturerhöhung erfolgen.

Die Dilatation bei Feuchte geschieht meist über Schichtsilikate (z.B. Tonminerale), die Wasser zwischen ihre Kristalle und Schichten einlagern und dadurch ihr Volumen blättereigartig vergrößern. Bei der thermischen Dehnung kommt es im Kristallgitter zu unterschiedlichen Ausdehnungen in den Gitterebenen (Anisotropie).

Ist die auftretende Scherspannung höher als die Biegefestigkeit kann es zum Bruch kommen.

Die oben beschriebene Bindung der Minerale über Kornkontaktflächen und Zementation ist also wesentlich für die Widerstandsfähigkeit. Geschichtete Gesteine sind weniger widerstandsfähig als solche, mit regellos klumpiger Textur.

² Befindet sich Wasser durch eine der oben beschriebenen Vorgänge in der Gesteinspore und beginnt es zu frieren dehnt sich sein Volumen. Dabei drückt es in den freien Porenraum, bzw. auf die Porenwand. Je nach Porengestalt und Porenradius und der Art der Verfüllung ist der Porenraum mehr oder weniger mit Wasser gefüllt. Ist der Raum groß genug, so dass sich das Wasser quasi wie in einem kleinen See in der Pore befindet, dehnt es sich also zunächst in den frei zur Verfügung stehenden Raum aus ohne großen Druck auf die Wand auszuüben. Ist die Pore aber gänzlich mit Wasser verfüllt, drückt das gefrierende Wasser sofort und unmittelbar auf die Porenwand. Je nach Bindungsart und -kraft der Gesteinskörner untereinander kommt es - mehr oder weniger schnell - zur Zerstörung der Porenwand und damit zur Schädigung des Steins. Steine mit kleinen Porenradien sind gefährdeter als solche mit großen.

Probenzahl	Dichte (g/cm ³)			Porosität (Vol.%)			Wasseraufnahme (Gew.%)			Sättigungsgrad (-)			Luftpermeabilität (mD)		Spez. (innere Oberfläche) (m ² /g)								
	rein	Min.	Max.	roh	Min.	Max.	unter Atm.-Druck	Min.	Max.	unter Vakuum	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.							
<i>Magmatische Gesteine</i>																							
Plutonite	24	2.63	2.71	2.92	2.46	2.67	2.92	0.17	0.95	2.35	0.04	0.27	0.76	0.06	0.35	0.90	0.42	0.79	0.94	<0.001	0.370	<0.01	0.44
Ganggesteine	1	2.97			2.96			0.37			0.11			0.13			0.84		<0.001		<0.01		
Vulkanite	21	2.50	2.79	3.20	2.04	2.52	2.95	0.73	9.79	29.06	0.20	2.09	4.70	0.25	4.18	9.98	0.24	0.63	0.93	<0.001	122.000	<0.01	17.02
Vulkanische Tuffe	6	2.41	2.62	2.92	1.37	1.60	2.10	23.68	39.85	46.55	8.91	18.50	24.76	11.21	26.36	34.79	0.66	0.71	0.79	9.750	44.100	8.15	44.42
<i>Silikatische Metamorphite</i>																							
	4	2.58	2.66	2.70	1.55	2.36	2.66	0.80	11.47	39.95	0.21	5.86	21.56	0.30	7.07	25.81	0.70	0.80	0.88	205.000		36.34	
<i>Klastische Sedimentgesteine</i>																							
Konglomerate	1	2.70			2.40			10.49			2.15			4.56			0.47		1.00				
Sandsteine: Devon/Karbon	7	2.67	2.69	2.71	2.52	2.58	2.66	0.71	5.20	16.27	0.30	1.67	4.63	0.35	2.38	7.27	0.64	0.76	0.84	0.009	0.385	2.94	3.16
Perm	5	2.65	2.69	2.79	2.13	2.33	2.55	8.47	13.53	20.19	2.54	4.41	7.00	3.46	5.96	9.49	0.70	0.75	0.78	0.086	3.926	3.03	5.25
Buntsandstein	30	2.64	2.65	2.69	1.92	2.21	2.47	7.11	16.80	27.36	1.97	4.62	8.65	2.89	7.83	14.29	0.42	0.60	0.72	0.030	3030.000	0.52	3.32
Muschelk./Keuper	25	2.64	2.67	2.86	1.91	2.16	2.47	8.00	18.88	29.56	2.78	5.76	11.06	3.24	8.89	15.55	0.46	0.65	0.95	0.200	338.000	0.82	7.44
Jura	4	2.65	2.72	2.80	2.02	2.05	2.14	23.34	24.43	26.55	7.09	7.86	9.46	10.92	11.91	13.16	0.59	0.66	0.72	124.000			
Kreide	15	2.64	2.67	2.73	2.03	2.17	2.35	12.69	18.81	23.97	2.26	5.63	7.07	5.40	8.76	11.57	0.41	0.56	0.72	7.140	1040.000	0.59	7.20
Tertiär	3	2.65	2.71	2.77	1.97	2.21	2.34	13.99	18.41	25.71	3.99	6.07	9.89	6.00	8.58	13.08	0.65	0.69	0.76	33.100		1.53	
Schiefertone	1	2.14			2.04			3.01			1.93			2.23			0.89		1.37				
<i>Tonschiefer</i>																							
	6	2.77	2.79	2.81	2.71	2.75	2.78	0.43	1.43	2.59	0.11	0.39	0.62	0.16	0.62	1.06	0.64	0.75	0.87	<0.001			
<i>Sulfatische Sedimentgesteine</i>																							
	2	2.43	2.51	2.60	2.24	2.41	2.59	0.40	4.17	7.95	0.13	0.91	1.69	0.15	1.85	3.56	0.47	0.66	0.85				
<i>Karbonatische Sedimentgesteine</i>																							
Sandsteinartige Karbonatgesteine	4	2.70	2.72	2.74	2.18	2.35	2.45	10.54	13.54	19.08	2.74	4.52	6.42	4.30	5.85	8.76	0.54	0.79	0.95	0.004	0.340	9.23	9.26
Karbonatgesteine: Devon	15	2.71	2.72	2.74	1.70	2.62	2.73	0.13	1.28	11.04	0.02	0.26	1.82	0.05	0.50	4.65	0.40	0.68	0.94	<0.001	3.090	<0.01	0.11
Zechstein	3	2.71	2.76	2.85	2.11	2.37	2.74	3.85	14.12	22.32	1.07	2.12	2.68	1.41	6.39	10.56	0.25	0.47	0.77	0.018		0.46	0.56
Trias	13	2.71	2.72	2.76	2.04	2.54	2.74	0.74	6.86	24.64	0.21	1.41	2.16	0.70	2.95	12.06	0.38	0.64	0.89	<0.001	139.000	<0.01	1.41
Jura	14	2.70	2.73	2.84	2.08	2.56	2.70	0.46	6.01	13.32	0.09	1.47	6.35	0.17	2.52	11.28	0.27	0.61	0.88	<0.001	56.600	0.12	1.34
Kreide	2	2.71	2.72	2.73	2.21	2.45	2.70	0.85	9.57	18.30	0.26	3.25	6.25	0.32	4.30	8.29	0.75	0.79	0.83				
Tertiär	5	2.65	2.70	2.73	2.20	2.49	2.67	2.09	7.64	18.69	0.62	1.61	2.90	0.78	3.24	8.50	0.34	0.64	0.88	871.000		0.43	0.48
Quartär	3	2.62	2.66	2.69	1.70	2.06	2.36	12.00	22.80	35.12	2.10	7.81	14.83	5.08	11.95	20.67	0.41	0.59	0.72	1.220	1650.000	0.24	3.42
<i>Marmore</i>																							
	2	2.75	2.75	2.76	2.74	2.74	2.75	0.40	0.49	0.58	0.14	0.14	0.14	0.15	0.20	0.25	0.58	0.76	0.94				

Abb. 2: Überblick über verwitterungsrelevante Gesteinseigenschaften nach W.-D. Grimm³, die Mollassesandsteine sind farbig unterlegt.

1.1.3. Verwitterung von Natursteinen

Unter Gesteinsverwitterung versteht man die physikalisch-chemische oder biologische Veränderung oder Anpassungen von Gesteinen an der Erdoberfläche. Diese liegt zunächst in der Natur der Gesteine und ist selbst auch Grundlage für die Gesteinsbildung der Sedimente. Durch neuzeitliche, vom Menschen verursachte Umwelteinflüsse (Umweltverschmutzung, Klima etc.) werden diese Prozesse verschärft.

Im Wesentlichen handelt es sich bei der Verwitterung um einen Angriff auf den Stein über die Gesteinsoberfläche und die Gesteinsporen, der zur Entfestigung des Kornverbandes führt:

- o physikalisch: mechanische Spannungen im oder auf dem Gestein: Lockerung, Zerlegung etc.

³ Wolf-Dieter Grimm, Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland, Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, München 1989, Seite 85

- chemisch: Lösungs- und Umwandlungsreaktionen von gesteinsbildenden oder eingelagerten Mineralien und der spezifischen Bindemittel: Bindemittelverlust, Farbveränderung etc.
- biologisch: chemische oder physikalische Angriffe durch Pflanzen oder Tiere und/oder deren Stoffwechselprodukte auf die Gesteinskomponenten, Krustenbildungen etc.
- anthropogen: Veränderungen durch direkte und indirekte Eingriffe des Menschen: Zerstörungen etc.

1.2. Sandsteine

Sandsteine gehören petrologisch zu den klastischen Sedimentgesteinen und entstehen durch Erosion und Lösung von Steinen, die als Verwitterungsprodukte neu verdichtet und verkittet werden. Gesteins-physikalisch werden sie durch ihren Mineralbestand (wichtig z.B. für die Gesteins Härte), durch Korngefüge (wichtig z.B. für Aussehen und Bearbeitung) und Porenraum (wichtig z.B. für Wasseraufnahme und –Abgabe) unterschieden, sowie chemisch u.a. durch ihre zementären Bindungssysteme wie Kalk (karbonatisch-gebunden) oder Quarz (quarzitisch-gebunden).

Gesteinsbildende Mineralien der Sandsteine sind⁴:

- Salzminerale (Chloride, Sulfate, Borate, Nitrate)
- Tonminerale (Chlorit, Illit, Kaolinit, Halloysit, Montmorillonit)
- sowie Quarz, Chalcedon, Opal, Feldspäte und Glimmer.

Sandsteine unterscheiden sich mit 0,5 bis 20 Vol.-% stark in ihrer Porosität und den Kristallausformungen: je nach der Höhe des Entstehungsdruckes und des Bindemittels mit welchem die Körner zusammengehalten werden (meist calcitisch oder silikatisch)

Reine Sandsteine sind sehr selten. Meist handelt es sich um polymineralische Gesteine mit komplexen Bindungen, sowie Einfärbungen und Einlage-

⁴ Walter Schumann, Der neue BLV-Steine- und Mineralienführer, München 1994, Seite 62

rungen. Die meisten Sandsteine sind überwiegend quarzitisch gebunden und weisen eine Korngröße von 0,02 bis 2 mm auf⁵.

Der Natursteinhandel unterscheidet Sandsteine durch ihre Herkunft (z.B. Heilbronner Sandstein) oder durch ihre Verwendung (z.B. Nürnberger Burgsandstein), vergibt aber auch Phantasienamen (z.B. Rainbow für einen persischen Buntsandstein).

Petrologisch werden Sandsteine vornehmlich durch ihre erdgeschichtliche Entstehung (Perioden)⁶ unterschieden⁷ :

- Präkambrium: bedeutungslos in Deutschland
- Paläozoikum: Sandsteine im Devon, Karbon, und Perm
- Mesozoikum: zahlreiche, unterschiedliche Sandsteine in Trias, Jura und Kreide
- Känozoikum: Molassesandsteine im Tertiär

Sandsteine können auch durch ihre Lage in der geologischen Schichtenfolge (Stratigraphie) und ihrem Vorkommen (Topografie) unterschieden werden.

1.2.1. Faktoren für die Varietäten von Sandsteinen

Entsprechend ihrer Entstehung sind folgende Faktoren zur Unterscheidung der Sandsteine wesentlich⁸:

- Farbe: Mineralienbestand und -zustand
- Textur: Schichtung – Einlagerungen – postsedimentäre Veränderungen: prinzipielle Eigenschaften
- Struktur: Korngröße – Sortierung – Kornform – Kornkontakt: Festigkeit
- Komponenten - Matrix - Zement - Bindemittel: Festigkeit und Verwitterungsverhalten

⁵ Friedrich Müller, Historische Bau- und Dekorationsgesteine, in: Naturwerkstein und Umweltschutz in der Denkmalpflege, Ulm 1997, Seite 328

⁶ Erdzeitalter: Archaikum (Urzeit), Proterozoikum (Vorzeit), Paläozoikum (Erdaltertum), Mesozoikum (Erdmittelalter) und Känozoikum (Erdneuzeit). Siehe auch Anhang

⁷ Ebd., Seite 329

⁸ Angela Ehling (Hrsg.), Bausandsteine in Deutschland, Band 1, Stuttgart 2010, Seite 23 ff

- Porenraum: Porengröße – Porenradien – Porengeometrie: Permeabilität, Feuchteaufnahme und –Abgabe, hygri sche Dehnung

1.2.2. Störungen bei Sandsteinen

Sandsteine entstehen wie oben beschrieben durch Diagenese, also durch Verdichtung (Kompaktion) von zunächst sandigen Ablagerungen (Sedimenten). Durch zunehmenden Druck verändern sich sowohl die Formen der Sandkörner, als auch deren Lage und Kontaktflächen.

Verstärkt wird diese Verdichtung durch verschiedene Feinanteile (Matrix) und Ausbildung von Zementen, die sowohl unmittelbar chemisch kristallin an den Mineralkörnern anliegen können, als auch mittelbar als zementäre Masse, die die einzelnen Körner und Kornfraktionen umschließt und verkitet.

Die Komponenten Minerale, Matrix, Zement und Einlagerungen bilden idealerweise ein dichtes Sediment, das dann durch tektonische Ereignisse (Gebirgsbildung) an der Erdoberfläche gebracht und als Sandstein abbaufähig wird.

Dieser Idealzustand wird oft nicht erreicht sondern gestört. Störungen können sein:

- Bildung von Klüften bei tektonischen Prozessen
- Einlagerung von Mineralen, die eine geringe Eigenhärte haben oder nicht verbunden werden: Tongallen, Gerölle etc.
- Mineralumwandlungen und -Lösungen: Tone, Feldspäte etc.
- Schichtungsstörungen und Inhomogenitäten
- Schlechte Sortierung der Korngrößen
- Geringe Kornkontakte und Kompaktion
- Bindemittelart und Auflösung des Bindemittels: calcitisch oder quarzitisch etc.

1.3. Molassesandsteine

1.3.1. Molasse

Der Begriff Molasse entstammt vermutlich dem lateinischen „mollis“ – weich, dem mhd. malen und dem indogerm. mel – zerreiben, zermalen, mahlen, und wird heute in der Geologie für die „weichen“ Ablagerungssteine nördlich der Alpen gebraucht, die sich bis ins Tertiär in einem riesigen Becken im Voralpenland der heutigen Schweiz, Deutschlands und Österreichs niedergeschlagen haben. Das Molassebecken reicht im Westen vom Genfer See bis zum Wienerwald im Osten und wird im Süden von den Alpen und im Norden entlang der Donau von der schwäbischen und fränkischen Alb/Böhmerwald begrenzt. Es liegt auf den Resten der varistischen Gebirgsbildung⁹ über dem vindelizischen Rücken des Erdaltertums, über welche das Meer der Paratethys¹⁰ geflossen ist.

Dies lässt sich anhand von Fossilien schließen, die im Sediment der Molasse gefunden werden. Danach hat es Überflutungen durch das Meer gegeben (Meerwassermolasse), Absenkungsphasen des Geländes (Flysch-Trog) und des Meeres mit Einträgen und Verfüllungen von Flüssen aus dem Raum der heutigen Alpen (Süßwassermolasse), weitere Senkungen, Verwerfungen, erneute Überflutungen etc. Das Molassebecken hat sich also während des Tertiärs in transgressiv-regressiven Zyklen gebildet:

- Untere Meerwassermolasse (UM)
- Untere Süßwassermolasse (US)
- Obere Meeresmolasse (OM)
- Obere Süßwassermolasse (OS)
- inneralpine Molasse (IM) im unmittelbaren Kontaktbereich der Alpen (s.u.)

⁹ Vindelizische Rücken ist der Überrest der Varistischen Gebirgsbildung im Erdaltertum. Diese Gebirge wurden durch Verwitterung abgetragen. Reste finden sich u.a. noch in den deutschen Mittelgebirgen.

¹⁰ Tethys ist das Urmeer, das sich keilförmig in den Urkontinent Pangra geschoben hatte. Nach dem Auseinanderdriften und Bildung der Kontinente entstand das Meer Paratethys, das sich über große europäische Landmassen erstreckte.

Durch die Sedimentation, der Verfrachtung und Ablagerung von Verwitterungsprodukten von Gesteinen und Lebewesen, sind Schichtdicken von 1000 bis 4000 Metern entstanden.

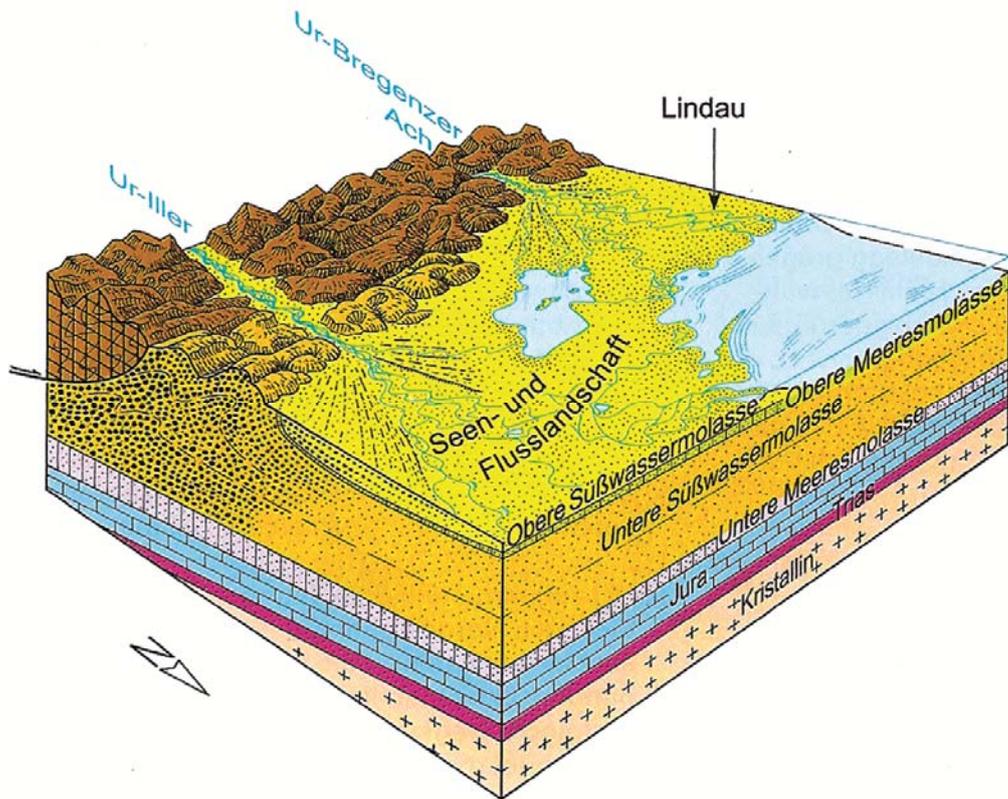


Abb. 3: Südrand des Molassebeckens im Bereich des heutigen westlichen Allgäu : Das Molassemeer hat sich bereits zurückgezogen und von den aufgefalteten Alpen (oberer Rand) wird über die Flüsse Schutt eingebracht¹¹.

Im Tertiär der Erdneuzeit wird die Molasse durch den nach Norden gerichteten Schub der Alpenbildung von den angrenzenden, geologischen Decken Helvetikum, Flysch und Kalkalpin gestaucht, bzw. überworfen und gefaltet. Es entsteht die subalpine, inneralpine Molasse oder Faltenmolasse. Sie wird von der weiter nördlich liegenden, davon „unberührten“, ungefalteten Vorlandmolasse unterschieden.

¹¹ Geotope in Schwaben, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg 2009, Seite 120

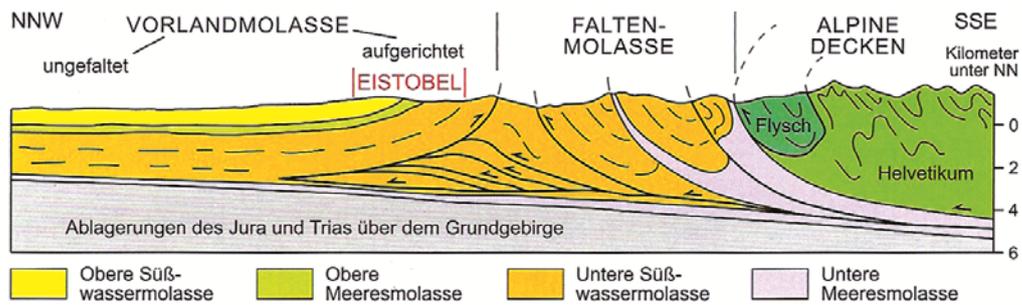


Abb. 4: Schnitt durch die Auffaltung der Molasse am nördlichen Alpenrand¹²

Diese vier Gesteinsformationen mit ihren tektonischen Beziehungen bilden quasi den Unterbau des Allgäuer Alpenvorlandes, über die sich dann eine Erosions- und Ablagerungsfläche aus der jüngsten Erdzeit (Eiszeiten des Quartär) gelegt hat.

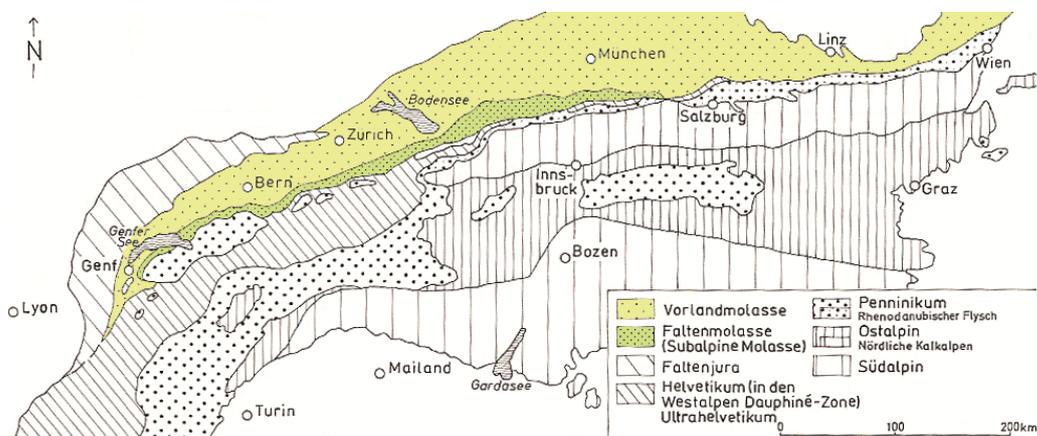


Abb. 5: Gesteine des nordalpinen Molassebeckens (die Molasseformationen sind farbig unterlegt)¹³

Der gesamte geologische Prozess von der Bildung und Formung des heutigen Molassebeckens reicht vom Erdmittelalter bis in die Erdneuzeit/Gegenwart und ist in seiner heutigen Ausprägung wesentlich von der Gebirgsbildung der Alpen beeinflusst (diese steigen immer noch auf und bewegen sich dabei nordwärts in das Molassebecken). Dies entspricht einem Zeitraum von ca. 60 Millionen Jahren¹⁴.

Unter Molasse werden also sowohl geologische Schichten, als auch Ergebnisse tektonischer Prozesse verstanden (tektofaziale Einheiten).

¹² Ebd., Deite 122

¹³ Geologische Karte von Bayern, Bayerisches Geologisches Landesamt, 1996, Seite 188

¹⁴ Herbert Scholz, Bau und Werden der Allgäuer Landschaft, Stuttgart 1995, Seite 1 ff

1.3.2. Überblick Molasse-Gesteine

In der Molasse finden sich typische Verwitterungsprodukte wie Gesteinstrümmer (Psephite), die zu Konglomeraten verfestigt wurden, Sande (Psammite), die zu Sandsteinen wurden, sowie toniger Schluff und Schlamm (Pelite) verdichtet zu Mergeln.

Je nach Diagenese und/oder Zementation sind Lockersedimente oder kompakte Festsedimente entstanden, die erdgeschichtlich dem Tertiär zugeordnet werden¹⁵:

- Untere Meerwassermolasse (UM): Feinsedimente und Sande; „Bausteinschichten“ (Lechbrucker Sandstein / Schweizer Molassesandsteine)
- Im Grenzbereich von Meer- und Süßwasser: Untere Brackwassermolasse: Kohle, „Fischschiefer“
- Untere Süßwassermolasse (US): Nagelfluh, „Granitische Molasse“, Schweizer Molassesandsteine
- Obere Meeresmolasse (OM): Feinsedimente und Sande, Glaukonit
- Im Grenzbereich von Meer- und Süßwasser: Obere Brackwassermolasse: Feinsedimente und Sande, Kalke, lokale Kohle
- Obere Süßwassermolasse: Suevit („Ries-Auswurf“), Kies-Geröll, Sand, Feinsedimente; Bentonit, Löß, Erze und Gips, Tongruben

Als Bau- oder Werksteine werden vornehmlich die nach tektonischen Prozessen lokal über Tage geworfenen Sandsteine der Bausteinschichten verwendet, die nach Füchtbaur durch einen Sedimenttransport in einem brackischen Meeresarm von der heutigen Schweiz ins östliche Bayern entstanden sind, zusätzlich verfüllt mit Abtragungsschutt aus der Alpenentstehung vom Süden her. Je nach Entstehungs- und Abbauort unterscheiden sich die Molassesandsteine in Aussehen und Eigenschaften zum Teil erheblich, d.h. es

¹⁵ Nach: Geologische Karte von Bayern, Bayerisches Geologisches Landesamt, 1996, Seite 146 ff

kann nicht von dem Molassesandstein im allgemeinen gesprochen werden, jeder Steinblock ist ein Unikat¹⁶.

Der Professor an der Gewerbeschule zu Wien, Heinrich Schmid, nennt um 1900 noch zahlreiche Abbaugelände von Molassesandstein¹⁷:

- Wiener Sandsteine aus Nieder- und Ober-Österreich: Grinzing, Sievering, Klosterneuburg, Kritzensdorf, Greifenstein, St. Andrä Wörtern, Königstetten, Hütteldorf, Purkersdorf, Gablitz, Preßbaum, Tullnerbach, Rekawinkel, Mais-Altlenzbach, Eichgraben-Neulenzbach, Rabenstein a.d. Pielach, Randegg b. Gaming, Waidhofen a.d. Ybbs, Sonntagsberg, Stetten b. Stockerau, St. Ulrich b. Steyr, Rosenau, Pinsdorf b. Gmunden, Buchberg, Weyregg
- Wiener Becken/Leithagebirge: St. Margareta Kalksandstein
- Mähren: Cetechowitz, Zelechowitz, Friedland b. Mistek, Jarzowa und Buchlowitz
- Aus der Steiermark: Schloßberg bei Leibnitz, St. Wolfgang bei Pettau, Kainacher Sandstein
- Aus Tirol und Vorarlberg: Alberschwende bei Bregenz, Schwarzahtobel
- Aus Bayern: Tölz, Grönten, Sulz, Peissenberg
- Schweiz: Berner Molasse aus Obermündingen und Burgdorf, Rorschach, St. Margarethen, Bolligen, Bäch

Im Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine von 1989 nennen W-D. Grimm und N. Ballerstädt für den Allgäuer Raum¹⁸:

- Allgäuer Bausteinschichten: Gröntenstein (kein Molassesandstein) von Rettenberg und Kranzegg, Trauchgauer Sandstein, Steingadener Sandstein, Steinbruchleiten, Echelsbach, Hittisau, Blaichach

¹⁶ Ninon Ballerstädt und Wolf-Dieter Grimm, Die unterschiedlichen Naturwerksteinqualitäten des Lechbrucker Molassesandsteins, in: Wolf-Dieter Grimm, Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland, Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, München 1989, Seite 45 ff

¹⁷ Schmid, Heinrich; Die natürlichen Bau- und Dekorationsgesteine“ 2. Auflage K.Graeser, Wien und B.G. Teubner, Leipzig 1905, Seite 57 ff

¹⁸ Ninon Ballerstädt und Wolf-Dieter Grimm, Die unterschiedlichen Naturwerksteinqualitäten des Lechbrucker Molassesandsteins, ebd., Seiten 48 und 51

- Lechbrucker Sandsteine: Falchen, Gründl, Vordergründl
- Pfaffenweiler Kalksandstein

1.3.3. Varietäten

„Der Abbau von Molassesandstein, vor allem Bausteinschichten, wurde vermutlich schon von den Römern betrieben und ist seit der Romanik vielerorts nachgewiesen. Zur Verwendung kamen die harten, beige-, grünlich- und bläulich grünen Kalksandsteinbänke“¹⁹.

Es kann zwischen „normalen“ Sandsteinen und Sandsteinen mit hohem Calcitanteil (Kalksandsteinen) unterschieden werden und der speziell untersuchte Lechbrucker Sandstein könnte nach Ballerstädt wohl „unter die sandsteinartigen Karbonatgesteine eingeordnet werden“²⁰. So sind der Karbonatgehalt (41-70%) und der Porenraum (5-18 Vol-%) die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale für diese Molassesandsteine.

Bei den Untersuchungen zum Salemer Münster wurden ebenfalls verschiedene Varietäten gefunden und zunächst nach ihrer charakteristischen Färbung klassifiziert:

blaue, gelbe, braune und grüne Varietät.

Aus dieser Farbklassifizierung lassen sich dann auch prinzipielle Tendenzen zu ihrer Zusammensetzung und ihrem Verwitterungsverhalten ableiten²¹.

Durch ihren Variantenreichtum und das ungünstige Verwitterungsverhalten sind historische Molassesandsteine nicht leicht zu erkennen. Optische Hinweise auf das Vorhandensein von Molassesandstein als verbauter Werkstein können sein:

- Die regionale Lage des verbauten Werksteins (z.B. Süddeutschland), sowie die Lage an einem historischen Transportweg (häufig über den Wasserweg Lech –Donau).
- Farbspektrum: gelb, beige, bräunlich, grünlich, bläulich grün, grau

¹⁹ N. Ballerstädt und W.-D. Grimm, Die unterschiedlichen Naturwerksteinqualitäten des Lechbrucker Molassesandsteins, 1989, Seite 48

²⁰ Ebd., Seite 54

²¹ Das Salemer Münster – Befunddokumentation und Bestandsicherung an Fassaden und Dachwerk, Arbeitsheft 11, Landesdenkmalamt Baden-Württemberg, Stuttgart 2002

- Textur: undeutlich, keine Bänderungen etc.
- Schichtung: Einlagerung von Geröllschnüren
- Struktur: fein- bis mittelkörnig
- Komponenten: Gerundete Quarzkörner umgeben von Karbonatkörnern und porenfüllendem calcitischem Zement, Tonminerale, Glimmer, Feldspate, Pflanzenhäcksel

1.3.4. Molassesandsteine der Schweiz

Obwohl F. de Quervain für die Schweiz 1969 noch zahlreiche regionale Steinbrüche nennt, sind heute nur noch wenige Schweizer Varietäten verfügbar²². Historische Brüche finden sich in:

- Basel / badisches Lörrach: „Meeressand“
- Ostschweiz: „Appenzeller Sandsteine“, Wolfhalden, Heiden, Wald, Oberegg, Rehetobel, Teufen, Bühler, Hargarten, Appenzell, Waldstatt, Schwellbrunn, Urnäsch, Ebnat, Krummenau, Nesslau, Maseltzrangen, Kaltbrunn, Benken
- Westschweiz / Genfer See: „Grés d’Attalens“, Corbier und Vaulruz
- Bodensee: St. Margrethen, Jona, Bollingen, Schmerikon, Neuhaus, Uznaberg
- Zugersee: Ägeri, Lothenbach
- Sonstige: Trogen, Teufen, Wattwill, Ullisbach, am Ricken, bei Altdorf, am Etzel, am Immensee St. Georgen etc.

Molassesandsteine werden heute nur in der Schweiz abgebaut. Für die nachfolgenden Betrachtungen und Untersuchungen wurden folgende zur Verfügung stehende Varietäten herangezogen:

- Bodenseeraum (OM): Rorschacher Sandstein (Staad), : gräulich
- Umgebung des Züricher Sees (US):
 - Guntliweider Sandstein, grau-rötlich

²² F. de Quervain, Die nutzbaren Gesteine der Schweiz, Bern 1969, Seite 205 ff

- Bollinger Sandstein (Bollingen-Lehholz): grau, graugelblich, beige
- Berner Land (OM): Berner Sandstein (Ostermündingen): grünlich.



Abb. 6: Sandsteinbruch in Staad (Rorschacher Sandstein) am Bodensee, Schweiz

1.3.5. Verwitterungserscheinungen bei Molassesteinen

1.3.5.1. Allgemeine Schadensbezeichnungen

Es gibt keine einheitliche, verbindliche Klassifikation von Verwitterungsschäden. Dr. Ing. Bernd Fitzner vom geologischen Institut der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule in Aachen nennt vier prinzipielle Verwitterungsformen mit 25 Untergliederungen²³. Prof. Dr. rer. Nat. Gabriele Grassegger von der Hochschule für Technik in Stuttgart nennt neun grundsätzlich verschiedene Verwitterungsformen²⁴:

- Anlösungsstrukturen auf der Oberfläche
- Ausblühungen
- Verfärbungen
- Rissbildung
- Schuppenbildung
- Schalenbildung
- Oberflächenparalleles Lösen von Schalen
- Aushöhlungen oder Alveolarbildungen
- Absanden oder Abmehlen
- Verschmutzungen oder Krustenbildungen

1.3.5.2. Typische Schadensformen bei Molassesandsteinen

Molassesandsteine werden hauptsächlich wegen ihrer sehr unterschiedlich dichten Kompaktion, der Angreifbarkeit von Calcit sowohl als Gesteinskorn als auch als Zement, dem Quellen von Tonmineralen und der Umwandlung und Glimmern und Feldspäten angegriffen.

In der Folge werden einige typische Schadensbilder für Molassesandsteine gezeigt und die Ursachen für diese Phänomene kurz beschrieben:

²³ S. Siegesmund, M. Auras, R. Snethlahe (Hrsg.), Steinzerfall und Konservierung, 2005, Seite 58

²⁴ G.Grassegger, Die Verwitterung von Natursteinen an Bauten und Baudenkmalern, in: Naturwerkstein und Umweltschutz in der Denkmalpflege, Ulm 1997, Seite 433 ff

- **Anlösung der Oberfläche und Rückverwitterung** mit Ausschälen der Geröllschnüre: In der Sedimentation hat sich eine Schichtenfolge von feinen und groben (Gerölle) Komponenten ergeben. Durch die Rückverwitterung der Werksteinoberfläche, dem Herauslösen von feinen calcitischen Komponenten und Bindemitteln, verbleiben die härteren Gerölle als gut sichtbare Geröllschnüre.



Abb. 7: "Herauspräparierte" Geröllschnüre an einer frei bewitterten Oberfläche, am Wittelsbacherdenkmal in Oberwittelsbach, Aichach

- **lamellenartige Schuppenbildung:** durch geringe Kompaktion werden an Korngrenzen ganze Komponentengruppen parallel zur Sedimentationsschichtung abgesprengt. Ursachen können Lösungsprozesse, aber auch Scherspannungen nach hygri-schem Quellen oder Frostdehnung sein.



Abb. 8: Schuppige Verwitterung an einem "auf Spalt" eingesetztem Gewände in Kirchberg, Schweiz.

- **Verfärbungen** entstehen u.a. durch Hydratationen von Eisenerzen (Limonit), die zu Zersetzungen und Umwandlungen führen.



Abb. 9: Rötliche Verfärbungen im graubeigen Sandstein und im Marmor an einem exponiert nach Süden ausgerichtetem Grabdenkmal des Protestantischen Friedhofs, Augsburg.

- **Schalenbildung:** Schalenbildung durch eine vorhergegangene Sanierungsmaßnahme: nach einer Imprägnierung sind verschiedene feste Schichten entstanden. An den Kontaktflächen kommt es durch thermische oder hygri-sche Dehnungen zu Spannungen und zum Abschalen.



Abb. 10: Abplatzungen durch Materialspannungen und Schalenbildung in einem Epitaph in der Basilika St. Ulrich und Afra, Augsburg

- **Biogene Krusten:** Niederschläge aus Staub und Regen bringen Mikroorganismen, die sich auf dem Sandstein festsetzen. Es kommt zu einer komplexen Beziehung von calcitischem Untergrund, Mikroflora und Klima, und damit zu einem Säure- und Löseangriff auf das Trägermaterial.



Abb. 11: Kruste aus Mikroorganismen auf der Kreuzblume des Wittelsbacherdenkmals in Oberwittelsbach, Aichach

- **Rissbildung** mit oberflächen- und schichtparalleler Abhebung ganzer Schichten durch Druck und hygrisches Quellen: nach dem Einbau falsch geschichteter Werksteine werden oft durch Druckspannung die Lagerschichten nach außen gewölbt. Diese Verformung begünstigt die Wasseraufnahme bis in tiefe Schichten. Hygrisches Quellen und Dehnen in den Tonmineralen erzeugt zusätzlich Scherspannung. In der Wechselwirkung der Dehnungsprozesse wird der Kornverband zermürbt und es kommt zum Auf- bzw. Abspalten.

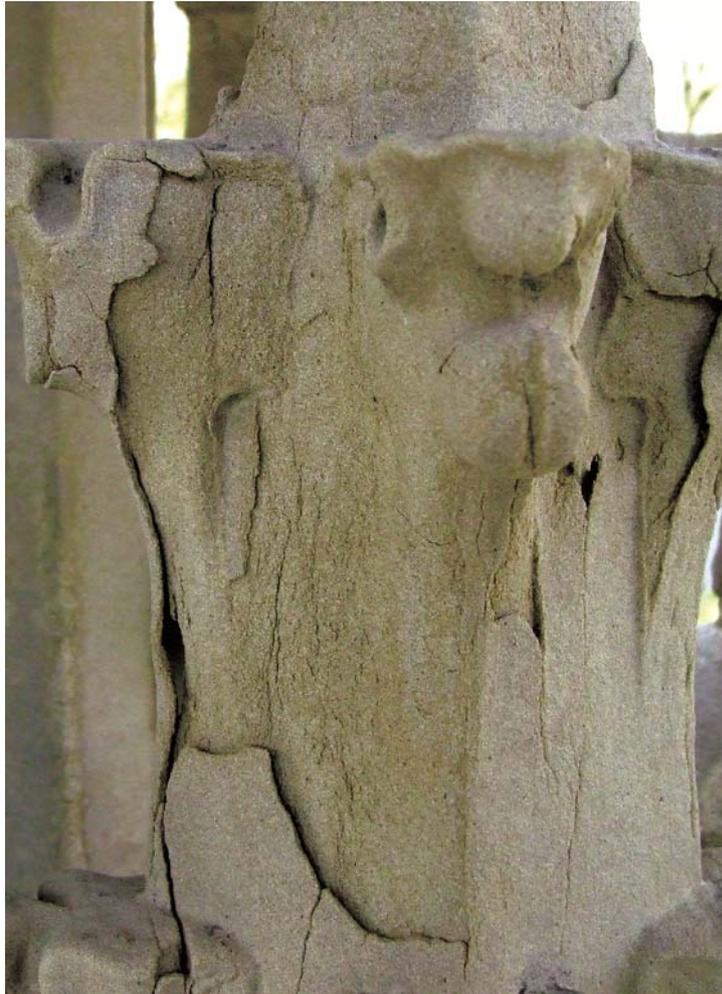


Abb. 12: Schichtenparalleles Aufspalten an einer Fiale am Wittelsbacherdenkmal in Oberwittelsbach, Aichach

- **Parallel sich lösende Schalen und Schichten:** Das Abheben von Schalen (oben) und Schichten (unten) kann durch ein Abscheren an Sedimentationsschichten entstehen und durch schichtweises, wiederholtes hygrisches Quellen und Schwinden von Tonmineralen verursacht werden. Dieses Phänomen tritt sowohl oberflächlich als auch in tieferen Schichten auf, wenn Wasser erst einmal über offene Lager oder Fugen einen wirksamen Zugang ins Schichtsystem bekommen hat.



Abb. 13: Abdeckplatten an der Lechbrücke in Lechbruck lösen sich blättereigartig auf.



Abb. 14: Aufspalten und Ablösen von Gesteinslagern in einer Balkonplatte von außen nach innen. Schaezlerpalais, Augsburg

- **Absanden und Abmehlen:** durch Wasser wird das calcitische Bindemittel gelöst, der Kornverband verliert seinen Zement und die einzelnen Gesteinskörner fallen ab.



Abb. 15: Durch einen Feuchtestrom aus dem Untergrund wird das Bindemittel in einer Pfeilerbase gelöst und es kommt zum Absanden. Säulenbasis Alter Friedhof Landsber/Lech.

- **Mineralumwandlung:** Über Staub, Regenwasser oder Luft eingebrachte Schwefelverbindungen kommt es allmählich zur vollflächigen Mineralumwandlung von Calciumkarbonat des Bindemittels zu Calciumsulfat, das sich als Gipskruste niederschlägt.



Abb. 16 In einer großflächigen Gipskruste kommt es zu Spannungen und Abplatzungen, Abt-Epitaph Steingaden.

- **Komplexe Schädigung** eines Grabmals: Deutlich erkennbar ist, dass der feuchteschutzte Bereich der Figur weniger Verwitterungsphänomene zeigt als der exponierte äußere Rand des Grabmals. Hier reichen die feuchteinitiierten Schadensphänomene vom Absanden über Abschuppen bis zum Abbrechen ganzer Bereiche.



Abb. 17: Detail eines geschädigten Priestergrabes in Markt Thierhaupten

2. Konsolidierungsmittel

Geschädigte Natursteine müssen nach einem restauratorischen Konzept (Anamnese und Diagnose) therapiert werden. Vor der Restaurierung steht die Konservierung, der Erhalt der Denkmalsubstanz. Dazu ist es nötig, Konsolidierungsmaßnahmen am und im Material zu ergreifen.

Konsolidierung beinhaltet:

- Strukturelle Maßnahmen: das Verfestigen der maroden Substanz über Bindung und Stabilisierung gestörter Oberflächen
- Funktionelle Maßnahmen: die Wiederverbindung der losen (Bau-) Teile

Konsolidierungsmittel gehören zu den Konservierungsmitteln. Sie sind für den Einsatz am Schadensort gemacht. Sie können das geschwächte Material stabilisieren und damit den komplexen Verwitterungsprozess verzögern oder im günstigen Fall anhalten.

Auf historische Konservierungs- und Konsolidierungsmittel wie Öle, natürliche Harze und Wachse, soll hier nicht eingegangen werden. Es werden Mittel betrachtet und untersucht, die heute industriell hergestellt werden und festigende und/oder verbindend-klebende Wirkung haben.

Moderne Konsolidierungsmittel bestehen aus anorganischen oder organischen Bindemitteln, die meist kombiniert mit Zusätzen oder Mischungen zu Systemen vergütet sind:

- anorganisch: Kalk- oder Zementleime, oft durch Dispersionen vergütet; Wasserglas
- organisch: Polymerisationsklebstoffe gelöst oder ungelöst; spezielle siliziumorganische Verbindungen (Silikatkleber)

2.1. Bindemittel und Bindemittelsysteme

„Die Aufgabe von Bindemitteln besteht darin, körnige Materialien (Zuschlag) zu binden, d. h. die einzelnen Körner fest miteinander zu einem Festkörper zu verbinden.“²⁵ Im Bauwesen werden zahlreiche Bindemittel eingesetzt, die zudem sehr unterschiedlich bezeichnet werden können.

2.1.1. Bindemittelbezeichnungen

Bindemittel können verschieden bezeichnet und unterschieden werden:

- **Herkunft:** pflanzlich (z.B. Leinöl), tierisch (z.B. Kasein), mineralisch (z.B. Kalk), synthetisch-organisch (z.B. Kunstharze) und synthetisch-anorganisch: (z.B. Wasserglas)
- **Zusammensetzung:** Öle, Harze, Leime, Ei
- **Art des Trocknens oder Erhärtens:** physikalisch (Verdunsten des Lösemittels), chemisch (z.B. Oxidation, Hydratation Polymerreaktion), physikalisch-chemisch (Verdunsten des Lösemittels und chemische Reaktion des Bindemittels).

2.1.2. Bindemittelklassifizierung nach ihrer Herkunft

Im Bauwesen werden gegenwärtig folgende Bindemittel eingesetzt (Klassifiziert nach Herkunft):

2.1.2.1. Mineralisch-anorganische Mittel:

- **Hydraulische Kalke:** Natürlich hydraulischer Kalk oder Kalk versetzt mit hydraulischen Anteilen. Es kommt zur schnellen Reaktion der hydraulischen Komponenten mit Wasser und zu einem langsamen Erstarren und Erhärten des Calciumhydroxid nach der Aufnahme von Kohlendioxid aus der Luft.
- **Zemente:** Fein gemahlene, hydraulische Bindemittel aus Zementklinker, die unter Wasseraufnahme an Luft und unter Wasser steinartig erhärten und dann wasserbeständig sind.

²⁵ D. Knöfel und F. Winnefeld, Mörtel-Putze-Betone, in: Naturwerkstein und Umweltschutz in der Denkmalpflege, Ulm 1997, Seite 382

2.1.2.2. Synthetisch-anorganische Mittel (Wassergläser)

Ihre Silikate verbinden sich mit mineralischen Stoffen. Je nach Wasserglas (Natrium-, Kalium-, Lithiumwasserglas) bilden sich unterschiedlich wasserlösliche Salze.

2.1.2.3. Siliziumorganische Mittel:

Kieselsäureester und Kieselsole scheiden Kieselgel als neues Bindemittel ab.

2.1.2.4. Kunstharze, Kunstharzlösungen

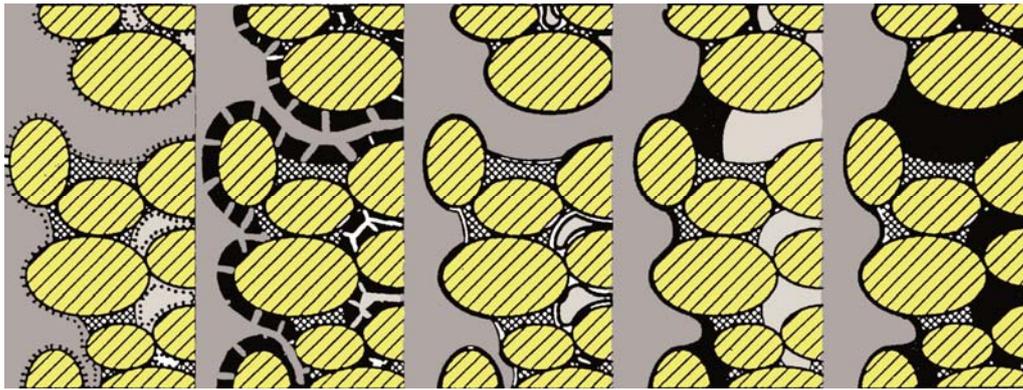
Polyurethane (PU), Methylmetacrylate (P/MMA), Epoxidharze (EP) oder Polyesterharze (PES) werden zur Polymerisation gebracht und lagern sich als Film oder Feststoff ab.

2.1.2.5. Kunststoffdispersionen, Emulsionen

Feinverteilte Polymere als wässrige Dispersionen oder Emulsionen.

2.2. Konsolidierungsmittel und ihre Wirkmechanismen

Industriell gefertigte Konsolidierungsmittel werden nach Herstellerangaben angemacht und direkt in den Konsolidierungsräumen zu Reaktion gebracht, wo sie einen Film oder Feststoff ausbilden, der sich in den Porenräumen der Fügeflächen verankert. Sie können auch in gelöster Form – in Lösungsmittel oder als Dispersion an die Flächen gebracht werden, wobei das Konsolidierungsmittel nach Verdunsten des Lösungsmittels zur Wirkung kommt. Dies geschieht in den Porenräumen und an den Kontaktflächen der Gesteinskomponenten. Dort bilden sich entweder stabilisierende Filme oder kompakte Festkörperstrukturen (schwarz, siehe Abbildung unten).



Hydrophobierende
Imprägnierung

Klassische
Steinfestigung

Filmbildende
stabilisierende
Imprägnierung

Oberflächen-
versiegelung

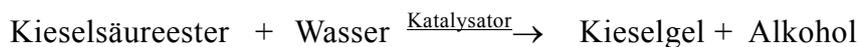
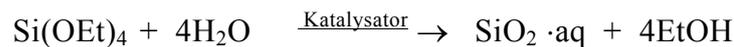
Volltränkung

Abb. 18: Schemazeichnung nach Honsinger²⁶ über die Anlagerung von Polymeren (schwarz) an Poren bei Konservierungsmaßnahmen

Die für die Konsolidierungsversuche eingesetzten Mittel werden in der Folge kurz klassifiziert und beschrieben:

2.2.1. Verfestigungsmittel (Siliziumorganische Mittel)

Als Festigungsmittel kommen überwiegend Kieselsäureester (KSE) zum Einsatz. Kieselsäureester reagieren in Kontakt mit Feuchtigkeit zu einem amorphen Kieselgel ($\text{SiO}_2 \cdot \text{aq}$) mit festigenden Eigenschaften im Porenraum der Natursteine.



Zur Wiederherstellung des ursprünglichen Festigkeitsprofils von Untergründen werden unterschiedliche Mengen an festigendem Kieselgel als Bindemittel benötigt. Aus diesem Grund werden werkseitig Produkte mit unterschiedlichen Gelabscheidungsraten angeboten.

Diese werden durch unterschiedliche Mischungsverhältnisse von großen zu kleinen Kieselsäureester-Molekülen oder durch Zugabe von wasserfreien Lösemitteln eingestellt.

²⁶ Honsinger, D. J. (1990): Strukturmerkmale polymerimprägnierter Sandsteine, Dissertation RWTH, Aachen.

Kieselsäureester können auch das Bindemittel für Kittmassen und Kleber sein.

- **Remmers KSE 100 bis 500, Rajasil OH-100 u.a.:** (hier nicht verwendet): Steinverfestiger auf Kieselsäureesterbasis ohne hydrophobierende Wirkung. Die verfügbaren Produkte unterscheiden sich durch ihren Wirkstoffgehalt, die Gelabscheidungsrate und evtl. durch zusätzliche Haftvermittler.
- **Remmers KSE-Modul-System:** „Remmers KSE 500 STE kann entweder direkt, ohne weiteren Zusatz feiner Zusatzstoffe appliziert werden (z.B. zum kraftschlüssigen Überbrücken von Mikrorissen bis ca. 300 µm) oder aber als Bindemittel zur Herstellung von Hinterfüllmassen, Anbösch- und/ oder Kittmörteln ...“²⁷

2.2.2. Anorganische Mittel

Mit einer Wasserglaslösung auf kalkgebundenen Natursteinen kann in der Steinoberfläche praktisch wasserunlösliches Silikat ausgefällt werden. Allerdings führt dies oft zur Krustenbildung und zur Grauschleierbildung. Wegen der hohen Alkalität besteht zusätzlich die Gefahr einer Salzbelastung und Verfärbungen bei metallhaltigen Werksteinen.²⁸



Kaliwasserglas Wasser + Kohlendioxid → Siliciumdioxid + Kaliumcarbonat

- **Remmers-Kiesol (Kürzel: Rem-K):** „Kiesol ist ein flüssiges Kombinationsprodukt aus wasserabweisenden Kieselsäureverbindungen“²⁹

2.2.3. Mineralische Verfüllmittel, Mörtel

Mineralische Mittel, wie Injektionsleime, Feinstsuspension etc. wirken in der Hauptsache durch das Abbinden der Zemente und hydraulischen Kalke.

²⁷ Remmers, Technischer Leitfaden KSE-Modul-System

²⁸ R. Karsten, Bauchemie, Karlsruhe 1992, Seite 193 ff

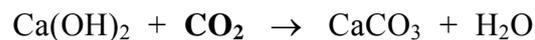
²⁹ Remmers, Technisches Merkblatt 1810

Bei den hydraulischen Kalken findet eine parallele Reaktion der Carbonatisierung und der hydraulischen Umlagerung kalkreicher Silikate und freier Tonsäuren in kalkarme Salzhydrate statt (Hydratation).

Gebrannte Zementklinker weisen als Ausgangsstoff verschiedene Calciumsalze und freie Tonsäuren, sowie Aluminate und Ferrite auf, die dann mit (Anmach)Wasser zur hydraulischen Umlagerung gebracht werden. Es entstehen ineinander verwachsene, auskristallisierte Hydrate.

In der flüssigen Phase bindet der Zementleim „die Gesteinskörnung ein und füllt die Hohlräume zwischen den Körnern aus“³⁰. Mit Auskristallisation der Salzhydrate hat sich der feste Zementstein gebildet. Die eingesetzten Kalke und Zemente sind extrem fein gemahlen um eine möglichst niedrige Viskosität zu erreichen.

Karbonatisierung:



Calciumhydroxid + Kohlendioxid → Calciumcarbonat + Wasser

Hydratation des Alits:



Tricalciumsilikat (Alit) + Wasser → C-S-H-Phasen + Portlandit

(versch. Hydratationsprodukte)

- **Rajasil-Injektionsmörtel:** „Kalkhydrat, HS- und HS NA-Zemente, Puzzolane mineralische Zuschläge, Zusatzmittel zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit“³¹
- **BL REPAR-H20 Injektionsmasse:** „BL REPAR-H20 Injektionsmasse ist eine mineralische Mischung aus hochwertigen Rohstoffen, die mit Wasser angemacht wird und über eine hohe Haftfestigkeit verfügt“³²

³⁰ R. Bendix – Bauchemie, S.323

³¹ Remmers, Technisches Merkblatt 2107

³² BL, Technisches Merkblatt <http://www.blssystem.ch/main.html?src=%2Findex2.html#7,4>

- **Remmers Injektionsleim 2K:** „Zementsuspension zum Verfüllen. Komponente A: Injektionsflüssigkeit - Art.-Nr. 0475, Komponente B: Ultrafeines, werkgemischtes hydraulisch erhärtendes Bindemittel (Pulver)“³³
- **PCI Bohrlochsuspension:** „Spezialzement-Mischung mit Zusätzen zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit. Enthält weder Asbest noch anderweitige Mineralfasern. Kein gesundheitsschädlicher silikogener Quarz-Feinstaub bei der Verarbeitung.“³⁴

2.2.4. Klebstoffe und Reaktionsharze

Reaktionsharze sind industriell hergestellte organische Produkte mit festiger und klebender Wirkung. Sie werden durch ihre Reaktionspartner und Reaktionsabläufe in Gruppen unterschieden:

- Epoxidharze (EP)
- Polyurethanharze (PUR)
- Acrylharze (PMMA)
- Polyesterharze (PES)

Die Komponenten (z.B. Harz und Härter) werden exakt nach Herstellervorschrift dosiert und gemischt und beginnen eine Polymerisation-Reaktion. In dieser „flüssigen“ Phase können die Harze zwischen die Gesteinskörner in die Porenräume und Hohlstellen kriechen bis der Glasübergangspunkt erreicht ist und sie erstarren. Aus den monomeren Ausgangsstoffen werden große, komplexe Kettenmoleküle (Kunststoffe).

³³ Remmers, Technisches Merkblatt Artikelnummer 0476

³⁴ PCI, Technisches Merkblatt 389

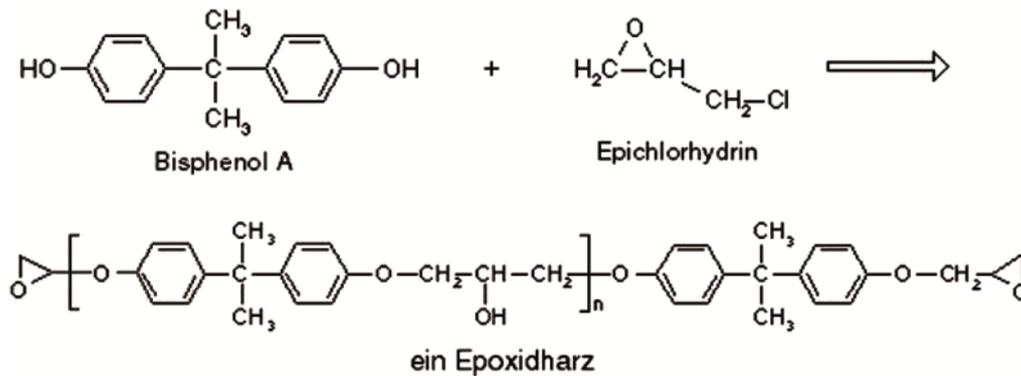


Abb. 19: Polymerisation (Polyaddition) eines Epoxidharzes aus Epichlorhydrin (Harz) + Bisphenol A (Härter) \rightarrow Epoxidharz³⁵

Polymere können auch gelöst verwendet werden. Dazu werden meist Polymethylmetacrylate (PMMA) und Mischpolymerisate in organischen Lösemitteln verwendet. Je nach Anwendungszweck und Anforderung wird die Konzentration durch Zugabe von Lösemittel verändert.

Wässrige Dispersionen sind aufgrund des schlechten Eindringverhaltens (Teilchengröße) nur eingeschränkt einsetzbar.

- **Akemi Marmorkitt 1000 transparent wasserhell:** „AKEMI Marmorkitt 1000 Transparent Wasserhell und Wasserhell L-Spezial sind flüssige bzw. gelartige Zweikomponenten-Produkte auf Basis in Styrol gelöster, UV-stabilisierter, ungesättigter Polyesterharze.“³⁶
- **Motema Epoxiinjektionsharz langsam EP IL:** „Lösemittelfreies Epoxidsystem. .. Besonders langsam reagierendes Injektionssystem.“³⁷
- **Motema Injektionsharz PMMA:** „Unverfülltes Reaktionsharz auf Methacrylbasis (MMA).“³⁸
- **PCI Apogel A:** „Epoxidharz, lösemittelfrei.“
- **PCI Apogel E:** (Polyurethanharz, lösemittelfrei)³⁹.
- **PCI Apogel-schnell:** „Modifiziertes Methacrylatharz“⁴⁰

³⁵ <http://www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/kunststoffe/polyadd.htm>

³⁶ AKEMI, Technisches Merkblatt Marmorkitt 1000 Transparent Wasserhell

³⁷ Inter-Monument, Technisches Merkblatt M-EP Injektion L

³⁸ Inter-Monument, Technisches Merkblatt M-PMMA Injektion

³⁹ PCI, Technisches Merkblatt 501

- **Remmers Injektionsharz 100:** „Lösemittelfreies, besonders niedrigviskoses Epoxydharzsystem, 2-komponentig.“⁴¹

2.3. Anforderungen an die Konsolidierungsmaterialien

Da die Permeabilität von Natursteinen durch deren unveränderliche Poren festgelegt ist, müssen die Konsolidierungsmittel in ihrem flüssigen, nicht ausreagiertem Zustand eine Viskosität aufweisen, die es erlaubt, in das Porensystem der geschädigten Steine zu gelangen. Über hohen Druck ist dies nicht zu bewerkstelligen, da die Gefahr von Zerstörung der maroden Substanz zu groß ist.

Die physikalischen Parameter der Konsolidierungsmittel im ausreagiertem Zustand müssen auf das historische Material abgestimmt sein und wenn nötig deren Werte annähernd erreichen⁴².

Dynam. E-Modul:	E-dyn	80-100%
Druckfestigkeit:	β_D	60-100 %
Feuchtedehnkoeffizient:	α_{Hy}	50-100 %
Wärmedehnkoeffizient:	α_T	50-100 %
Wasseraufnahmekoeffizient	w	50-100 %
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	μ	50-100 %
Haftzugfestigkeit	β_{HZ}	0,5-1,5 N/mm ²
Schwindmaß		< 1 mm/m
Porosität		80-120 %
Biegezugfestigkeit		60-100%

⁴⁰ PCI, Technisches Merkblatt 502

⁴¹ Technisches Merkblatt 0944

⁴² WTA Merkblatt Kunststeinsanierung Natursteinkonservierung

3. Techniken und Verfahren zur Verbindung und Stabilisierung loser Schichten und Lager

3.1. Vorbemerkungen

Für das Erscheinungsbild von Natursteinbauwerken ist die bearbeitete Oberfläche des Werksteins ein wesentliches Gestaltungselement. Als Gebäudehaut zeigen sich hier Umweltangriffe und Verwitterungszustände am schnellsten. Über die Poren der Gesteine wird alles nach innen und außen getragen. Die Spuren dieses Austausches werden durch die Oberflächenbeschaffenheit unmittelbar augenscheinlich: sie unterscheiden sich durch ihre gewollte Oberflächenbearbeitung und ihrem ungewolltem Verwitterungszustand.

Gesteine und ihre Komponenten sind im geschliffenen Zustand der Oberfläche am deutlichsten erkennbar, in dem sich die Kristalle und Bindungen deutlich unterscheiden lassen. Aus diesem Grund ist auch das Dünnschliffverfahren zur Sichtbarmachung von Gesteinstextur und –Struktur und damit zur Gesteinsbeurteilung gängige Praxis.

Wesentlich schwieriger sind Textur und Struktur nach einer handwerklichen Bearbeitung zu erkennen, wobei einzelne Kristalle ausgesprengt oder gar zerstört werden, zugunsten eines grafischen oder plastischen Oberflächenbildes.

Noch schwieriger wird es im Zustand der Verwitterung, bei der es je nach Verwitterungsgrad von der Gesteinsveränderung und Krustenbildung, der Gesteinsablösung und der Gesteinsdeformation bis zur Zerstörung (Ausbrüche und Fehlstellen) des Gesteins kommen kann. Damit kann sich das Aussehen dramatisch verändern und das Gestein auf den ersten Blick nicht mehr sicher erkannt werden.

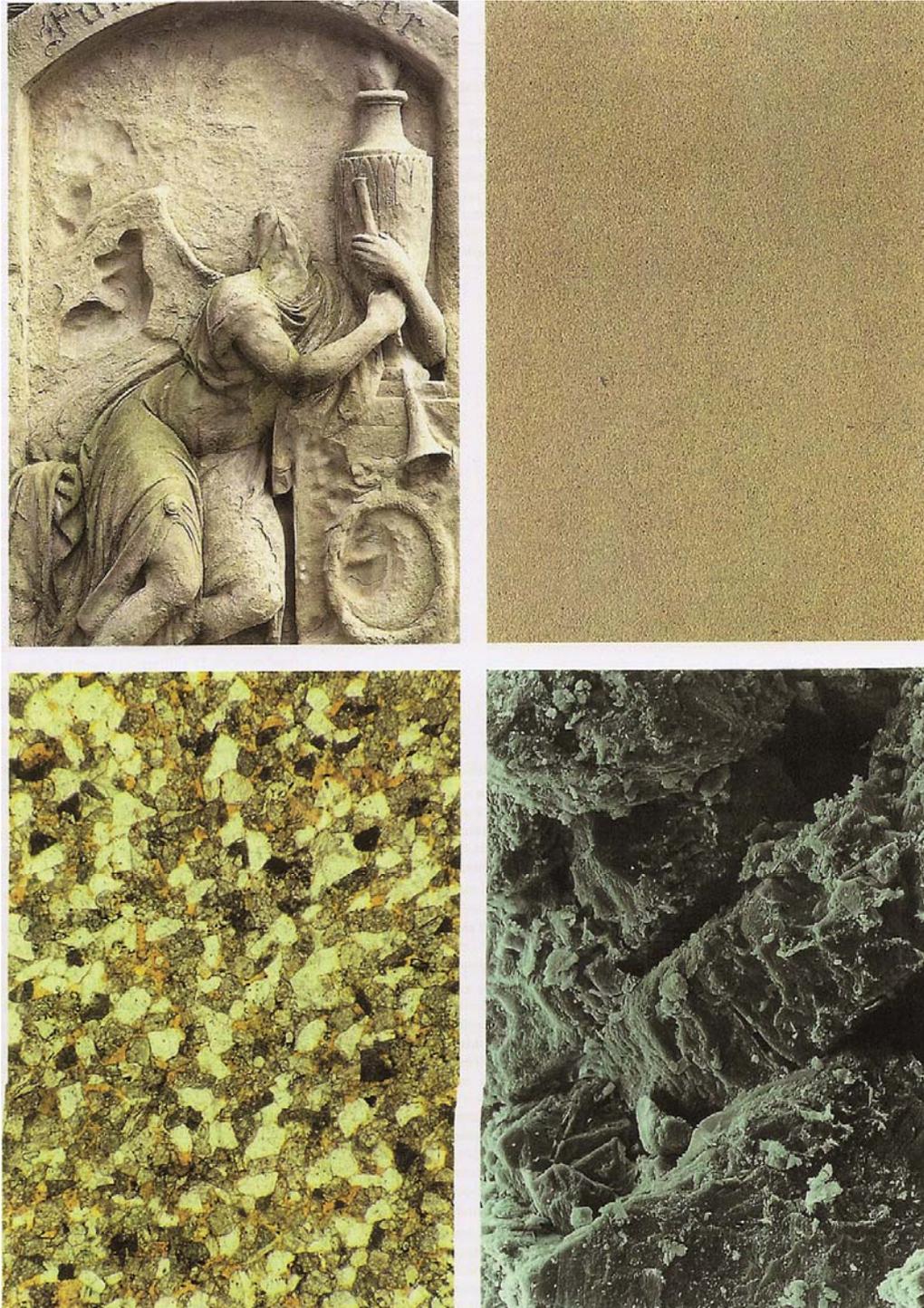


Abb. 20: Lechbrucker Sandstein in vier Sichtweisen: verwittertes Grabmal, geschliffene Oberfläche, Dünnschliff und Rasterelektronenaufnahme⁴³

⁴³ W.-D. Grimm, Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland, Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, München 1989, Gestein 132

Oberflächen können aber auch im Gesteinsinneren entstehen, wenn es aufgrund von inneren Spannungen oder äußeren Angriffen zu Rissen, Spalten und Klüften kommt. Die Flanken dieser Erscheinungsformen werden zu neuen Oberflächen im Gestein. Solche Deformationszonen können von wenigen mm (Haarrisse) bis zum Auf- und Abspalten ganzer Steinbereiche im cm-Bereichen (sich öffnende Lager) kommen. Auch Platten- und Mauerwerksverbände können aufgehen und großformatige Öffnungen ausbilden, die weit ins Innere der Konstruktion reichen.

Durch geeignete Verfahren wird versucht:

- die geschädigte Steinoberfläche zu konsolidieren (festigen),
- deformierte, geöffnete Steinbereiche zu sichern und wieder miteinander zu verbinden.

3.2. Oberflächenverfahren

Der Konservierung von Gesteinen und ihren Oberflächen wird seit Jahrzehnten großes Augenmerk gewidmet, was sich u.a. an zahlreichen Publikationen zum „Verbundforschungsprojekt Steinzerfall und Steinkonservierung“ zeigt. Seit den 1980er Jahren gibt es ständige Entwicklungen von Konservierungsmitteln wie z. B. den organischen Polyurethanharzen nach dem sogenannten Aachener Modell oder den mittlerweile zur Produktfamilie angewachsenen Kieselsäureestern.

In dieser langen und breiten Betrachtung von Natursteinschäden und den daraus entwickelten Untersuchungsmethoden, Konservierungsmitteln und -Techniken, zeigt sich immer wieder, dass jeder Fall ein Einzelfall ist und dass aus der Vielzahl möglicher Mittel und Techniken die jeweils geeigneten eingesetzt werden müssen.

3.2.1. Applikationsverfahren

Allen Applikationsverfahren ist gemeinsam, dass über die oberen Porenräume versucht wird, eine Durchtränkung der verwitterten Steinzone bis

zum unverwitterten Steinbereich hin zu erreichen. Dafür können durchaus mehrere Applikationszyklen erforderlich sein.

- **Flutverfahren:** über Airless-Anlagen, Elektropumpen, Handsprühergeräte (explosionsgeschützt) und Laborspritzflaschen wird der Oberfläche Konservierungsmaterial angeboten, das über kapillares Saugen in die Poren aufgenommen wird.
- **Bürsten-, Pinsel- und Walzenauftrag:** bei kleinen oder kleinflächigen Objekten ist es möglich, Material direkt aufzutragen.
- **Kompressen-Methode:** um über das kapillare Saugen einen ständigen Konservierungsmittelintrag zu ermöglichen, werden Kompressen aufgelegt und ständig „feucht“ gehalten.
- **Tauchverfahren:** bei Einzelobjekten ist es möglich, diese so in ein Tauchbad zu geben, dass ein Saugen der Poren und gleichzeitig eine Entlüftung möglich ist.



Abb. 21: Auflegen einer Cellulose-Kompresse auf einem Abt-Epitaph, Werkstatt Roth

3.2.2. Druckverfahren (Injektionen über Oberflächenpacker und Injektionshilfen)

Durch Druckinjektion wird versucht, eine höhere Eindringtiefe und bessere Verteilung des Festigungsmittels im Porenraum zu erreichen. Dies kann einfach über Spritzen oder aufwendig über Injektionsgeräte und -anlagen geschehen.

Auf Risse werden als Einfüllstutzen sogenannte Packer aufgesetzt (geklebt) und das übrige Riss-System abgedichtet. Über Pumpen, Spritzen, Sonden usw. kann das Injektionsgut mit geeignetem Druck soweit möglich in das geschädigte System eingebracht werden.

Durch Anlegen eines Unterdrucks (Vakuumtränkung) können ebenfalls höhere Eindringtiefen des Festigers erreicht werden.



Abb. 22: Rissinjektion über Packer und Spritzen an einer Balkonplatte, Werkstatt Roth

3.2.3. Anböschungen und Hinterfüllungen

Anböschungen und Hinterfüllungen dienen in der Regel dazu, kleine Spalten und Klüfte wieder an den Originalstein anzubinden und über kleinflächige Mörtelantragungen zu schließen.

3.2.4. Verfüllungen in Rissen und Spalten

Klüfte, Risse und Spalten dienen als einfaches Portal, um auf gegebenem Weg tief ins Innere des geschädigten Steines zu gelangen. Über Konservierungsmittel und –Mörtel wird versucht, einen Kraftschluss der offenen Flanken und eine geschlossene Oberfläche zu erreichen.



Abb. 23: Ein im KSE-Modulsystem verfülltes Rissnetzwerk, Werkstatt Roth

3.3. Tiefenverfahren

Können Risse und Deformationen nicht mehr über die vorher beschriebenen Oberflächenverfahren erreicht und geschlossen werden, sind Tiefenverfahren nötig.

Über sie versucht man von innen nach außen, also von der Tiefe an die Oberfläche, eine systematische Konsolidierung und Verfüllung der geschädigten oder abgelösten Bauteilbereiche zu erreichen.

Diese Verfahren stellen meist einen hohen Eingriff in die Substanz dar. Bei statisch relevanten Bauteilen dürfen sie nicht ohne Begleitung eines Tragwerkplaners ausgeführt werden. Häufig kommen diese Techniken aus dem Ingenieurbau, können aber auch objektspezifisch entwickelt oder modifiziert werden.

3.3.1. Bohrloch- oder Rissinjektionen

Über eine oder mehrere Bohrungen werden Kanäle so in das Bauteil eingebracht, dass der oder die geschädigte(n) Bereich(e) erreicht und konsolidiert werden können. Dies geschieht direkt zur Schadstelle hin oder indirekt über Bohrungen quer zum Riss. Der Riss wird oberflächlich abgedichtet und dann über geklebte oder eingeschlagene Packer das Injektionsmaterial in den sauberen Injektionskanal eingebracht. Die Entlüftung erfolgt über noch nicht verfüllte Injektionskanäle.

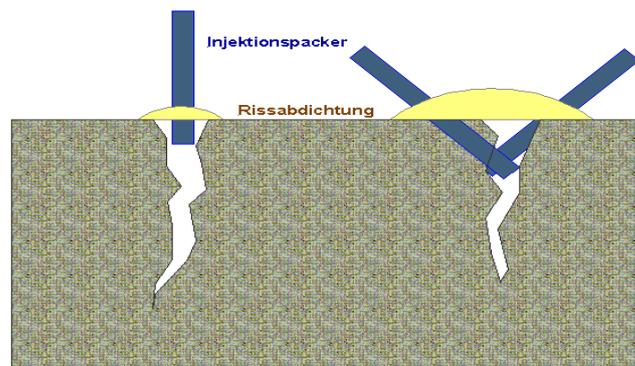


Abb. 24: Rissinjektion durch einen direkten Injektionskanal (links) und durch indirekte (rechts).

3.3.2. Hohlraum- oder Flächeninjektionen

Ähnlich der Rissinjektion versucht man über zahlreiche Bohrungen einen Zugang zum Hohlraum zu bekommen, um ihn dann systematisch zu verfüllen.

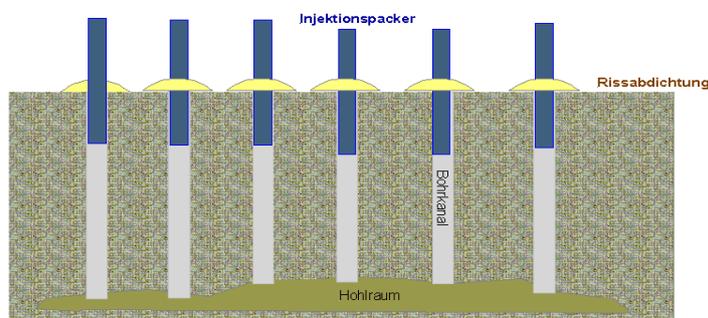


Abbildung 25: Anbohren und Verfüllen eines Hohlraums über eng gesetzte Bohrungen und Injektionspacker

3.4. Sonstige Verfahren

3.4.1. Fügen, Kitten, Kleben

Lose Gesteinsteile können wieder kraft-, form- und/oder stoffschlüssig miteinander verbunden werden: mechanisch durch Verklammerung, chemisch-physikalisch durch Klebstoffe und Klebemörtel. Beim Kleben werden zwei oder mehrere Teile durch einen Klebstoff an Kontaktflächen direkt miteinander verbunden. Die Klebstoffe können, wie bereits beschrieben, aus anorganischen oder organischen Bindemitteln bestehen:

- anorganisch: Kalk- oder Zementschlemmen; Dispersionen
- organisch: Polymerisationsklebstoffe gelöst oder ungelöst, spezielle siliziumorganische Verbindungen (Silikatkleber).

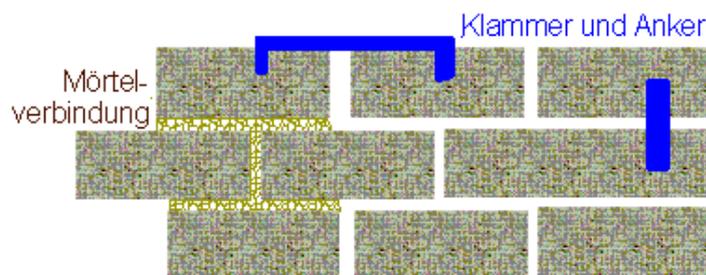


Abbildung 28: Schemazeichnung gängiger "trockener" und "naßer" Verbindungen

3.4.2. Mechanische Verbindungen

Zur Fixierung von Steinverbänden können auch Dübel und Klammern eingesetzt werden. Dübel und Klammer fixieren auf mechanischen Weg die Einzelteile und wirken Schub- und Zugkräften entgegen.

Während Dübel (Bolzen) senkrecht zur Schubrichtung in die Lagerfugen eingebracht werden, liegen Klammern parallel zur Schubrichtung, sind aber an ihren Enden gestaucht oder gebogen. In der Konsolidierung über Injektionen finden sie kaum Verwendung.

3.4.3. Kombinationstechniken

In der Praxis werden obige Techniken oft parallel oder kombiniert ausgeführt. Zur Verbindung von losen Schalen und Schichten im aufgehenden Mauerwerk ist von der schweizer ARGE für Restauratoren Ineichen und Knerr für die Kathedrale in Chur ein spezieller Injektionsdübel entwickelt worden⁴⁴. Dieser wird in ein Bohrloch eingeklebt und angrenzende Bereiche können dann verfüllt werden. Es ergeben sich damit Eigenschaften sowohl von Injektionsschläuchen (ein „sauberes“ Bohrloch), als auch von eingesetzten stabilisierenden Ankern. Über die Löcher im Injektionsanker kann das Material austreten und baumartig oder wurzelartig in die Hohlstellen kriechen.

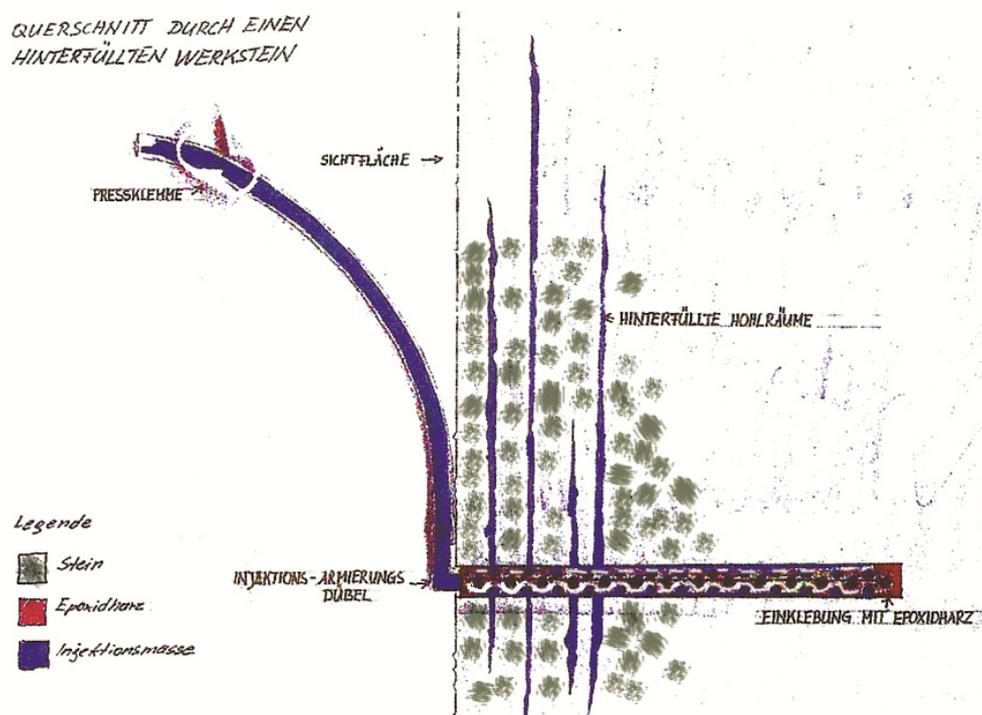


Abb. 29 Über einen Injektionsdübel wird Reaktionsharz in Hohlräume eingefüllt.⁴⁵

Dieser Injektionsdübel wurde vom Autor weiterentwickelt und kann als Injektionsanker („Roth-Injektionsanker“) zur horizontalen und vertikalen Verbindung ganzer Bauteile dienen. Der Injektionsanker wird durch die be-

⁴⁴ J. Ineichen und C. Knerr, Injektionsdübel, Tagungsbeitrag zur Fachtagung „Schalenbildung am Sandstein-Maßnahmen?“, Lenzburg (CH) 2005

⁴⁵ Ebd., Skizze aus dem Tagungsband, Abb.21

troffenen Bauteile ganz hindurchgeschoben und wirkt so über den gesamten Querschnitt, sowohl als stabilisierender, mechanischer Anker, als auch als Injektionshülse. Der Injektionsanker wird nur an der Ein- und Austrittsstelle durch eine Platte fixiert, die gleichzeitig zur Abdichtung des Bohrkanals dient. Über die Eintrittsöffnung und die Lochungen kann Injektionsmaterial in alle Bereiche der offenen und losen Schicht- und Rissysteme eindringen, diese verfüllen und wieder kraftschlüssig verbinden.

Dieses Verfahren dient als Standardtechnik für die folgenden Versuche zur Verfestigung und Verbindung von losen Schichten und Schalen der Molas-sesandsteine.

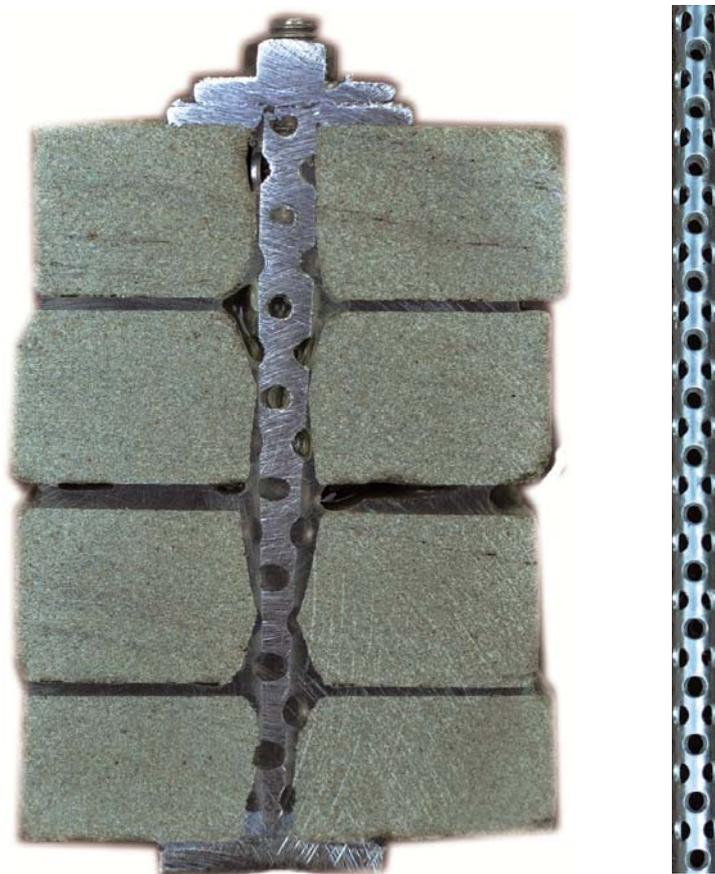


Abb.20: Schnitt durch einen "Roth-Injektionsanker": ein gelochter Edelstahlstab wird durch ein Bauteil geschoben, je nach Bedarf einseitig geschlossen (hier unten) und von der Gegenseite her verfüllt. Zusätzlich kann über einen eingeschobenen Gewindestab eine mechanische Bindung erzeugt werden.

3.5. Unterscheidung von drucklosen und druckintensiven Injektionstechniken

Injektionsmaterialien können wie oben bereits ausgeführt „selbständig“ oder unter Zwang in die Injektionskanäle eingebracht werden.

3.5.1. Injektion ohne künstlich ausgeübten Druck

Mit geeigneten Injektionstechniken, wie dem obigen „ROTH-Injektionsanker“, können niedrigviskose Injektionsstoffe über ein dichtes Raster so flächendeckend in Baustoffe eingebracht werden, dass sie selbstverlaufend nahezu alle zugänglichen Hohlstellen, Lager und Risse erreichen und verfüllen. Der Wirkmechanismus ist der von Kommunizierenden Röhren, in denen sich Flüssigkeiten allmählich auf ein gleiches Zustandsniveau einpegeln.

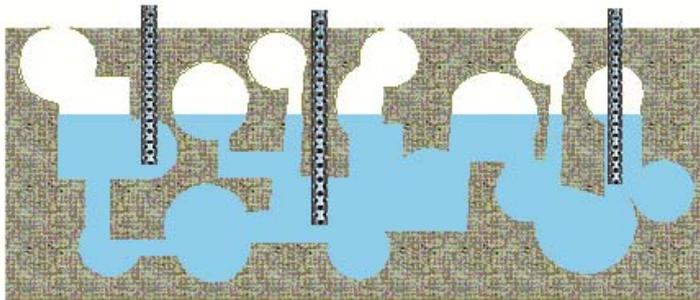


Abb. 31: Drucklose Injektion über kommunizierende Röhren. Das System kann sich selbst entlüften.

3.5.2. Niederdruck (bis ca. 10 bar)

Durch Erzeugung eines erhöhten Drucks über Spritzen und Pumpen wird versucht, tiefer und weiter in das Schadenssystem einzudringen. Große Probleme können aber entstehen, wenn die in den Poren- und Hohlräumen verbliebene Luft und Feuchtigkeit nicht entweichen kann. Es entstehen stabile Blasen, die dann nicht verfüllt werden können und somit neue Schwachstellen im System.



Abb. 32: Blasenbildung bei nicht entlüftender Druckinjektion

3.5.3. Hochdruck (bis ca. 250 bar)

Eine Ausweitung der obigen Technik kann durch Pumpen und Packertechniken erreicht werden, die den großen Drücken von bis zu 250 bar standhalten. Diese Techniken kommen ausschließlich im Ingenieurbau vor.



Abb. 33: Einsetzen von Injektionsankern zur drucklosen Injektion einer Balkonplatte, Augsburg

4. Versuche zur Verbindung und Stabilisierung loser Schichten

4.1. Vorüberlegungen zu Techniken und praxisgerechten Simulationen

Vereinfacht kann man sich Gesteine als Schwämme vorstellen, die auch in ihrer Tiefe Gase und Wasser mit darin enthaltenen Stoffen aufnehmen und wieder abgeben können. Dies geschieht über die Gesteinsporen. Einen Hinweis über den Zugang zum Gesteinsinneren gibt die Porosität des Steines, die einfach über Dichte und Wassersättigung festzustellen ist.

Der geschädigte Stein zeigt Veränderungen in seiner Struktur, in chemischen Bindekräften und damit einhergehend im Korngefüge. Dies führt zu den bereits dargestellten Schadensphänomenen wie Abschalen, Absanden, Rissbildung etc.

Die Konsolidierung über Imprägnierung oder Injektion soll die gestörten Kornkontakte wieder „heilen“ und somit die Gesteinsstruktur stabilisieren oder weitgehend wieder herstellen, sowie ein gleichmäßiges Festigungsbild vom kranken zum gesunden Steinbereichen ergeben.

- Dies erfordert in der Regel, dass immer noch eine gewisse Nähe der Gesteinskomponenten zu einander gegeben ist. Bei großen Kornabständen zwischen Rissen oder sich lösenden Schichten werden andere Anforderungen an Techniken und Konservierungsmittel gestellt:
- Im Verwitterungsprozess bereits erfolgte chemische Umwandlungsprozesse können durch Konsolidierungs- und Konservierungsstoffe nicht rückgängig gemacht werden.
- Probleme beim Applizieren oder Injizieren der Konsolidierungsstoffe ergeben sich immer wieder, wenn die effektive Porosität des Steins mangelhaft und aus unterschiedlichen Gründen eine gleichmäßige

Verfüllung der Poren möglichst tief ins Innere des Steines hinein nicht möglich ist.

- Bei der Auswahl der Stoffe, ihren technischen Eigenschaften und beim Aushärten kann es zu weiteren Problemen kommen.
- Falsche oder unzureichende Festigung kann zur Überfestigung und damit zu einer Krustenbildung mit der Gefahr des Abplatzens überfestigter von dahinterliegenden, weichen Steinbereichen führen. Durch ein ungeeignetes Festigungsmittel kann es ebenso zu inneren Scherspannungen mit Ablösungen kommen. Auch die Wasserdampfdiffusion kann erschwert oder sogar unterbunden werden.

Steine werden selten isoliert oder monolithisch verbaut, viel häufiger finden sie sich als Verband in einfachen Mauern oder komplexen Fassaden. Dort können sie ein einfaches Zierteil sein, ein Architekturteil oder ein gesamter Baukörper. Um solche Steinverbände zu erreichen, müssen in der Bauphase verschiedene Verbindungstechniken eingesetzt werden: Die Steine werden übereinander geschichtet und mechanisch über Klammern, Dübel etc. gesichert („trockenes“ Verfahren) oder physikalisch-chemisch mit Mörteln oder sonstigen reaktiven Stoffen („nass“). Häufigstes Verbindungsmittel sind die Mörtel, die in der Regel ähnlich den Werksteinen mineralisch aufgebaut sind, dabei aber verschiedenste Bindemittel und Zuschlagsstoffe aufweisen. Metalle wie Eisen und Blei, oder Naturprodukte wie Harze und Hölzer kommen ergänzend vor oder dienen speziellen Aufgaben. Dies führt verständlicherweise zu einem komplexen „Materialmix“, in dem es dann zu zahlreichen Störungen kommen kann.

Wenn solche Körper konsolidiert werden müssen, reichen applizierende Oberflächenverfahren nicht mehr aus und es müssen Techniken und Mittel angewendet werden, die sicher in die Tiefe solcher Strukturen hineingebracht werden können. Dabei ist größte Sorgfalt bei der Auswahl der Stoffe, ihren technischen Eigenschaften und ihren Reaktionsprodukten zu legen.

Für diese Diplomarbeit wurde als grundsätzliche Ausgangssituation die geschädigte, „nasse“ Natursteinverbindung gewählt, bei es im Werkstein selbst und in seinem typischem Verbindungsmittel dem Mörtel zu Störungen gekommen ist. Mögliche Schadensphänomene sind:

- der Naturstein ist allein geschädigt und der Mörtel intakt,
- der Naturstein ist intakt, der Mörtel geschädigt,
- beide sind geschädigt.

Dabei können intakte oder geschädigte Grenzflächen, Rissen, Hohl- und Fehlstellen vorliegen.

Die eingesetzten Injektionstechniken und Konsolidierungsmittel müssen in der Lage sein, sowohl den Naturstein selbst als auch die Mörtel zu konsolidieren und zu verbinden.

Erste Ansätze und Erfahrungen für Tiefeninjektionen finden sich in der Mauerwerkssanierung der Kathedrale in Chur⁴⁶, bei der Sanierung von Balkonplatten am Augsburger Schaezlerpalais⁴⁷, sowie dem Münster in Salem⁴⁸. Diese publizierten Erfahrungen wurden in hohem Maße für Vorüberlegungen und Vorauswahl der Konsolidierungstechniken herangezogen.

⁴⁶ J. Ineichen und C. Knerr, Injektionsdübel, Tagungsbeitrag zur Fachtagung „Schalenbildung am Sandstein-Maßnahmen?“, Lenzburg (CH) 2005

⁴⁷ G. Roth, Sanierung des Balkons des Schaezlerpalais, Dokumentation, Augsburg 2011

⁴⁸ Das Salemer Münster – Befunddokumentation und Bestandsicherung an Fassaden und Dachwerk, Stuttgart 2002

4.2. Anforderungen an Prüfkörper

Um aussagefähige Untersuchungsergebnisse bezüglich des Untersuchungsgegenstandes zu bekommen, werden Materialien für die Prüfkörper verwendet, die folgende Kriterien erfüllen:

- die Steine gehören zu den Molassesandsteinen
- das Material ist industriell verfügbar und wird in der Baupraxis eingesetzt
- es bietet die Möglichkeit, obige Schadensphänomene nachzustellen.
- Mittels der Prüfkörper müssen grundsätzliche Aussagen möglich sein.

Nach diesen grundsätzlichen Anforderungen werden fünf Typen von Prüfkörpern entwickelt, hergestellt und verwendet:

- „Gesunde“ Gesteinsprismen 50 x 50 x 330 mm, bzw. Würfel 50 x 50 x 50 mm. Sie dienen zur Überprüfung der publizierten steintechnischen Werte und geben eine Referenz für die Bewertung der Schadensszenarios. Kurzbezeichnung MS = Molassesandstein.
- Verbundprüfkörper aus Sandwichscheiben 50 x 50 x 20 mm, verbunden zu Würfeln mit 50 x 50 x 50 mm (Sandwichkörper). Mittig versehen mit einem Spalt von ca. 50 x 50 x 10 mm zur Simulation größerer Riss- oder Hohlstellen, deren verlorengangener Kontakt- und Grenzbereichen geschlossen werden soll. Kurzbezeichnung SW = Sandwich.
- Verbundprüfkörper als „Chaosverbindungen“ zusammengefügt zu Prismen von ca. 370 x 90 x 90 mm, die dann auf die Maße 50 x 50 x 330 mm gesägt werden (Verbundkörper). Sie bestehen aus zunächst lose zusammengefügt Gesteinsscheiben mit künstlich hergestellten Rissen, aus Scherben und aus Lockermaterial. Das Lockermaterial besteht aus einer Quarzsandmischung und soll lose Gesteinskörner und Mörtelreste simulieren. Über die bereits dargestellten gelochten Edelstahlrohre als Injektionskanäle wird versucht, sowohl die Gesteine als auch die „Mörtel“ zu konsolidieren und zu verbinden.

- Würfel im Format ca. 50 x 50 x 40 mm aus gegossenen reinen Bindemitteln zur Ermittlung grundsätzlicher technischer Werte.
- 50 x 50 x 40 mm - Würfel aus einem Bindemittel-Quarzsandmörtel zur Simulation von neu verbundenem Lockermaterial.

Alle Konsolidierungstests werden am Rorschacher Sandstein gemacht, da er in seinem Wasseraufnahmeverhalten im Mittelfeld der Molassesandsteine liegt. Einige typische Konsolidierungsmittel werden zum zusätzlichen Vergleich an allen Sandsteinvarietäten getestet.

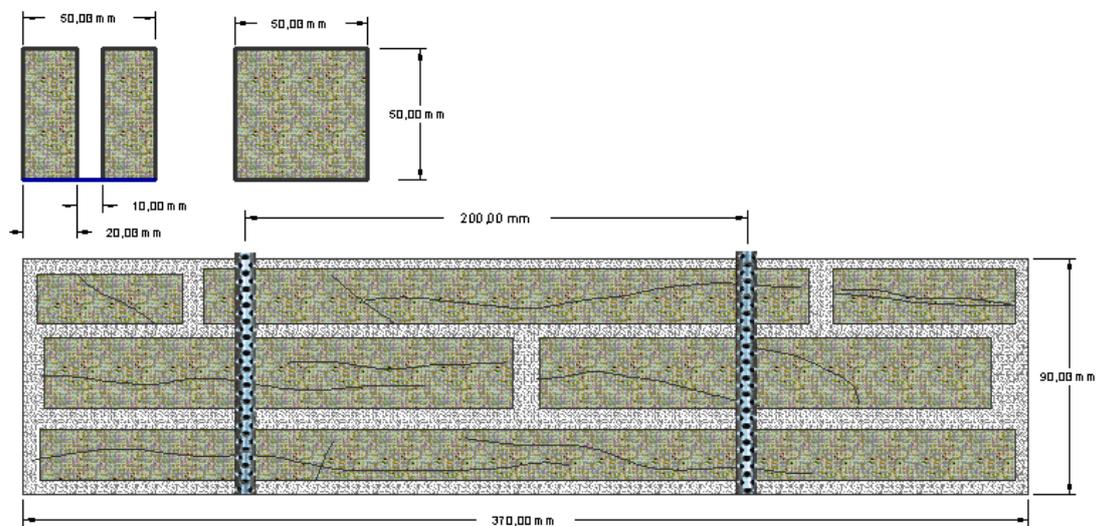


Abb. 34: Prüfkörper im Längsschnitt: oben Sandwich- und Massiv-Körper, unten "Chaosverbundkörper"

4.3. Herstellung der Prüfkörper

4.3.1. „Gesunde“ Gesteinsprismen

50 x 50 x 370 mm, bzw. Würfel 50 x 50 x 50 mm

Aus Steinplatten werden nass die Würfel und die Prismen herausgeschnitten, gesäubert, getrocknet und bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte gelagert. Als zusätzliches Vergleichsmaterial dient ein historischer Molassesandstein unbekannter Herkunft aus dem Bestand des Autors.



Abb. 35: Prüfwürfel der Molassesandsteine: Rorschacher, Guntliweider, Berner, Bollinger, historischer Molassesandstein

4.3.2. Verbundprüfkörper aus Sandwichscheiben

Wie bei den Würfeln werden kleinen Scheiben im Format ca. 50 x 50 x 20mm hergestellt. Nach Erreichen der Ausgleichsfeuchte werden diese in einem Abstand von ca. 10 mm (freies Volumen ca. 50 x 50 x 10 mm) über PE Blätter gestellt und mit einem EP-Band abdichtend verklebt. Zur zusätzlichen Bodenabdichtung lagern sie in Petrischalen und sind in Ton gebettet. Aus jedem Material werden mehrere Leersandwiches für alle möglichen Tests bereit gestellt (Verbundkörper SW). In den freien Raum wird dann das Konsolidierungsmaterial gefüllt, um einerseits die Situation größerer Hohlräume zu simulieren und andererseits ein direktes Verkleben von Sandsteinflächen ohne störendes Lockermaterial. Überstehendes Material wurde nach

dem Aushärten gegebenenfalls abgeschliffen, um einen gleichmäßigen Prüfkörper zu bekommen.



Abb. 36: Sandwich-Körper: links leer und rechts verfüllt und überschliffen

4.3.3. Verbundprüfkörper als „Chaosverbindungen“

Ungereinigte Gesteinsreste und Platten in verschiedenen Stärken werden zunächst auf ein einheitliches Breitenmaß von ca. 95 mm gesägt und getrocknet. Ebenso getrocknet werden der Quarzsand, alle Gesteinsscherben und Fragmente in kleineren Formaten. Sie sollen später zu Prismen von ca. 370 x 90 x 90 mm zusammengefügt werden, und später auf die Maße 50 x 50 x 350 mm verkürzt (Verbundkörper V).



Abb. 37: Gesteinsscherben im Trockenofen

Mit Plexiglasscheiben werden Kunststoffwannen im Format von ca. 400 x 300 mm in drei Fächer abgetrennt und abgedichtet. Sandsteinscheiben sind zur Risssimulation in Lagerrichtung angeschlagen, bzw. gespalten. Diese werden dann in die Fächer gelegt, um ein Grundformat von ca. 95 x 95 x 390 mm zu bekommen. Als Zwischen- und Randschicht dient Quarzsand in einer Sieblinie von 0,1 bis 2,5 mm. Er soll lose Gesteinssteile und zermürbtes Fugenmaterial simulieren.

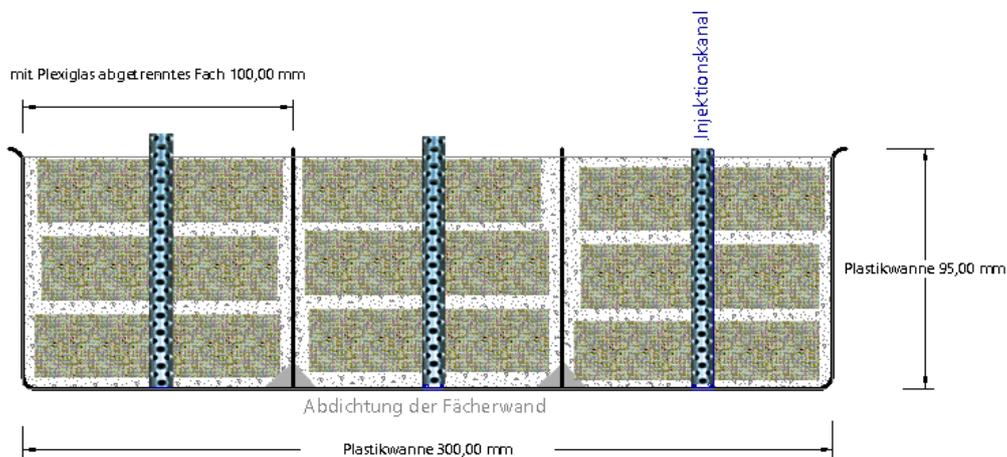


Abb. 38: Querschnitt durch den Versuchsaufbau mit Plastikwannen, die durch Plexiglasscheiben in jeweils drei Fächer geteilt werden.

So „entsteht“ ein kubischer Mauerverband aus losen Scherben und Lockermaterial, den es zu verfestigen und zu verbinden gilt. Als Injektionskanäle werden die bereits beschriebenen Edelstahlinjektionsankerhülsen in einem Abstand von ca. 20 cm eingebracht und am oberen Rand mit einer Beilagscheibe abgedichtet. Über diese Injektionskanäle soll versucht werden, sowohl die Gesteine als auch die „Mörtel“ zu konsolidieren und miteinander zu verbinden.



Abb. 39: Einschichten der Materialien für den "Chaosverbundkörper": zu sehen sind links: Scherben, mittig Quarzsand und rechts wieder Scherben. Deutlich erkennbar sind die Injektionshülsen. (Ansicht von oben)



Abb. 40: Verfüllen eines Faches mit mineralischen Injektionsmaterial. (Ansicht von oben)



Abb. 41: Querschnitt eines mit Reaktionsharz verfüllten "Chaoskörpers": das Harz hat die Quarzkörner zum Teil weggeschoben, die glasig verfüllten Bereiche erscheinen schwarz.

4.3.4. Würfel aus gegossenem, reinen Harz-Bindemittel

Zur Herstellung der Harze werden diese in ihren jeweiligen exakten Mischungsverhältnissen (Harz und Härter) in ein 280 ml-Gefäß geschüttet und aus dem erhärteten Harz ein Würfel von ca. 50 x 50 x 40 mm geschnitten.

Beim Aushärten entstehen zum Teil Reaktionstemperaturen über 100°C, die auch Aufnahmegefäße zum Schmelzen bringen.



Abb. 42: Schmelzen des Aufnahmegefäßes durch hohe Reaktionstemperaturen eines Harzes. Zwei reine Harz-Würfel (oben). Quarzsand-Harzwürfel (unten).



4.4. Durchführung der Simulationen

Zunächst werden grundsätzliche Versuche zum Erhalt der Referenzwerte für Festigkeiten, Feuchtetransport etc. mit geeigneten Prüfverfahren an den Mollassesandsteinprismen mit dem Querschnitt von ca. 50 x 50 x 50 mm, bzw. 50 x 50 x 330 mm durchgeführt.

Zur ersten Einschätzung der Viskosität der Konsolidierungsmittel erfolgen Ausbreitversuche von je 2 ml Bindemittel auf getrocknetem Sandstein, dann die Verfüllungen mit den reinen, nach Herstellerangaben gemischten Injektionsmaterialien zwischen die Sandsteinscheiben zu Sandwich-Verbundkörpern.

Abschließend werden die „Chaosverbundkörper“ hergestellt, die die in der Praxis vorgefundene Situation von heterogenen Verwitterungszuständen, Schichten und Verbindungen einzelner Gesteinskörper simulieren sollen.

4.4.1. Ausbreitversuche

Bei der Durchführung dient das Verhalten von Wasser als Referenzwert.

Es zeigt sich schnell ein großer Unterschied zwischen organischen und anorganischen Konsolidierungsmitteln⁴⁹:

Während die organischen Mittel im Schnitt ca. 64% der verglichenen Wasserfläche (Spitzenwert das EP-Harz Apogel-A mit 86,9%), füllen die anorganischen im Mittel nur die Fläche von ca. 35% des Wassers (Spitzenwert 64% Kiesol). Darüber hinaus kommt es bei letzteren zum schnellen Absau-



Abb. 43: Ausbreiten von jeweils 2 ml Injektionsmaterial auf Sandstein.

⁴⁹ Ergebnisse der Ausbreitversuche im Anhang

gen der wässrigen Bestandteile und damit zur Trennung von Feststoff und Flüssigkeit (Feuchtesaum)

4.4.2. Verfüllen der Sandwichkörper

Die vorbereiteten, leeren Prüfkörper werden von oben mittels Spritzen mit den Injektionsmaterialien verfüllt und mit der Lanzette etwas nachverdichtet bis ein leichter Überstand von ca. 1-2 mm erreicht ist. Die Verfüllmaterialien wurden exakt nach Herstellerangaben angemacht. Die Sandwiches werden bis zu 6 Wochen zur abschließenden Reaktion stehen gelassen.

Es folgen phänomenologische Beobachtungen während der Versuche. Auf eine genauere Betrachtung der physikalisch-chemischen Vorgänge wird verzichtet.

4.4.2.1. Beobachtungen an anorganischen Injektionsmitteln

○ Wasserglas (Remmers-Kiesol)

Das Wasserglas wird schnell in die engen Poren des Sandsteines gesaugt, was zu einem großen Absacken des Flüssigkeitsstandes führt. Die lange Reaktionszeit von mehreren Wochen verstärkt diesen Schwundeffekt, und es wird nur eine dünne Schicht Wasserglas am Grund ausgebildet. Die beiden Sandwichscheiben werden nicht miteinander verbunden.

○ KSE-Mörtel (Remmers-KSE-Modulsystem)

Der KSE-Mörtel lässt sich gut einfüllen. Ähnlich wie beim Wasserglas kommt es zu einem schnellen Absaugen des Kieselsäureesters und zur Ablagerung des Feststoffes am Grund. Die beiden Sandwichscheiben werden kaum miteinander verbunden und bereits die kleinste Erschütterung des Prüfkörpers nach 6 Wochen führt zum Auseinanderfallen der Bestandteile.



Abb. 44: Verfüllung eines Sandwich mit KSE-Mörtel: deutlich ist das Absaugen des KSE und das Absacken des Füllstoffes zu sehen.

- **CEM-Produkte(Remmers-Injektionsleim2K, PCI- Bohrlochsuspension, BL- und Rajasil- Injektionsmörtel)**

Die zementären Produkte werden mit einem Wasseranteil bis zu 50% angemacht und lassen sich leicht einbringen. Durch Saugen kommt es wie bei den Ausbreitversuchen bereits erkennbar zu leichten Trennungerscheinungen von Wasser und Feststoff und zu einem leichten Absacken des Injektionsmaterials. Die Sandwichscheiben werden aber miteinander verbunden.



Abb. 45: Verfüllung der Sandwiches mit zementären Produkten: zwei Injektionsmörtel sacken ab.

4.4.2.2. Beobachtungen an organischen Bindemitteln

Bedingt durch ihre geringe Viskosität lassen sich alle organische Injektionsmittel einfach und gut zwischen die Sandwichscheiben einbringen. Sie unterscheiden sich eigentlich nur durch ihren Reaktionsablauf und ihrer Aushärtung. Mit Ausnahme des PU-Harzes kommt es immer zum Saugen des Sandsteines und damit zur Ausbildung von kleinen Menisken.



Abb. 46: Injektionsharze. das PU-Harz quillt zwischen den Scheiben hervor. Bedingt durch kapillares Saugen bilden sich bei den anderen kleine Minisken.

○ PU-Harz (PCI-Apogel-E)

Das PU-Harz Apogel-E schäumt auf und tritt deutlich zwischen den Sandsteinscheiben hervor. Im ausgehärteten Zustand ist es so reversibel-elastisch, dass sich die Scheiben immer wieder zueinander drücken lassen; die Verbindung ist stabil.

Alle anderen Reaktionsharze bilden feste Sandwichkörper, die sich nicht mehr trennen lassen.

- **EP-Harze (PCI-Apogel-A, Rem-EP100)**
- **(P)MMA-Harze (PCI-Apogel-schnell, M-PMMA-Injektionsharz)**
- **EPS-Harz (A-Marmorkitt-wasserhell)**

4.4.3. Verfüllen der „Chaosverbundkörper“

Bereits beim Einbringen der Injektionsmittel stellen sich große Unterschiede zwischen den beiden Gruppen anorganischen und organischen Injektionsmaterialien heraus.

Die Beobachtungen, die bereits bei den Ausbreitversuchen und der Bildung der Sandwichkörper gemacht werden, bestätigen und verschärfen sich.

Kein zementäres System ist in der Lage, weit in die Schichten der Chaoskörper hineinzugelangen. Ihre Topfzeit ist zu in der Regel zu gering und es reichen bereits das Saugen der Sandsteine und das Auftreten von Lockermaterialien, damit es zu Filtererscheinungen und zum Abbruch der Ausbreitung kommt. Auf ein Vornässen, das diese Einschränkungen möglicherweise eingrenzen könnte, wird hier bewusst verzichtet, da es in der Praxis nicht vorstellbar ist, ein Bauteil komplett zu durchnässen.

Auch bei den organischen Injektionsmitteln zeigen sich jetzt deutlich Unterschiede in der Ausbreitung der Harze im „Chaoskörper“ abhängig von ihrer Viskosität und ihrer Reaktionszeit: während EP-Harze durch ihre lange Topfzeit in kleinste Winkel kriechen, reicht z.B. dem PMMA-Harz die zur Verfügung stehende Zeit nicht, um dies so zu erreichen.

Die drucklose Injektion ist vorzuziehen, da selbst bei den minimalen Drücken der Spritze Lockermaterialien zusammengesoben und verfrachtet werden., wodurch sich barrikaden bilden. Die langsamen, drucklosen Injektionen entlüften weitgehend selbständig und nach der ersten Ausreaktionszeit ist bei zwei Epoxidharzen sogar ein zweiter Injektionszyklus möglich.

4.4.3.1. Beobachtungen an anorganischen Injektionsmitteln

Alle Injektionsmittel werden nach Herstellerangaben angemacht und ausreichend lange mit einem Quirl gemischt. Das Injektionsmaterial wird anschließend in 20-ml Spritzen aufgezogen und langsam in die Injektionskanäle eingespritzt. Mit Ausnahme des Wasserglases können nicht mehr als ca. 400 ml Injektionsmaterial eingebracht werden bis es zum Stocken und schließlich zum Abbruch der Aktion kommt. Die Filter- und Barrikadenwirkung der Lockermaterialien kann sehr gut am oben aufliegenden Quarzsand studiert werden, der die Flüssigkeit sofort wegsaugt. Es entstehen kleine Materialhügel und im Sandstein zeigt sich ein Feuchtesaum. Die Injektionsmittel haben eine hohe Viskosität..



Abb. 47: Verfüllung mit den anorganischen Mitteln BL-Injektionsmörtel, Remmers-Kiesel und PCI-Bohrloch suspension (von rechts).



Abb. 48: Nur beim Kiesol-Injektionsmittel ist eine Durchfeuchtung des Faches festzustellen.

- **Kiesol-Wasserglas**

Wasserglas lässt sich – wie sein Name schon sagt – wie Wasser einbringen und führt zur totalen Durchdringung der Lockermaterialien und weitgehend der Sandsteine. Jedoch sind die Bindewirkung und die Reaktionszeit so langsam, dass selbst nach 6 Wochen noch kein stabiler Verbundkörper ausgebildet werden kann.

- **KSE und CEM-Produkte**

Wie bereits einleitend beschrieben, schaffen es diese Produkte nicht, sich weit in den Schichtsysteme der „Chaosversuchskörper“ hinein aus zu breiten. Bevor die Injektionskanäle verstopfen kommt es unmittelbar an den Injektionskanälen zur Ausbildung von Injektionsbäumen. Diese reichen aber nicht aus, einen einheitlichen Verbundkörper aus zu bilden.



Abb. 49: Nach dem Öffnen der Fächer mit anorganisch verfüllten Injektionsmittel fallen die Materialien auseinander.

4.4.3.2. Beobachtungen an organischen Bindemitteln

Die organischen Injektionsmittel werden wie die mineralischen nach Herstellerangaben angemischt und eingebracht. Es werden Mengen bis ca. 1200 ml erreicht. Dies ist abhängig von ihrer Reaktionszeit und ihrer Aushärtung. Harze mit niedriger Viskosität und langer Topfzeit nivellieren sich im System kommunizierender Röhren, wodurch bei ihnen versucht wird, in einem zweiten Zyklus Harz einzubringen. Dies gelingt bei den niedrigviskosen Epoxidharzen.

- **PU-Harz PCI-Apogel-E**

Bedingt durch die relativ hohe Viskosität kommt es rasch zum Stocken der Ausbreitung. Es treten die gleichen Phänomene wie bei den mineralischen Systemen auf und es ist nicht möglich, einen einheitlichen Verbundkörper zu bilden.

- **EP-Harze PCI-Apogel-AS, Remmers-EP100 und Motema-EP-Injektionsharz-langsam**

EP-Harze unterscheiden sich wesentlich in ihrer Topfzeit und ihrer Viskosität. Die niedrige Viskosität ist das entscheidende Kriterium, das es einem Harz ermöglicht, sich vollständig auszubreiten und einen einheitlichen Verbundkörper auszubilden. Bei den niedrigviskosen Harzen entsteht ein kommunizierendes System, das sich immer auf ein einheitliches, horizontales Niveau einregelt. Damit ist es sogar möglich, nach An- oder Aushärten des Harzes einen neuen Injektionszyklus zu beginnen, bis das Schichtsystem weitestgehend gefüllt ist. Dem Harz mit der längsten Topfzeit gelingt dies erwartungsgemäß nicht, da es zu viskos ist.



Abbildung 50: Beim Injizieren breitet sich das Harz von den Injektionshülsen aus (dunkle Flecken).

- **(P)MMA-Harz Motema-PMMA**

Aufgrund seiner niedrigen Viskosität gelingt es dem PMMA-Harz gut, einen Verbundkörper auszubilden. Die kurze Topfzeit verhindert aber, dass es bis in alle Rissysteme zu gelangt.

○ **EPS-Harz : AKEMI-Marmorkitt-1000-wasserhell**

Überraschen gut ist es dem relativ schnell reagierendem EPS-Harz gelungen, die Schichten miteinander zu verbinden und einen weitgehend einheitlichen Körper auszubilden. Ähnlich den (P)MMA-Harzen kann es sich nicht vollständig ausbreiten.



Abbildung 51: Nahezu voll ständig verfülltes Fach mit einem "Glaskörper" aus Harz und Stein und Quarzsand

Mit der praxisnahen Simulation von Injektionen in Schichtsystemen in fiktiven Baukörpern als „Chaosverbundsysteme“ zeigt es sich, dass organisch aufgebaute Injektionssysteme eine gute Chance haben, einen einheitlichen Verbundkörper auszubilden und geschädigte Stein- und Schichtsysteme weitestgehend zu konsolidieren. Dabei müssen die niedrigviskosen Epoxidharze eindeutig als Favoriten angesehen werden.

Die Untersuchungen zu den technischen Eigenschaften der erstellten Prüfkörper müssen zeigen, ob die Favorisierung der Reaktionsharzsysteme, wie sie sich aus der praktischen Anwendung ergibt, gerechtfertigt ist und eine physikalisch befriedigende Verfestigung und Verbindung von losen Schichten und Schalen in Molassesandsteinen möglich ist.

Dazu werden nach der abgeschlossenen Reaktion der zugeführten Konsolidierungsmittel für die folgenden Versuchsanordnungen Prüfkörper aus den

Verbänden geschnitten, bzw. geschliffen. Es entstehen Gesteinsprismen mit dem Querschnitt von ca. 50 x 50 x 50 mm, bzw. 50 x 50 x 330 mm. An diesen werden dann die materialtechnischen Untersuchungen für Festigkeiten, Feuchtetransport etc. vorgenommen und mit den Referenzkörpern die Molassesandsteine verglichen.



Abbildung 52: Umgestülpte, geleerte Plastikwanne mit verfüllten Fächern von Reaktionsharzen: Die beiden hinteren bilden ganze Körper aus. Dem PU-Harz im Vordergrund gelingt dies nicht: (Ansicht von unten).

5. Vorstellung der Prüfverfahren zur Untersuchung der Molassesandsteine und der Prüfkörper

5.1. Vorbemerkung

Es werden umfangreiche Tests an Molasselsandsteinen (kurz MS), sowie künstlichen Steinen, also modifizierten Verbund –und Harzprüfkörpern (kurz SW für Sandwich-Körper und V für „Chaosverbundkörper“) vorgenommen. Diese Tests dienen dazu:

- die technischen Eigenschaften zu ermitteln, sowie mögliche Verwitterungsmechanismen am und im Stein zu erkennen und zu interpretieren,
- Referenz- und Vergleichswerte für die darauf folgenden Tests mit den verschiedenen Prüfkörpern und der Überprüfung der Wirkmechanismen der Konsolidierungen zu bekommen.

Wie bereits dargestellt tragen im Wesentlichen folgende Faktoren zur Verwitterung bei:

- Die Auswirkungen von Wasser und durch Wasser eingetragene Schadstoffe
- Atmosphärische Einflüsse und Luftschadstoffe
- Klimatische Einflüsse wie etwa der Temperatur
- Biogene Einflüsse
- Ungünstige, gesteinsimmanente Einflüsse (Gesteinszusammensetzung)

Die Untersuchung konzentriert sich auf Verwitterungsmechanismen in tiefen Lagen der Natursteine und verzichtet auf die Überprüfung oberflächlicher Phänomene, wie biogene oder atmosphärische Angriffe.

Da Feuchtigkeit in jeglicher Form den größten Faktor bei der Veränderung von Natursteinen hat, wird das größte Augenmerk auf diesen Umstand gelegt und Feuchtesituationen vom spontanen Feuchteangriff durch z.B. Regen bis hin zur Durchfeuchtung und der Abgabe von Feuchte während des Trocknungsprozesses simuliert und aufgezeichnet.

Auf Frost-Tauwechselversuche wird verzichtet, da von der jeweiligen Materialdichte und der Wasseraufnahme Annahmen dazu abgeleitet werden können. Der Frostdruck, dem die Steine standhalten müssen beträgt ca. 13 N/mm².

Wesentlicher erscheinen Untersuchungen zu Dehnungen, da diese –ähnlich dem Frost- zu starken inneren Scherspannungen führen können und einzeln ermittelt werden müssen.

Festigkeitstests dienen zur Untersuchung und Darstellung der verschiedenen Molassesandsteine als aktuelle Bausteine der Praxis.

Um eine hohe Vergleichbarkeit von Sandsteinen und erstellten Prüfkörpern zu erreichen, werden alle Untersuchungen an den Natursteinen und den künstlichen Steinen vorgenommen und sowohl einzeln als auch vergleichend bewertet.

Prüfverfahren aus Normen und normativen Texten werden als Grundlage herangezogen, jedoch im Hinblick auf den Untersuchungsgegenstand modifiziert. Großer Wert wird auf die praktische Nachvollziehbarkeit durch den Restaurator gelegt.

5.2. Überblick über genormte bzw. normative Prüfungsthemen und Prüf-verfahren

5.2.1. DIN 52100 und DIN 52008 - Gesteinsuntersuchungen im Labor⁵⁰

- Gesteinskundliche Untersuchungen
- Wasseraufnahme
- Sättigungswert
- Porosität
- Frost-Tau-Wechsel
- Frost-Tausalz
- Korrosionsprüfung in SO₂-Atmosphäre
- Prüfung auf Raumbeständigkeit (Sonnenbrand, Eisen, schwefelige Säure)
- Festigkeitsverluste (Druckversuch, Biegeversuch, Ausbruchslast, dynamischer E-Modul)

5.2.2. WTA-Merkblatt Kenndatenermittlung und Qualitätssicherung bei der Restaurierung von Natursteinbauwerken⁵¹

- Festigkeitswerte (Druck-, Biegezug- und Haftzugfestigkeit)
- Feuchtebestimmungen (Baustoff-, Sättigungsfeuchte, Porosität, S-Wert, kapillare Wasseraufnahmen, Ausgleichsfeuchte)
- Wasserdampfdiffusion
- Thermische und hygrische Dehnung

⁵⁰ • DIN 52008, Prüfverfahren für Naturstein - Beurteilung der Verwitterungsbeständigkeit, 2006-03

⁵¹ WTA Merkblatt 3-4-90/D, Kenndatenermittlung und Qualitätssicherung bei der Restaurierung von Natursteinbauwerken, 1990

5.2.3. Denkmalpflegerische Untersuchungen gemäß Snethlage/Wendler^{52,53}

- Wasseraufnahme und –Abgabe (Feuchtedurchgang) / Wasserdampfdiffusion
- Wassereindringtiefe / Sättigung
- Hygrische Feuchte / Längendehnung
- Bohrwiderstand (Messungen)
- Biegezugfestigkeit
- Haftzugfestigkeit
- Frost-Tauwechsel
- E-Module (dynamisch und statisch)

5.3. Verwendete Untersuchungstechniken / durchgeführte Prüfungen

- Rohdichte (Volumen/Masse [g/cm³])
- Hygrische Feuchte / Längendehnung / Dilatation am Originalstein und am Verbundkörper
- Wasseraufnahme und –Abgabe (Feuchtedurchgang) / Wasserdampfdiffusion (μ - Wert) am beschichteten und unbeschichteten Originalstein, Harz- und Verbundkörper
- Wasseraufnahme infolge Kapillarwirkung / Wasseraufnahmekoeffizient (w -Wert) und Steigungswert (B -Wert) am Originalstein und Verbundkörper
- Wasseraufnahme unter atmosphärischem Druck (Sättigung/Feuchtedehnung) am Originalstein und am Verbundkörper
- Biegezug- und Druckfestigkeiten auf Mittellast am Originalstein und Verbundkörper

⁵² R. Snethlage / E. Wendler, Methoden der Steinkonservierung – Anforderungen und Bewertungskriterien, in Denkmalpflege und Naturwissenschaften – Natursteinkonservierung I, 1995

⁵³ R. Snethlage, Leitfaden Natursteinkonservierung, 2008

- Dynamischer E-Modul durch Ultraschall am Originalstein, Verbund- und Harzkörpern
- Thermische Dehnung (umgekehrt von DIN 52100) am Originalstein und Verbundkörper
- Harzaufnahme infolge Kapillarwirkung am Originalstein
- Praktische Injektionstests am geschichteten Originalstein („Chaosverbundkörper“)
- Ausbreitversuche (Viskosität) am Originalstein
- Praktische Verfülltests zwischen Originalsteinscheiben („Sandwichkörper“)



Abb. 53: Prüfkörper in der Werkstatt Roth

6. Prüfungen an ausgewählten Steinen, den eingesetzten Konsolidierungsmitteln und Prüfkörpern

6.1. Beschreibung der eingesetzten Prüfverfahren

6.1.1. Rohdichte (Porosität)

Die Rohdichte ist u. a. ein Hinweis auf die Porosität der Steine und Prüfkörper. Sie ergibt sich als Quotient aus der trockenen Masse [g] und dem Rohvolumen [cm]⁵⁴.

Dieser wird ermittelt durch Wiegen bei vorhandener Ausgleichsfeuchte und durch Messen mittels Schublehre oder Mikrometerschraube (jeweils auf zwei Kommastellen genau).

Da dichte Steine einen hohen Porendruck erwarten lassen, kann von der Rohdichte auf das Frostverhalten geschlossen werden, auch bildet sie einen Grundwert zur Feststellung des dynamischen E-Moduls.



Abb. 54: Messaufbau zur Bestimmung der Rohdichte: Waage und Schublehre

⁵⁴ Rohdichte $\rho = m_{tr}/V_R$

6.1.2. Festigkeiten

Das Einwirken von mechanischen Kräften erzeugt Spannung, auf die das Material mit Verformung (Dehnung, Stauchung, Biegung) oder Bruch reagiert. Elastische Verformungen sind reversibel (zähe Materialien wie Metall, Thermoplaste). Plastische Verformungen sind irreversibel und können bei spröden Materialien wie Keramik und Stein bis zum Bruch führen.

Die Wirkung der Kräfte kann dynamisch (mit veränderlich wirkenden Kräften) oder statisch, bei definierter, kontinuierlicher Beanspruchung, gemessen werden.

Alle Messungen erfolgen am trockenen Körper, der seine Ausgleichsfeuchte erreicht hat. Bei kristallinen Materialien wie Stein ist die Festigkeit je nach Schichtung verschieden, also grundsätzlich richtungs- und schichtungsabhängig (anisotrop).

Festigkeiten sind unerlässlich zur statischen Beurteilung der Steine als Baumaterial.

6.1.2.1. Dynamischer E-Modul

Der E-Modul ist der Widerstand, den das Material bei gegebener Belastung seiner Deformation entgegensetzt und entspricht einem linearen Verhältnis von Spannung [Pa, N/mm²] (y-Achse) zu Verformung [m/m] (x-Achse). Je niedriger der E-Modul, desto geringer ist der Widerstand und desto elastischer ist der Werkstoff. Der dynamische E-Modul entspricht in seiner Dimension derjenigen einer Festigkeit.

Bei der Ermittlung des dynamischen E-Moduls erfolgt die Messung eines Prüfkörpers in der Regel durch Ultraschallimpulse. Die Laufzeit der Ultraschallwelle vom Schallgeber durch den Prüfkörper hindurch wird vom Empfänger gemessen und über die Materialdicke und die Geschwindigkeit er-

rechnet. Das Quadrat der Geschwindigkeit wird mit der Rohdichte multipliziert und ergibt den Wert des dynamischen E-Moduls⁵⁵.

Da der E-Modul die Verformungsbereitschaft eines Körpers angibt, ist es wichtig, bei Kompositkörpern, wie Vermauerungen, Verklebungen oder Verfüllungen, Materialien und Stoffe einzusetzen, die möglichst ähnliche E-Module aufweisen (80-100%).



Abb. 55: Messung des dyn. E-Moduls am Sandsteinprisma über Schallgeer und -Empfänger

6.1.2.2. Druckfestigkeit (einachsig)

Der maximale Widerstand, den ein Material der Einwirkung einer Druckkraft entgegenbringt, wird als Druckfestigkeit bezeichnet. Ist die aufgebrachte Druckspannung größer als die Druckfestigkeit eines Körpers, so wird er zerstört.

Der Wert [MPa] für die Druckfestigkeit kann nur im Prüfstand im Labor festgestellt werden, indem ein Materialwürfel durch einen Stempel zum Bruch gebracht wird. Die Druckfestigkeit ergibt sich aus dem Quotienten der Höchstkraft [N] durch den Materialquerschnitt [mm²]⁵⁶. Bei DIN-Prüfungen werden immer Sicherheitsfaktoren hinzugegeben. Die Druckfes-

⁵⁵ Dynamischer E-Modul $E_{\text{dyn}} = (l/t)^2 \cdot \rho$

⁵⁶ Druckfestigkeit $\beta_D = F/A$ [N/mm², MPa]

tigkeit von Steinen variiert je nach Gesteinsschichtung und dem Feuchtezustand.

Verbundkörper sollten idealerweise die gleiche Druckfestigkeit aufweisen wie der Originalstein (60-80%).

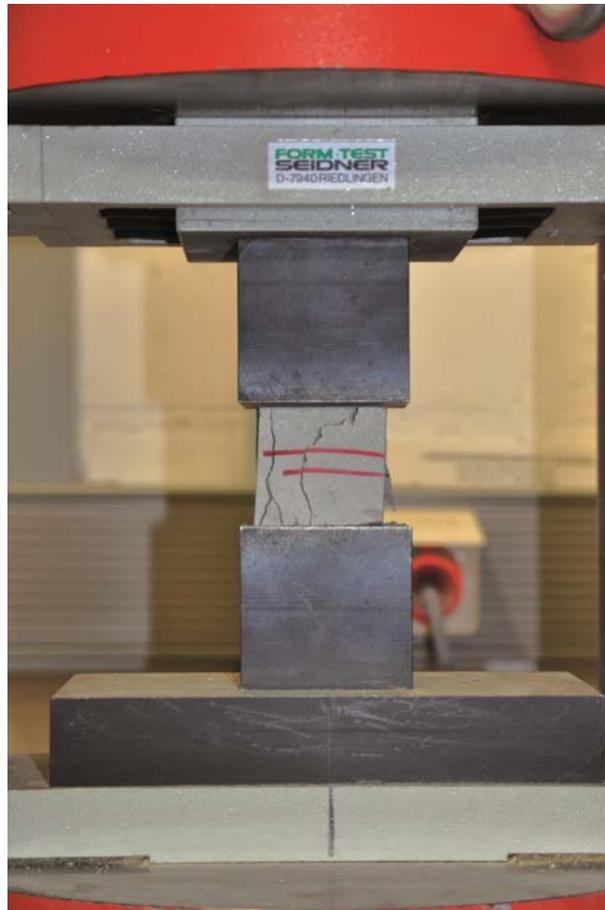


Abb. 56: Maschinelle Druckfestigkeitsprüfung im Labor.

6.1.2.3. Biegezugfestigkeit (unter Mittellast)

Der maximale Widerstand, den ein Material der Einwirkung von kombinierten Druck- und Zugkräften entgegenbringt, wird als Biegezugfestigkeit bezeichnet. Die aufgebrachte Kraft erzeugt auf der Oberfläche eine Druck- und auf der Unterfläche des Prüfkörpers eine Biege- oder Zugspannung. Ist die Biegung größer als die Biegezugfestigkeit eines Körpers, so wird er zerstört.

Der Wert [MPa] für die Biegefestigkeit kann nur im Prüfstand im Labor festgestellt werden, indem ein Materialprisma auf zwei Stützrollen gelagert

wird und durch einen Schneidestempel mittig zum Bruch gebracht wird. Die Biegezugfestigkeit ist der Quotient aus Bruchlast mal Stützweite mal dem Faktor 1,5 und Breite mal Höhe im Quadrat eines Probekörpers⁵⁷. Bei DIN-Prüfungen werden immer Sicherheits- und Streufaktoren hinzugegeben.

Auch die Biegezugfestigkeit ist abhängig vom Feuchtegehalt und der Gesteinsschichtung und immer geringer als die Druckfestigkeit. Werksteine werden deshalb immer senkrecht zu ihrer Schichtung verbaut. Der Mittelwert von Druck- und Biegezugfestigkeit ergibt nach Mirwald⁵⁸ den Richtwert für die Scherfestigkeit von Natursteinen.

Verbundkörper sollten eine ähnliche Biegefestigkeit aufweisen wie der Originalstein (60-100%)



Abb. 57: Biegezugtest durch mittige Auflast eines Schneidestempels über zwei Rundauflager

6.1.3. Wasseraufnahme und –Abgabe (Feuchtedurchgang)

Als kleines Molekül kann Wasser leicht in Baustoffe eindringen und dort zu Löse- oder Quellprozessen führen. Außerdem dient es als Transportmittel für gelöste Schadstoffe. Der Feuchtetransport kann langsam hygroskopisch, kapillar oder durch Sickerströmung erfolgen. In großen Porenräumen kann

⁵⁷ Biegezugfestigkeit $\beta_B = 3 \cdot F \cdot l / 2 \cdot b \cdot h^2$ [Mpa]

⁵⁸ P. M. Mirwald, Physikalische Eigenschaften von Gesteinen, in Naturwerkstein und Umweltschutz in der Denkmalpflege, Ulm 1997

dies sehr rasch geschehen, in komplexen Verbundkörpern kommt es manchmal zu verzögerten linearen Steighöhen.

Alle Messungen beginnen mit trockenen Körpern, die ihre Ausgleichsfeuchte erreicht haben.

6.1.3.1. Wasseraufnahme (pro Zeiteinheit)

Zur Feststellung der kapillaren Wasseraufnahme wird unter atmosphärischem Normaldruck gemessen, welche Menge an Wasser [g] vom Baustoff pro Zeiteinheit kapillar aufgenommen werden kann. Dazu wird der Prüfkörper auf einen sattfeuchten Schwamm gestellt und in definierten Zeitabständen gemessen, welche Menge an Wasser über die Grundfläche eines Prismas durch Saugen aufgenommen werden kann⁵⁹. Gleichzeitig wird optisch der Feuchtehorizont gemessen und so die Steighöhe (B-Wert [$\text{cmh}^{0,5}$]) aufgezeichnet.

Das Saugen und Steigen erfolgt in der Regel proportional zur Quadratwurzel aus der Zeit. Bei Abweichungen kann von Störungen im Gefüge ausgegangen werden.

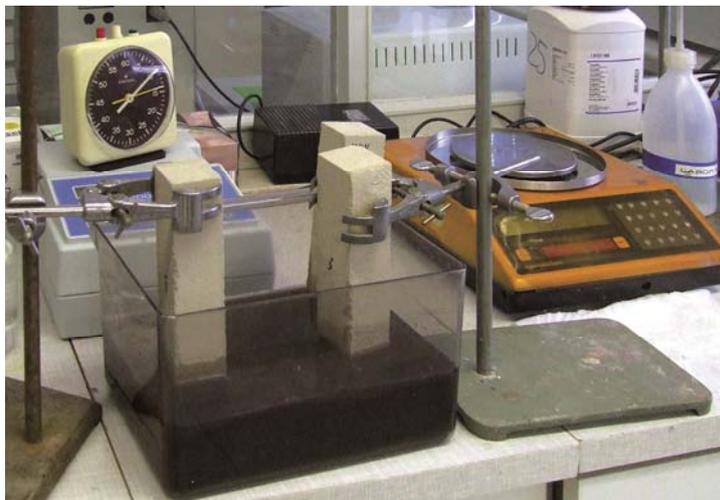


Abb. 58: Messung der kapillaren Wasseraufnahme über Schwamm, Waage und Uhr.

⁵⁹ Wasseraufnahme w-Wert = $m/(A\sqrt{t})$ [$\text{kg}/\text{m}^2\text{h}^{0,5}$]

6.1.3.2. Masse der Wassersättigung unter Atmosphärendruck (fluten)

Ein Probekörper wird so in ein Wasserbecken gestellt, dass er langsam Wasser aufnehmen und gleichzeitig die in den Poren eingeschlossene Luft entweichen kann. Dazu wird das Becken zunächst bis ca. der Viertelhöhe des Prüfkörpers eingebracht und der Wasserstand über 5 Tage/120 h hinweg langsam bis zur Überdeckung erhöht. So kann bei ca. 20°C gemessen werden, wie viel Wasser (absolut und in Masse-%) vom Material innerhalb dieser Zeit aufgenommen wird (Wassermasse-Trockenmasse)⁶⁰. Die Werte dienen zur Beurteilung des Gefährdungspotentials durch Frost und Schadstoffe (Salze).



Abb. 59: Messung der Wassersättigung durch Fluten und Dilatation durch konstante Messung.

6.1.3.3. Hygrische Längendehnung (Dilatation)

Wie bei der Sättigung mit Wasser werden die Materialproben definierter Länge langsam in einem Becken mit destilliertem Wasser geflutet, damit sie entlüften und der Porenraum vollständig gefüllt werden kann. Über 5 Tage

⁶⁰ Wassergehalt $w = m_w - m_d$ [g] Wassersättigung $m\% = w / m_d \cdot 100$ [%]

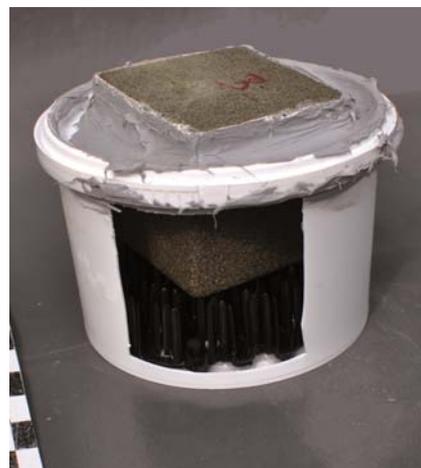
hinweg wird die Längendehnung mit Messstempeln auf vier Komma Stellen genau gemessen und die Volumenveränderung protokolliert.

Aus der Längenänderung vom trockenen zum nassen Körper wird in Kenntnis des dynamischen E-Moduls die maximal mögliche Scherspannung⁶¹ am Übergang vom trockenem zum feuchtegesättigtem Bereich im Baustoffe berechnet.

6.1.3.4. Feuchtedurchgang

Die Feuchtedurchgangsprüfung leitet sich von der Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit oder Wasserdampfdiffusionsfähigkeit ab und simuliert eine rückseitige Durchfeuchtung eines Baustoffes, wobei das Wasser sowohl als Dampf als auch als adsorbierte Feuchte an den Porenwänden durch den Körper transportiert wird. Die Prüfkörper werden so abgedichtet in ein Wassergefäß gesetzt, dass nur über eine definierte Fläche das Wasser hindurchdiffundieren kann. Die Messung erfolgt in einem passiven Zustand des Prüfkörpers bei einer möglichst konstanten Temperatur ohne weitere Energiezufuhr und darf deshalb auch nicht durch Heizung oder Sonneneinstrahlung beeinflusst werden. Durch regelmäßiges Wiegen wird die Menge an Wasserdampf [g] gemessen, die durch diese Fläche in die Atmosphäre entweicht und der Wasserdurchgang in Liter pro Quadratmeter und Stunde [l/m²h] umgerechnet. Der Verlauf sollte gesetzmäßig-linear erfolgen und zeigt die Fähigkeit des Stoffes zum bauphysikalisch wichtigen Feuchteaus-tausch.

Abb. 60: Schnitt durch einen Gefäß zur Feuchtedurchgangsmessung: das Wasser im Becken muss durch den Prüfkörper hindurch und kann nur an der obigen, definierten Fläche austreten.



⁶¹ $\sigma_{\max} = E_{\text{dyn}} \cdot \Delta \epsilon$

6.1.3.5. Thermische Dehnung

Ähnlich der Feuchtedehnung kann auch die thermische Dehnung innerhalb des Steines zu großen Scherspannungen führen. Die thermische Dehnung wurde umgekehrt wie DIN EN 14581 verlangt während der Abkühlung gemessen. Die Probekörper bekannter Länge werden auf ca. 70°C erhitzt und ca. 2 Std. bei dieser Temperatur gehalten und dann ihre Längendehnung und deren Veränderung in konstanten Zeitintervallen bis hin zum Erreichen der Raumtemperatur mit einer Mikrometerschraube gemessen und im Verhältnis zu einem Meter ungerechnet [$\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$].

Die Scherspannung errechnet sich aus der Dehnung durch die Multiplikation der Dehnzahl mit dem E-Modul, wobei sich die Dehnzahl aus der Multiplikation der Dehnung mit dem Temperaturunterschied ergibt⁶².

6.2. Testergebnisse

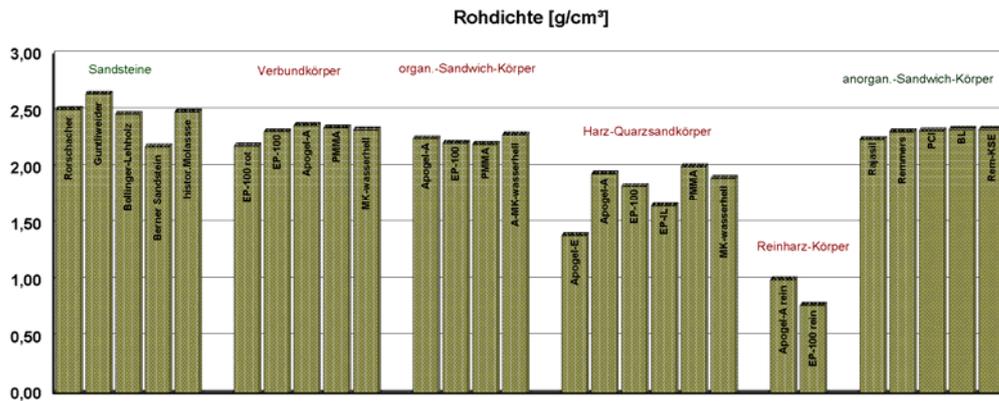
6.2.1. Rohdichte

Die Rohdichten von Sandsteinen liegen zwischen 1,9 und 2,65 kg/dm³. Mit einer Rohdichte von 2,64 g/cm³, liegt der Guntliweider Sandstein an der oberen Grenze, der Berner Sandstein mit 2,18 g/cm³ im unteren Bereich. Nahezu gleich sind der Rorschacher (2,51 g/cm³) und der Sandstein Bollinger-Lehholz (2,47 g/cm³).

Harz-Quarzsandkörper liegen mit Werten von 1,4 g/cm³ bis 2,01 g/cm³ deutlich im unteren Bereich. Reine Harzkörper erreichen gerade die Hälfte dieser Dichte.

Die Verbundkörper mit Reaktionsharz sind also weniger dicht als die Sandsteine, was aber nicht zwangsläufig eine Verminderung der Festigkeit (gemessen am E-Modul) bewirkt.

⁶² Thermische Dehnung = Dehnzahl · E_{dyn} [$\mu\text{m}/\text{m}$], Dehnzahl = Δl [mm]/ Δt [°C]·l₀



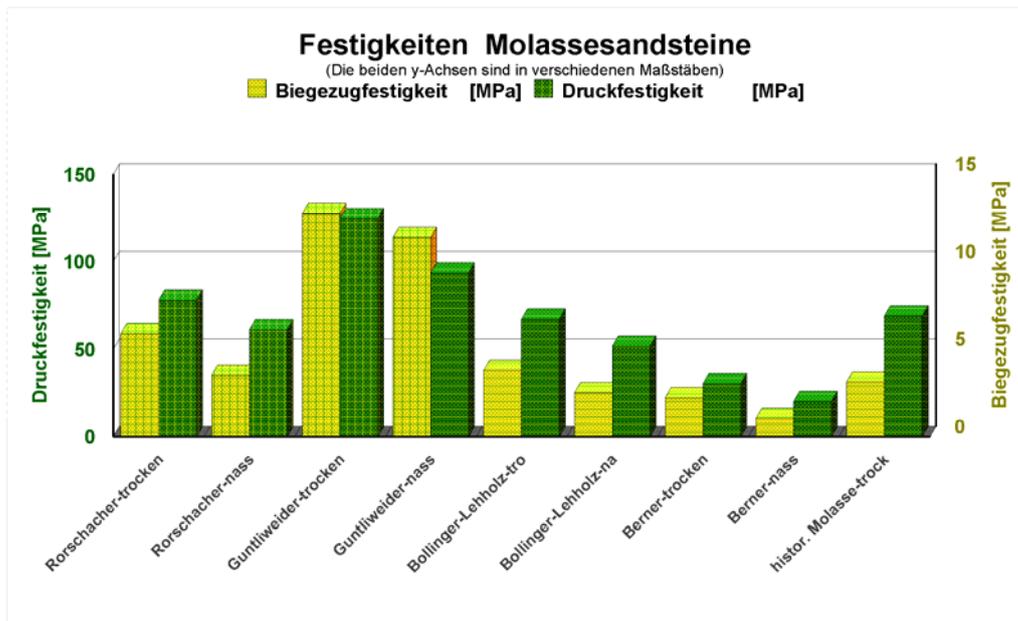
Diag. 1: Rohdichten im Vergleich: Die reinen Harze haben eine wesentlich geringere Dichte als die Sandsteine, gleichen sich aber in Verbindung mit Sandstein-komponenten diesen an. Deutlich erkennbar ist es bei den beiden Verbundkörpern mit dem EP100-Harz: hier zeigen sich je nach Harzanteil verschiedene Dichten des Prüfkörpers bei gleicher Materialzusammensetzung. Bei den Sandwich-Körpern zeigen sich keine großen Unterschiede zwischen organisch, bzw. anorganisch verfüllten Prüfkörpern.

6.2.2. Festigkeit

6.2.2.1. Druck- und Biegezugfestigkeit

In DIN 52100 werden als technische Werte für Sandsteine eine Druckfestigkeit von 20 bis 259 N/mm² und eine Biegefestigkeit zwischen 7 bis 39 N/mm² angegeben. Als E-Module finden sich in der Literatur Werte von 5 bis 80 kN/mm².

Die Molassesandsteine zeigen eine sehr große Bandbreite an Festigkeit. Während der Guntliweider Sandstein schon Werte von Granit erreicht, zeigt der Berner Sandstein gerade ein Viertel dieser Festigkeiten. Ein historischer Molassesandstein, Rorschacher und Bollinger-Lehholz Sandsteine nehmen auch hier einen mittleren Wert ein. Bei Durchfeuchtung reduzieren sich die Festigkeiten um ca. ein Drittel.



Diag. 2: Biegezug- und Druckfestigkeiten von Trocken- und Nassprismen der Sandsteine: deutlich erkennbar ist der Festigkeitsverlust bei Durchfeuchtung.

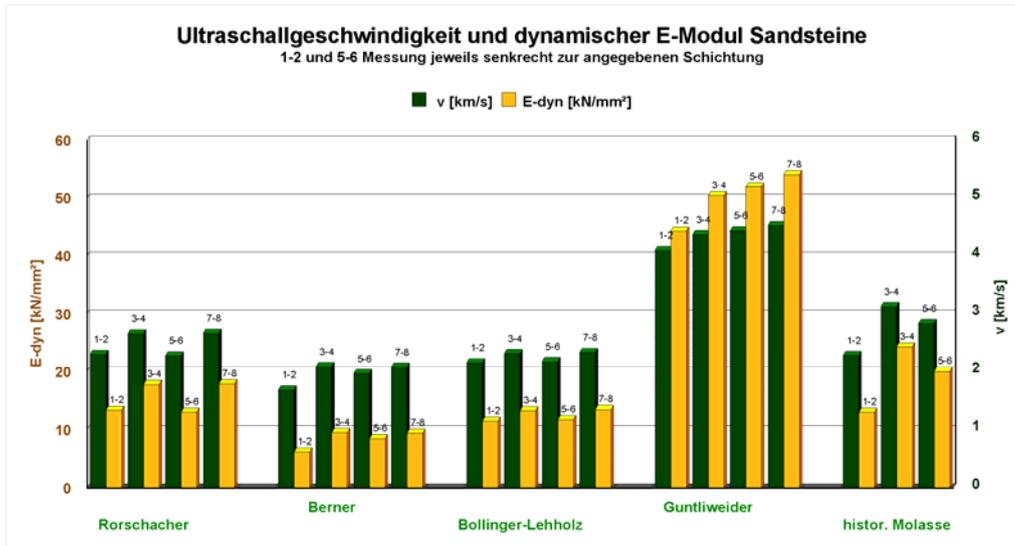
6.2.2.2. Dynamischer E-Modul

Wesentlich für die Beurteilung der Wirksamkeit von Konsolidierungsmaßnahmen sind die dynamischen E-Module. Die Sandsteinprismen von je ca. 380 x 50 x 50 mm wurden an vier Stellen der Langseiten gemessen, um aussagefähige Werte über Schichtungsdifferenzen hinweg zu bekommen. Der Schall senkrecht zur Schichtung läuft langsamer. Es werden Maximalwerte von 52 kN/mm² erreicht

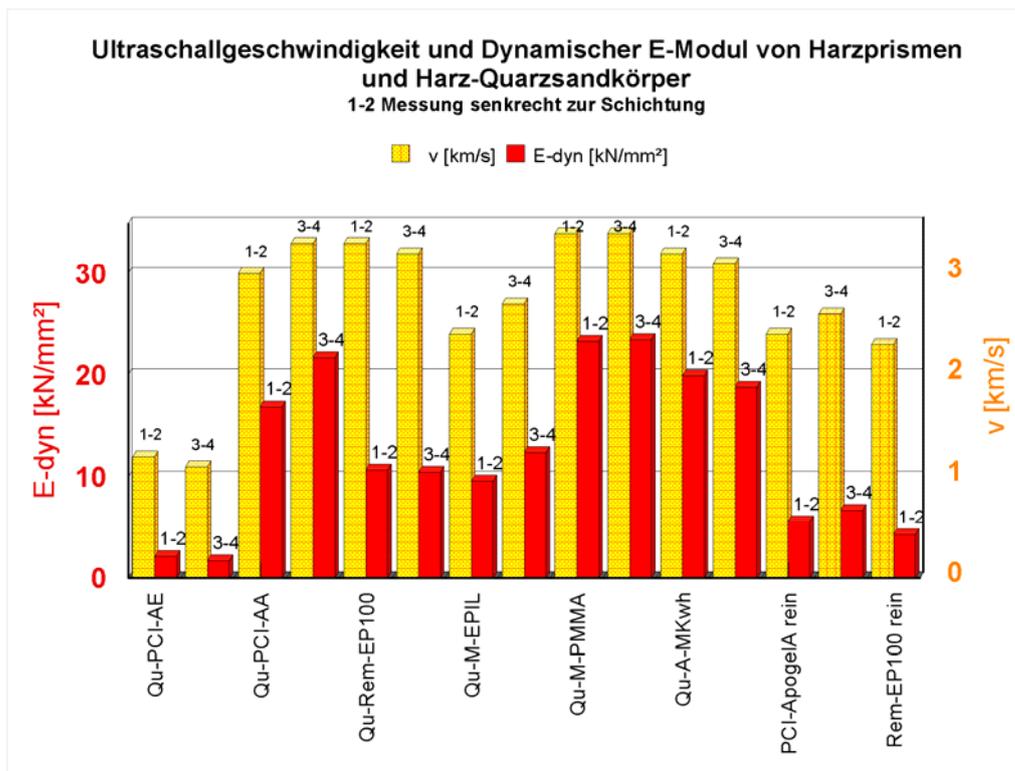
Interessant ist der Vergleich von zunächst reinen Harzkörperwürfeln zu Würfeln aus Quarzsand-Harz-Körpern und dann weiter zu den konsolidierten „Chaosverbundkörpern wie dem R+Rem-EP100.

Die reinen Harze zeigen geringere dynamische E-Module als die Sandsteine. Die Werte liegen bei den künstlichen Quarzsand-Harzkörpern dramatisch hoch und scheinen gemäß den WTA-Anforderungen für die Konsolidierung viel zu hoch. Beim simulierten Einsatz des Epoxidharzes EP 100 in Rorschacher Sandsteinschichten (Chaosverbundkörper R+Rem-EP100) senkt sich der E-Modul aber auf den Wert eines „normalen“ Rorschacher Sandsteines. Bei gezielter Anwendung der Harze – je nach Sandsteintyp –

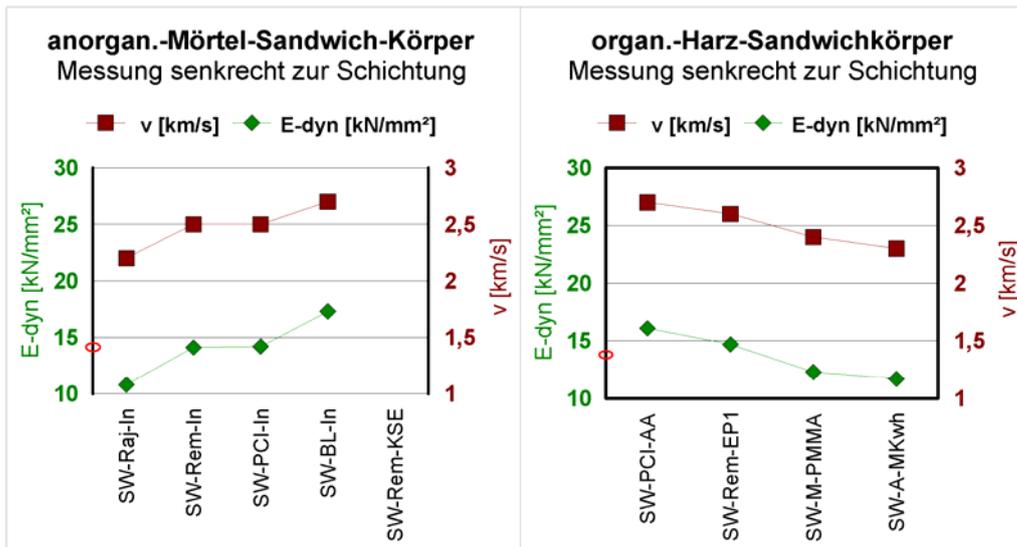
scheint eine optimale Steuerung der E-Module und damit der Maßnahmen-
durchführung möglich.



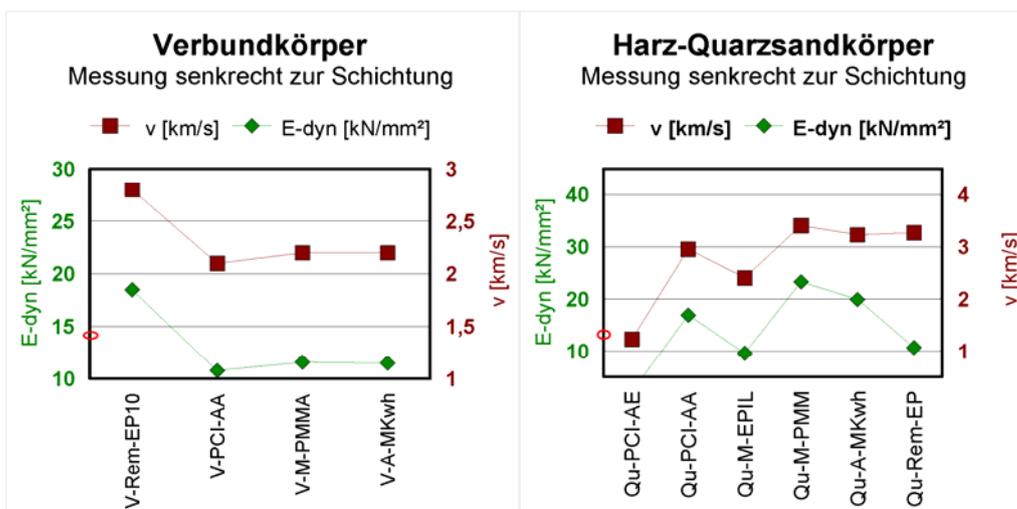
Diag. 3: Es zeigen sich große Unterschiede bei Ultraschallgeschwindigkeiten und dynamischen E-Modulen der Molassesandsteine: am stärksten zwischen Berner und Guntliweider Sandstein.



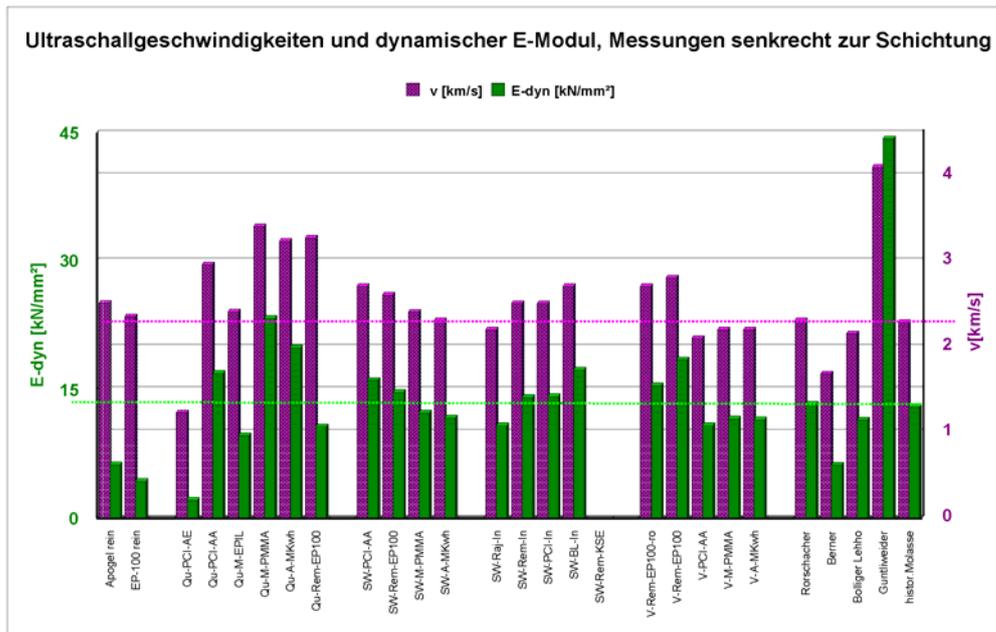
Diag. 4: Ultraschall und E-Module von reinen Harzprismen und Quarzsand-Harzprismen zeigen, dass die E-Module über die Zuschläge gut steuerbar sind und sowohl über Harztyp als auch Zuschlagmenge eine gute Anpassung an den jeweiligen Sandstein erfolgen kann.



Diag. 5: Auch im Vergleich der Ultraschall und E-Module der Sandwichkörper zeigen sich große Unterschiede. Zum nochmaligen Vergleich: Rorschacher Sandstein hat einen Edyn von 13,3 kN/mm² (roter Kreis). Der Prüfkörper SW-Rem-KSE ist auseinandergefallen und kann nicht gemessen werden.



Diag. 6: Die E-Module der Verbundkörper zeigen ein im Vergleich zum Rorschacher Sandsteins mit Edyn von 13,3 kN/mm (roter Kreis) günstige Werte.

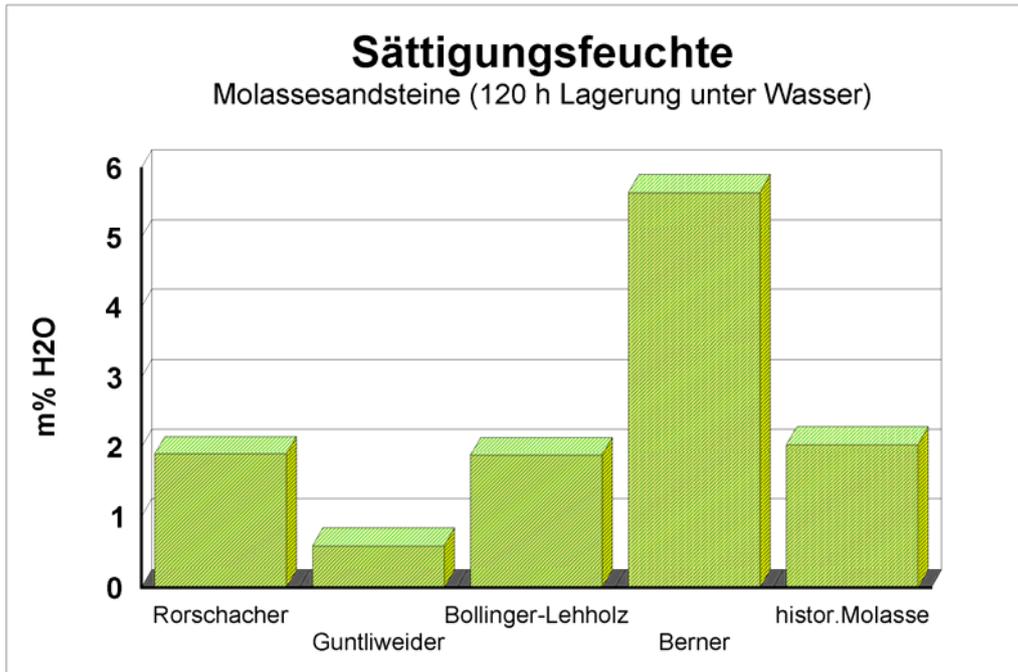


Diag. 7: Vergleich der E-Module aller möglichen Harz- (links) und Sandsteinprüfkörper (rechts). Die Werte des Rorschacher Sandsteins dienen als Vergleichslinien.

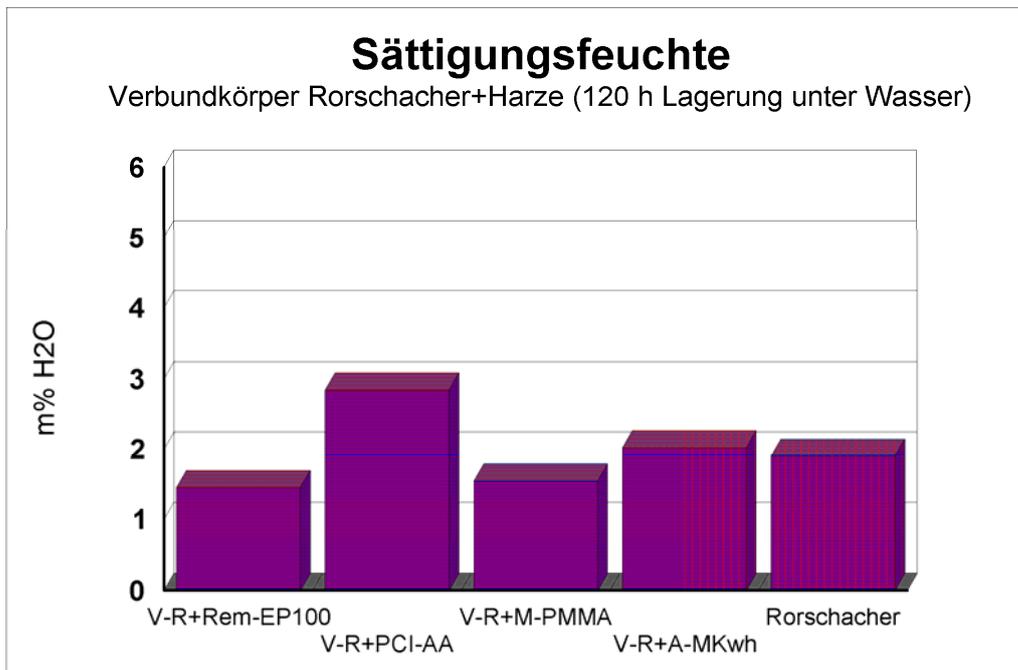
6.2.3. Wasseraufnahme und – Abgabe

6.2.3.1. Sättigungsfeuchte

Obwohl die Molassesandsteine zur selben Gesteinsfamilie gehören unterscheiden sie sich in ihren technischen Werten erheblich. Am deutlichsten ist das an der Wasseraufnahme bis zur Sättigung nach 120 Stunden zu erkennen. Der Berner Sandstein nimmt ca. das Zehnfache (5,65 Masse-%) des Guntliweider Sandsteines (0,59 Masse-%) auf. Rorschacher (1,9 Masse-%) und Bollinger-Leholz (1,89 Masse-%) liegen nahezu gleich dazwischen



Diag. 8: Die Molassesandsteine zeigen eine stark divergierende Sättigungsfeuchte auf.

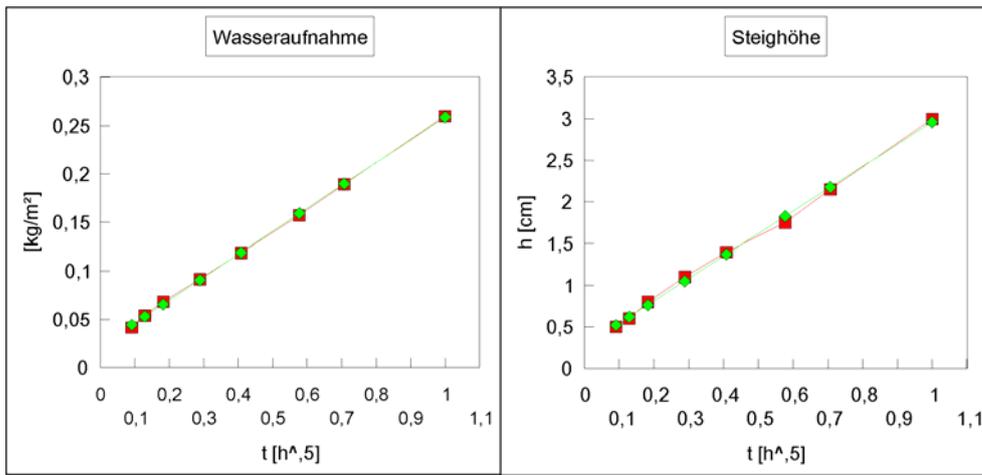


Diag. 9: Die Sättigungsfeuchten der "Chaosverbundkörper verschiedener Harze im Vergleich mit dem Rorschacher Sandstein (rechts) zeigen, dass eine Wasseraufnahmeverhalten ähnlich dem Originalstein möglich ist.

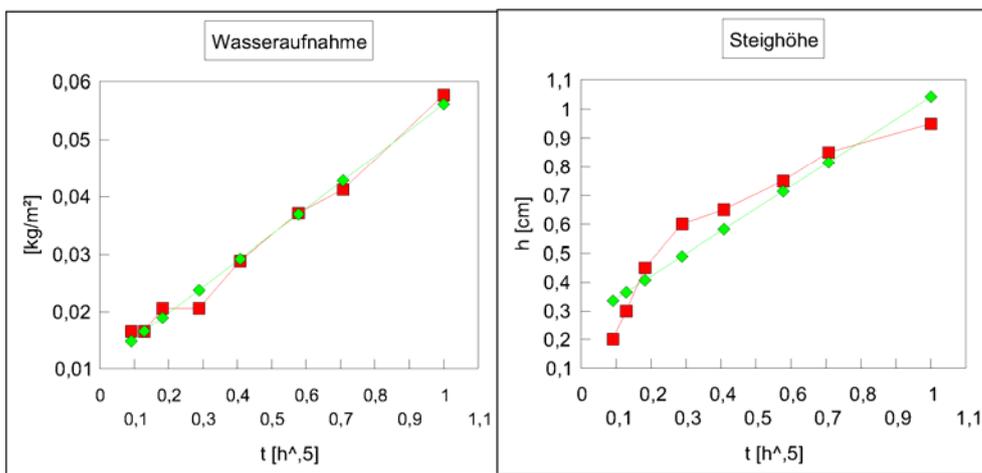
6.2.3.2. Wasseraufnahme am Prisma

Die Aufnahme von Wasser geschieht in der Regel linear zur Zeit in der das Wasser angeboten wird.

In idealer Weise zeigt sich diese Gesetzmäßigkeit beim extrem saugfähigen Berner Sandstein wo die tatsächlichen Messpunkte (rot) mit den vorberechneten (grün) zusammenfallen. Der extrem dichte Guntliweider Sandstein erlaubt sich dagegen einige kleine Versprünge.



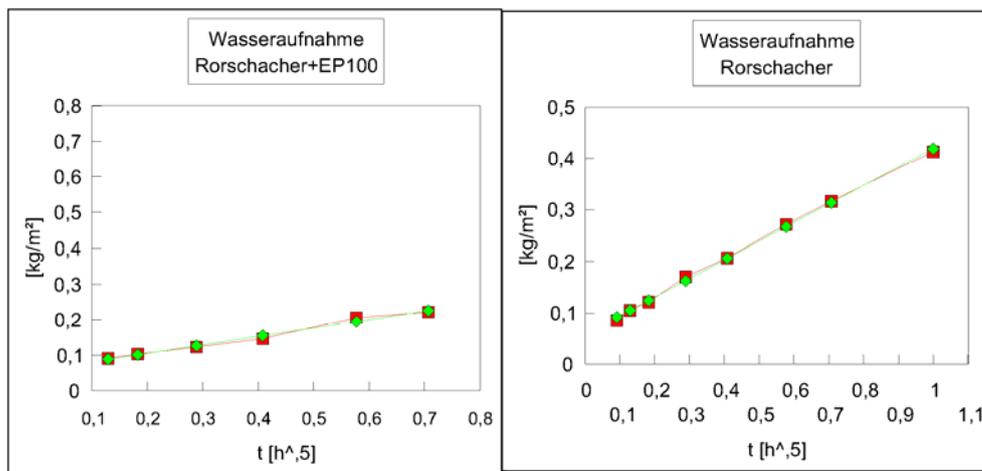
Diag. 10: Wasseraufnahme und Steighöhe beim Berner Sandstein (rot)



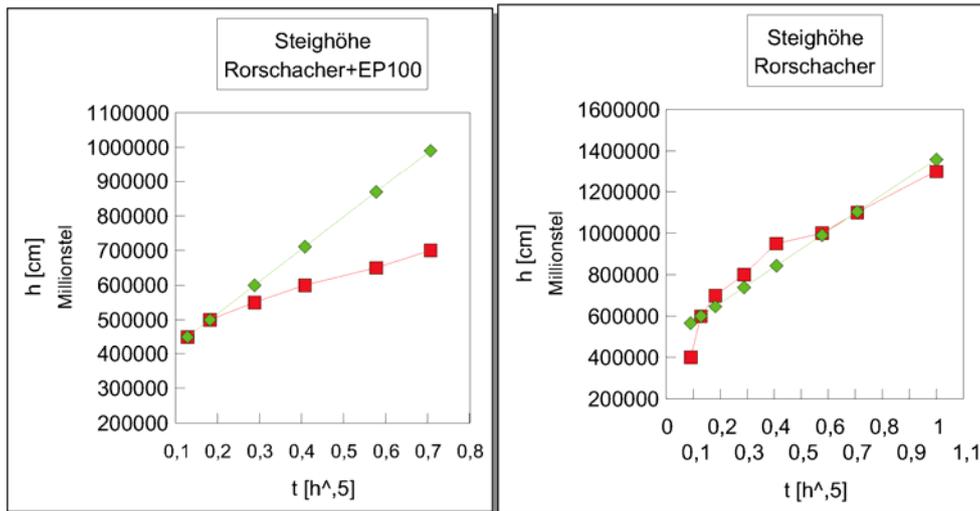
Diag. 11: Wasseraufnahme und Steighöhe beim Guntliweider Sandstein (rot)

Interessant und spannend gestaltet sich die Frage, ob denn der Verbundkörper eines konsolidierten Sandsteins auch in der Lage ist, Wasser regelrecht aufzunehmen.

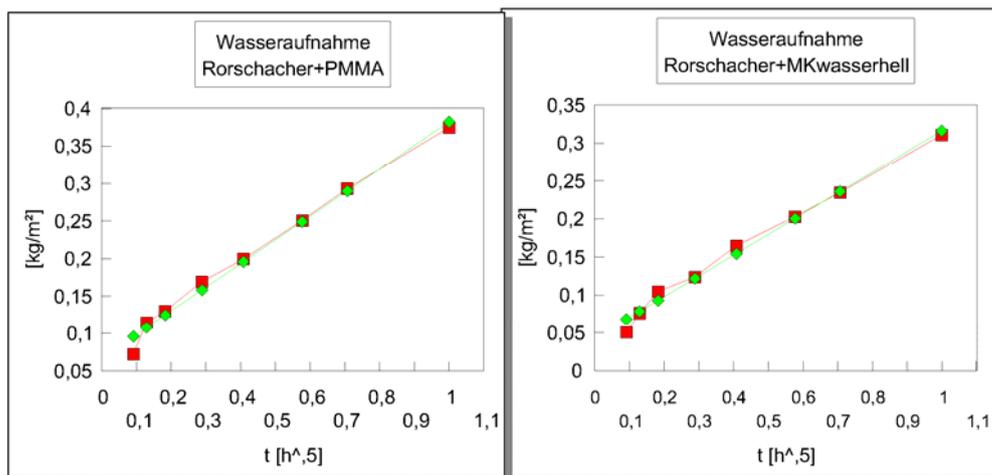
Die folgenden Schaubilder zeigen jeweils links den Verbundkörper und rechts den reinen Sandstein. Offensichtlich beginnen die Sandsteinkonglomerate im Verbundkörper normal zu saugen, werden dann aber gebremst. Erst wenn das Wasser in das Gesamtsystem eingedrungen ist, kommt es - gemessen an der Wassermenge- am Ende zu normalen Wasseraufnahmeverhalten. Die außen sichtbare Steighöhe ist verläuft niedriger, was darauf schließen lässt, dass nur das Sandsteinmaterial für den Transport zur Verfügung steht und es sich sein Volumen am Würfel mit dem Harz teilen muss. Die Chaosverbundkörper des Rorschacher Sandsteins mit den anderen Reaktionsharzen R-PMMA, R-MK-wasserhell und R-Apogel-A zeigen dasselbe Verhalten (Diagramme 12–14).



Diag. 12: Der Vergleich der Wasseraufnahme eines Rorschacher Sandsteins (rechts) und eines Rorschacher-Epoxidharz-Verbundsteines in den ersten 120 Sekunden zeigt, dass die aufgenommene Wassermenge beim Verbundkörper geringer ist als im Sandstein, aber die lineare Wasseraufnahme gegeben ist. (grün = jeweilige Ideallinie, rot = Prüfkörper)



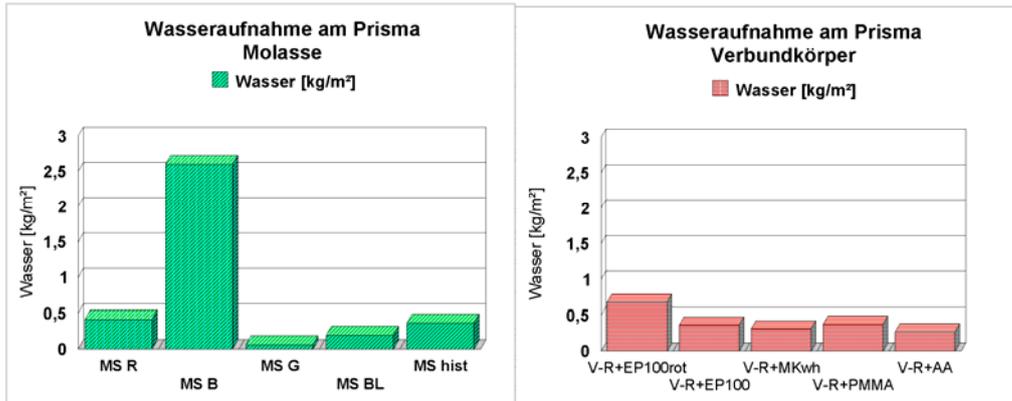
Diag. 14: Die Unterschiede bei den Steighöhen vom Rorschacher Sandstein (rechts) und seinem Verbundkörper in den ersten 120 Sekunden ergeben sich durch die auch geringere Wasseraufnahme des Verbundkörpers.



Diag. 13: Auch die Wasseraufnahmen der Verbundkörper mit einem PMMA und einem PES-Harz zeigen nach einem etwas zögerlichen Beginn einen gesetzmäßigen, linearen Verlauf

Betrachtet man über das Saugverhalten hinaus die absolut aufgenommene Wassermasse, so zeigt sich, dass das Harz eine Wasseraufnahme insgesamt nicht verhindert (Diagramme 15-16).

Bei Versuchen an reinen Harz-, bzw. Quarzsand-Harz-Körpern kommt es zu keiner messbaren Wasseraufnahme. Auf die Darstellung in Diagrammen wird deshalb verzichtet.



Diag. 15: Die absolute Wasseraufnahme der Prüfkörper [kg/m²] zeigt, dass sich die Verbundkörper im Bereich des originalen Rorschacher Sandsteines (MS R) bewegen.

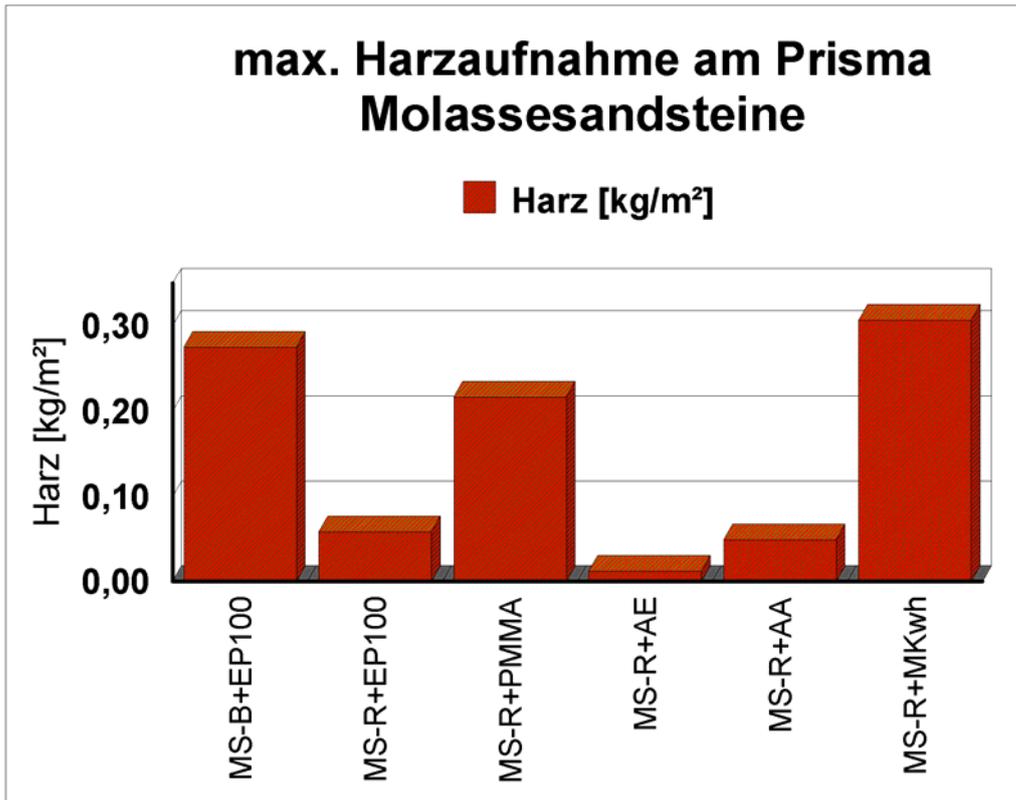
6.2.3.2. Feuchtedurchgang

Wider Erwarten nehmen alle Harz-Sandstein-Chaosverbundkörper Wasser auf. Stellt sich die Frage, ob Wasser auch durch beschichtete Sandsteinflächen hindurch gehen kann oder ob schon ein geringer Harzfilm reicht, einen Feuchtedurchgang zu stoppen.

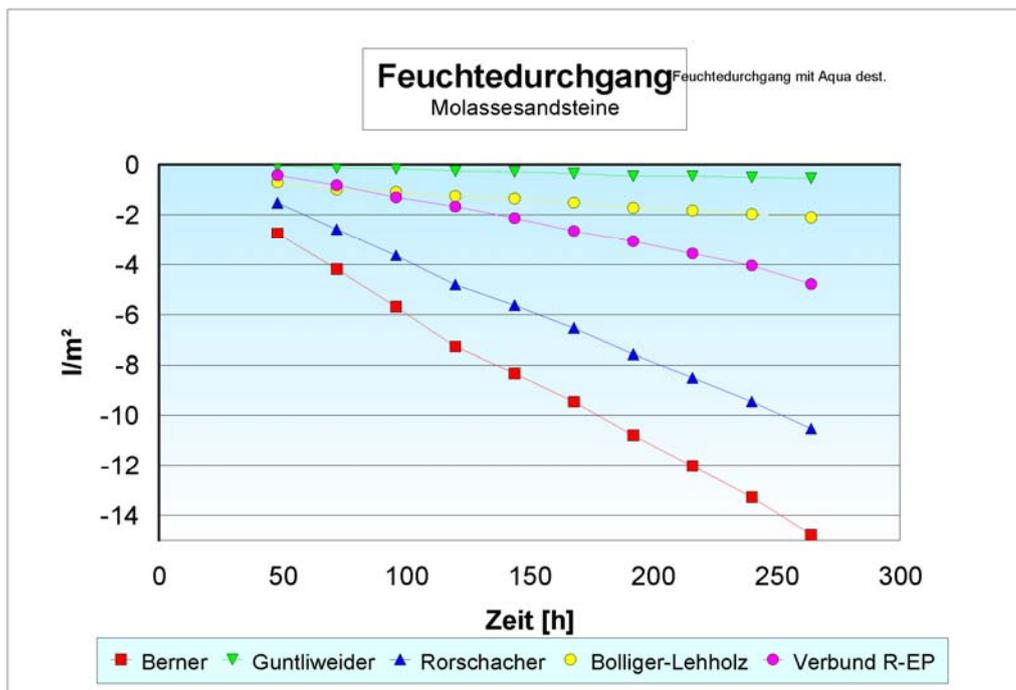
Ähnlich der Wasseraufnahme am Prisma werden den Sandsteinen verschiedene Harze zum kapillaren Saugen über eine Stunde hinweg angeboten. Die Aufnahme ist -abhängig vom Saugverhalten des Sandsteines und der Viskosität des Harzes- vergleichsweise gering, reicht jedoch aus, einen deutlichen Harzfilm auf und in der Sandsteinoberfläche zu bilden (Diagramm 16).

In der weiteren Überlegung gilt es nun zu überprüfen, ob durch diesen Harzfilm hindurch Wasserdampf diffundieren (Feuchtedurchgang) kann.

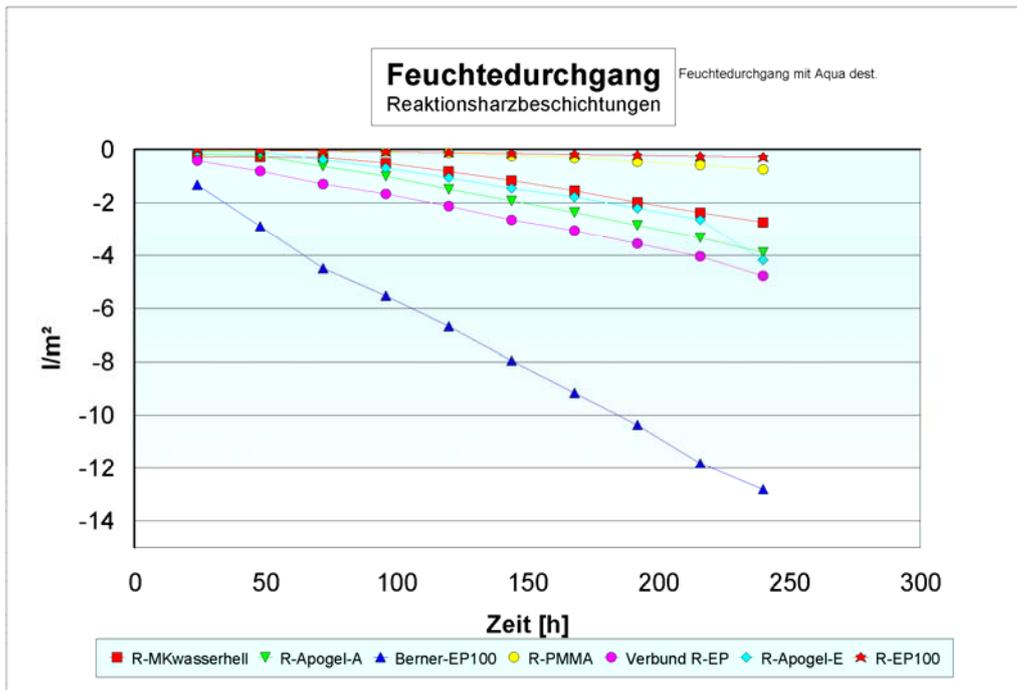
Tatsächlich verhalten sich die beschichteten Prüfkörper über 14 Tage hinweg wie dichte Molassesandsteine. Der Verbundkörper zeigt auch das Verhalten eines dichten Sandsteines. Ein Wasserdampfaustausch findet also, wenn auch zum Teil deutlich verringert, statt.



Diag. 16: Stark wassersaugende Sandsteine wie der Berner saugen auch niedrig viskose Harze stark. Insgesamt ist die aufgenommene Menge gering, reicht aber zur Ausbildung eines Filmes auf der Oberfläche.



Diag. 17: Feuchtedurchgänge durch die Molassesandsteine. Der Verbundkörper V-R+Rem-EP100 (violette Punkte) dient als Vergleich.



Diag. 18: Ein Feuchtedurchgang durch kapillares Saugen verursachte Harzfilme findet statt. Die Werte verschieben sich hin zu dichten Sandsteinen.

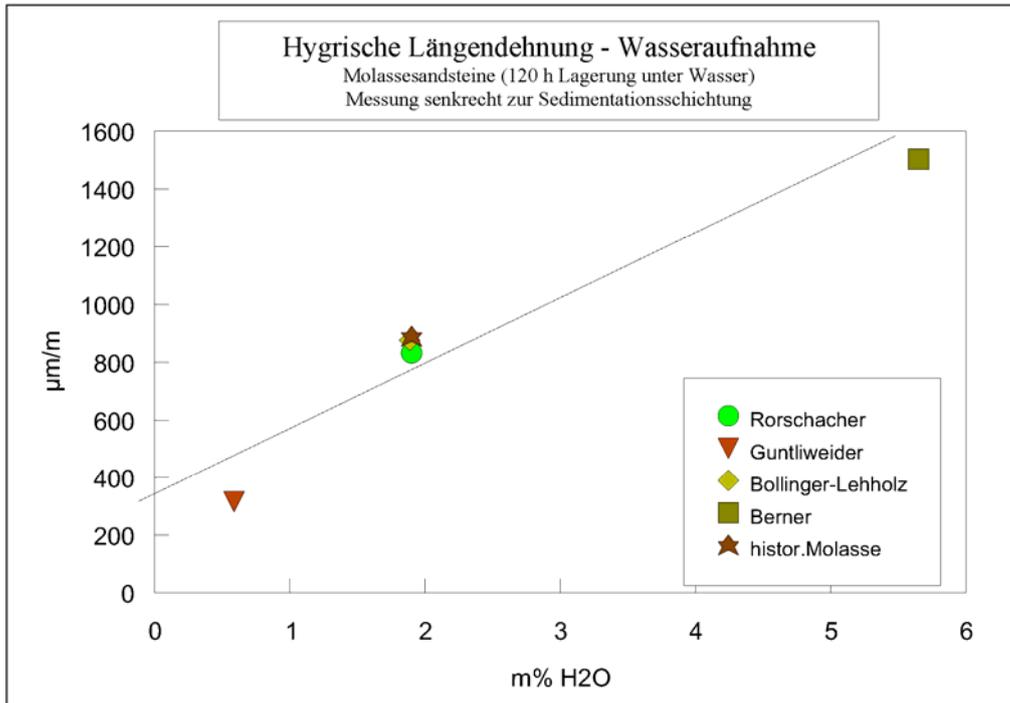
6.2.4. Dehnungen

6.2.4.1. Feuchtedehnung

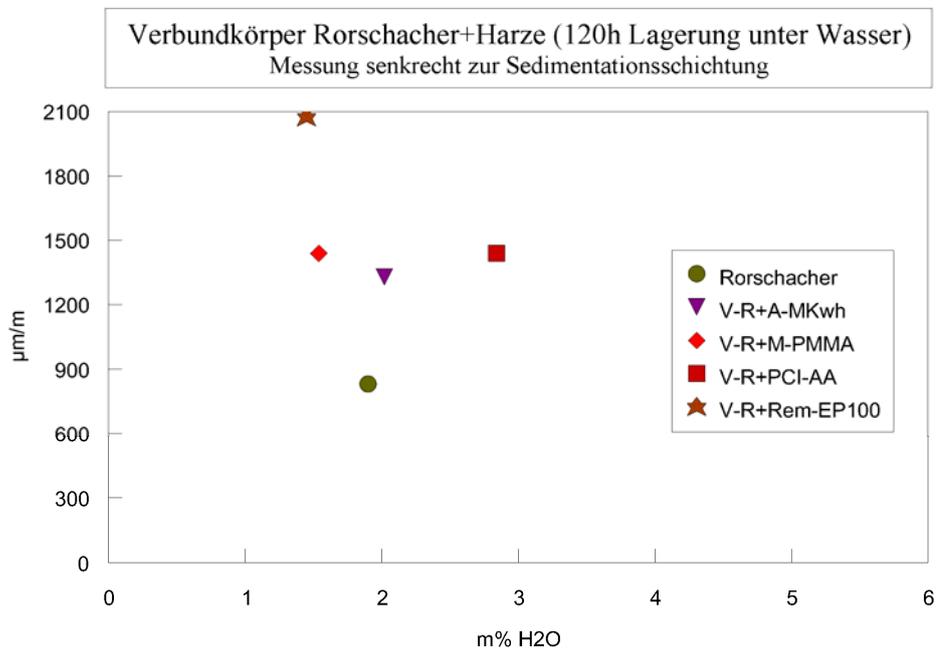
In Verbindung mit den Untersuchungen zur Wassersättigung wurde mittels eines Dilatometers auch gemessen, in welchem Maße sich die Sandsteine durch die Wasseraufnahme dehnen.

Auch hier zeigen sich die schon gewohnten großen Unterschiede zwischen den beiden Extremen Berner und Guntliweider Sandstein.

Im Berner Sandstein bewirkt die große Dehnung bereits eine Scherkraft von ca. $5,5 \text{ N/mm}^2$. Bei einer Biegezugfestigkeit von nur $2,3 \text{ N/mm}^2$ bedeutet das, dass es hier zwangsläufig zum Abschalen kommen muss, wenn es zu Grenzflächenbelastungen von trocken zu nass kommt (Diagramme 19-20)



Diag. 20: Hygrische Dehnungen und Wasseraufnahme korrespondieren miteinander und ergeben eine deutliche Aufspaltung des Versuchsfelds mit einer mittleren Konzentration und zwei extremen.



Diag. 19: Die Hygrische Dehnung der Verbundkörper wirft Fragen auf, denn sie dehnen sich mehr als der Sandstein und nehmen zum Teil auch mehr Wasser auf.

..

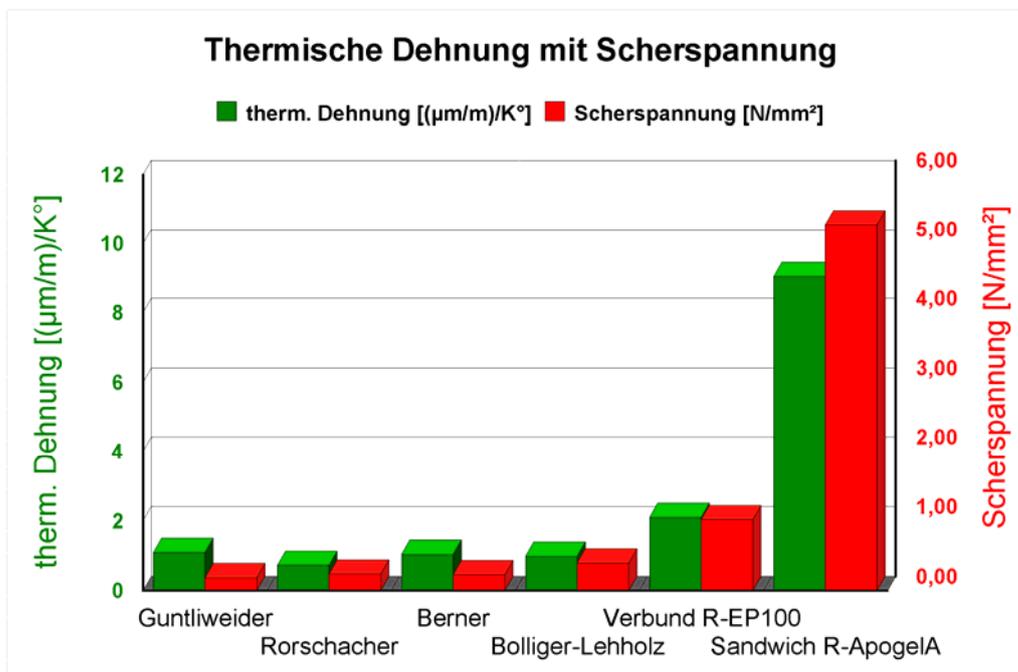
6.2.4.2. Wärmedehnung

Anders als die hygri-sche Dehnung zeigt die thermische Dehnung keine großen Unterschiede zwi-schen den einzelnen Sandsteinen. Eine große Veränderung bringt der Einsatz von Reaktionsharzen, insbesondere, wenn sie großvolumig ohne Zuschlag zu wirken kommen.

Der Sandwichverbundkörper mit einem Anteil von ca. 1/3 reinen Harzes schnellt in seinen Werten geradezu nach oben, während der Verbundkörper noch im Rahmen der Sandsteine bleibt.

Interessant ist, dass man von einer Dehnungsursache nicht auf die andere schließen kann. Während z. B. der Guntliweider Sandstein für hygri-sche Dehnung kaum anfällig ist, reagiert er jedoch stark auf Wärme.

Wenn die Scherspannung größer ist als die Biegezugfestigkeit kann es zum Bruch im Material kommen. Dieser Zustand wird bei der hygri-schen Dila-tation von Berner und Bollinger Sandsteinen erreicht, weshalb hier ein großes Gefährdungspotential liegt.



Diag. 21: Bei einer thermischen Dehnung wird die Menge an eingebrachtem Harz wesentlich für das Verhalten des Körpers. Im Sandwich-Körper macht der Harzanteil ca. 20% am Volumen aus. Die Dehnung schnellt entsprechend hoch.

7. Schlusswort

7.1. Der Weg zur Molasse

Ausgangspunkt für diese Diplomarbeit ist die eigene restauratorische Arbeit im süddeutschen Raum, bei der ich immer wieder auf Steine stoße, die von ihrer äußeren farblichen Erscheinung her sehr verschieden sind, von ihrem Verwitterungsverhalten her aber sehr ähnlich.

Der Grund für die Beschäftigung mit Molasse, vielmehr mit Molassesandsteinen, ist zunächst ein ganz praktischer: es ist die Fragestellung, ob es geeignete Techniken und Mittel zur Verfestigung und Verbindung von Oberflächen und losen Schichten und Schalen gibt und ob diese in der Praxis auch nachhaltig durchführbar sind.

Oberflächen sind ja nicht nur die optisch wahrnehmbare Grenze vom Stein-äußeren zum Inneren. Oberfläche entsteht immer wieder neu entlang von Rissystemen und Hohlräumen als Resultat komplexer Schadensphänomene und reicht bis tief in den Werkstein hinein.

Aus pragmatischen Überlegungen sind theoretische Betrachtungen geworden. Zwar gibt es einige Untersuchungen und Restaurierungsberichte zum Thema Molassesandstein, aber kaum für meine restaurierungsethische Sicht, Wege zu finden, die den oft zwingend erscheinenden Austausch des geschädigten Steins, vermieden werden sind es wenige.

7.2. Zu Prüfkörpern und Test

Ausgangspunkt sind einerseits die Erfahrungen aus der Natursteinsanierung wie sie speziell bei Rissverfüllungen, die zu den Sandwichkörpern als Prüfkörper geführt haben. Und andererseits die Beobachtung, dass speziell in der Estrichsanierung versucht, wird über die Risse in den Untergrund zu

gelangen und diesen zu konsolidieren. Dies hat zusammen mit eigenen Erfahrungen zu den sogenannten „Chaosverbundkörpern“ geführt.

Um verlässliche Aussagen zu bekommen ist es nötig, möglichst breit, für möglichst viele restauratorischen Gegebenheiten Simulationen zu entwickeln, exemplarisch durchzuführen und zu überprüfen.

Dies scheint mir, ist mit den dargestellten, umfangreichen Simulationen und Tests gelungen. Dabei haben die Untersuchungen an den beiden Prüfkörpertypen zu völlig unterschiedlichen Ergebnissen geführt:

- bei Sandwichkörpern funktionieren anorganische Injektionsmittel
- bei Verbundkörpern funktionieren sie nicht
- organische Injektionsmittel können variabel eingestellt und sehr breit eingesetzt werden
- das bauphysikalische Verhalten von „Bauharzen“ scheint weitgehend kontrollierbar.

An der offenen Wunde von Sandsteinen kann erfahrungsgemäß gut und kontrolliert gearbeitet werden und hier ist sicher der Schwerpunkt der anorganischen Bindemittel, die eine intensive Betreuung während ihrer langen Reaktionsphase nötig haben.

Verlässlich ins Innere der Steine zu gelangen hat sich als sehr schwierig herausgestellt und nur niedrigviskose Reaktionsharze haben es geschafft, dort wirksam zu werden!

Dem Einsatz von Reaktionsharzen wird eher skeptisch begegnet, da man die Furcht hat, den Naturstein zum Kunststoff zu machen. Nach den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchungen scheint diese Vorstellung eher materialästhetisch, ikonografisch begründet zu sein, materialtechnisch zeigt sich das Gegenteil.

Es ist sehr überraschend, wie „gut“ die Reaktionsharze sich auf den Naturstein einstellen lassen und man zu ganz „normalen“ bauphysikalischen Ergebnissen kommt.

Neue Fragestellungen ergeben sich, wenn man misst, dass ein Verbundkörper von Harz und Stein seinerseits ein ganz anderes Verhalten zeigt als die beiden jeweiligen Materialien: So haben z.B. die reinen Harzwürfel und Quarzsand-Harz-Würfel keinerlei Wasser aufgenommen, in Verbindung mit dem Sandstein aber doch und dabei auch noch mehr als der Sandstein alleine.

Auch über den Volumenanteil von Kunstharz und Naturstein in eventuellen Reparaturmörteln ist der thermischen Dehnung wegen noch Untersuchungsbedarf.

Insgesamt stelle ich aber fest, dass es Techniken und Mittel gibt, die Oberflächen, losen Schichten und Schalen von verwitterten Molasesandsteinen zu konsolidieren, und dass es damit möglich ist, mehr originale Steinsubstanz zu erhalten, als man bis Lange gedacht hat.

8. Anhang

8.1. Abkürzungsverzeichnis

UM	Untere Meerwassermolasse
US	Untere Süßwassermolasse
OM	Obere Meeresmolasse
OS	Obere Süßwassermolasse
MS-R	Rorschacher Sandstein (Staad)
MS-G	Guntliweider Sandstein
MS-BL	Bollinger Sandstein (Bollingen-Lehholz)
MS-B	Berner Sandstein (Ostermündingen)
Rem-KSE-M	Remmers KSE-Modul-System
Rem-K	Remmers-Kiesel
PCI-In	PCI Bohrlochsuspension
Rem-In	Remmers Injektionsleim 2K
BL-In	BL REPAR-H20 Injektionsmasse
Raj-IN	Rajasil-Injektionsmörtel IM-0,1
EP	Epoxidharze
PUR	Polyurethanharze
PMMA	Acrylharze
PES	Polyesterharze
A-MKwh	Akemi Marmorkitt 1000 transparent wasserhell
M-EPIL	Motema Epoxiinjektionsharz langsam
M-PMMA	Motema Injektionsharz PMMA

PCI-AA	PCI Apogel A
PCI-AE	PCI Apogel E
PCI-sch	PCI Apogel-schnell
SW	Sandwich-Prüfkörper
V	„Chaos“Verbund-Prüfkörper

8.2. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Molassewand am Halblech im Allgäu

Abb. 2: Überblick über wesentliche Gesteinseigenschaften nach W.-D. Grimm, die Mollassesandsteine sind farbig unterlegt.

Abb. 3: Südrand des Molassebeckens im Bereich des heutigen westlichen Allgäu: Das Molassemeer hat sich bereits zurückgezogen und von den aufgefalteten Alpen (oberer Rand) wird über die Flüsse Schutt eingebracht.

Abb. 4: Schnitt durch die Auffaltung der Molasse am nördlichen Alpenrand

Abb. 5: Gesteine des nordalpinen Molassebeckens (die Molasseformationen sind farbig unterlegt)

Abb. 6: Sandsteinbruch in Staad (Rorschacher Sandstein) am Bodensee, Schweiz

Abb. 7: "Herauspräparierte" Geröllschnüre an einer frei bewitterten Oberfläche, am Wittelsbacherdenkmal in Oberwittelsbach, Aichach

Abb. 8: Schuppige Verwitterung an einem "auf Spalt" eingesetztem Gewände in Kirchberg, Schweiz.

Abb. 9: Rötliche Verfärbungen im graubeigen Sandstein und im Marmor an einem exponiert nach Süden ausgerichteten Grabdenkmal des Protestantischen Friedhofs, Augsburg.

Abb. 10: Abplatzungen durch Materialspannungen und Schalenbildung in einem Epitaph in der Basilika St. Ulrich und Afra, Augsburg

Abb. 11: Kruste aus Mikroorganismen auf der Kreuzblume des Wittelsbacherdenkmals in Oberwittelsbach, Aichach

Abb. 12: Schichtenparalleles Aufspalten an einer Fiale am Wittelsbacherdenkmal in Oberwittelsbach, Aichach

Abb. 13: Abdeckplatten an der Lechbrücke in Lechbruck lösen sich blättereigartig auf.

Abb. 14: Aufspalten und Ablösen von Gesteinslagern in einer Balkonplatte von außen nach innen. Schaezlerpalais, Augsburg

Abb. 15: Durch einen Feuchtestrom aus dem Untergrund wird das Bindemittel in einer Pfeilerbase gelöst und es kommt zum Absanden. Säulenbasis Alter Friedhof Landsber/Lech.

Abb. 16 In einer großflächigen Gipskruste kommt es zu Spannungen und Abplatzungen, Abt-Epitaph Steingaden.

Abb. 17: Detail eines geschädigten Priestergrabes in Markt Thierhaupten

Abb. 18: Schemazeichnung nach Honsinger über die Anlagerung von Polymeren (schwarz) an Poren bei Konservierungsmaßnahmen

Abb. 19: Polymerisation (Polyaddition) eines Epoxidharzes aus Epichlorhydrin (Harz) + Bisphenol A (Härter) □ Epoxidharz

Abb. 20: Lechbrucker Sandstein in vier Sichtweisen: verwittertes Grabmal, geschliffene Oberfläche, Dünnschliff und Rasterelektronenaufnahme

Abb. 21: Auflegen einer Cellulose-Kompresse auf einem Abt-Epitaph, Werkstatt Roth

Abb. 22: Rissinjektion über Packer und Spritzen an einer Balkonplatte, Werkstatt Roth

Abb. 23: Ein im KSE-Modulsystem verfülltes Rissnetzwerk, Werkstatt Roth

Abb. 24: Rissinjektion durch einen direkten Injektionskanal (links) und durch indirekte (rechts).

Abbildung 25: Anbohren und Verfüllen eines Hohlraums über eng gesetzte Bohrungen und Injektionspacker

.Abb. 26 Ausbildung eines Polymergelschleiers in einem Hohlraum hinter dem Sandstein

Abb. 27: Durch Konterplatten fixierter Anker in einem Mauerwerk

Abb. 28: Schemazeichnung gängiger "trockener" und "naßer" Verbindungen

Abb. 29 Über einen Injektionsdübel wird Reaktionsharz in Hohlräume eingefüllt

Abb.30: Schnitt durch einen "Roth-Injektionsanker": ein gelochter Edelstahlstab wird durch ein Bauteil geschoben, je nach Bedarf einseitig geschlossen (hier unten) und von der Gegenseite her verfüllt. Zusätzlich kann über einen eingeschobenen Gewindestab eine mechanische Bindung erzeugt werden.

Abb. 31: Drucklose Injektion über kummunizierende Röhren. Das System kann sich selbst entlüften.

Abb. 32: Blasenbildung bei nicht entlüftender Druckinjektion

Abb. 33: Einsetzen von Injektionsankern zur drucklosen Injektion einer Balkonplatte, Augsburg

Abb. 34: Prüfkörper im Längsschnitt: oben Sandwich- und Massiv-Körper, unten "Chaosverbundkörper"

Abb. 35: Prüfwürfel der Molassesandsteine: Rorschacher, Guntliweider, Berner, Bollinger, historischer Molassesandstein

Abb. 36: Sandwich-Körper: links leer und rechts verfüllt und überschliffen

Abb. 37: Gesteinsscherben im Trockenofen

Abb. 38: Querschnitt durch den Versuchsaufbau mit Plastikwannen, die durch Plexiglasscheiben in jeweils drei Fächer geteilt werden.

Abb. 39: Einschichten der Materialien für den "Chaosverbundkörper": zu sehen sind links: Scherben, mittig Quarzsand und rechts wieder Scherben. Deutlich erkennbar sind die Injektionshülsen. (Ansicht von oben)

Abb. 40: Verfüllen eines Faches mit mineralischen Injektionsmaterial. (Ansicht von oben)

Abb. 41: Querschnitt eines mit Reaktionsharz verfüllten "Chaoskörpers": das Harz hat die Quarzkörner zum Teil weggeschoben, die glasig verfüllten Bereiche erscheinen schwarz.

Abb. 42: Schmelzen des Aufnahmegäßes durch hohe Reaktionstemperaturen eines Harzes. Zwei reine Harz-Würfel(oben). Quarzsand-Harzwürfel (unten).

Abb. 43: Ausbreiten von jeweils 2 ml Injektionsmaterial auf Sandstein.

Abb. 44: Verfüllung eines Sandwich mit KSE-Mörtel: deutlich ist das Absaugen des KSE und das Absacken des Füllstoffes zu sehen.

Abb. 45: Verfüllung der Sandwiches mit zementären Produkten: zwei Injektionsmörtel sacken ab.

Abb. 46: Injektionsharze. das PU-Harz quillt zwischen den Scheiben hervor. Bedingt durch kapillares Saugen bilden sich bei den anderen kleine Minisken.

Abb. 47: Verfüllung mit den anorganischen Mitteln BL-Injektionsmörtel, Remmers-Kiesol und PCI-Bohrlochsuspension (von rechts).

Abb. 48: Nur beim Kiesol-Injektionsmittel ist eine Durchfeuchtung des Faches fest-zustellen.

Abb. 49: Nach dem Beim Öffnen der Fächer mit anorganisch verfüllten Injektionsmittel fallen die Materialien auseinander.

Abbildung 50: Beim Injizieren breitet sich das Harz von den Injektionshülsen aus (dunkle Flecken).

Abbildung 51: Nahezu voll ständig verfülltes Fach mit einem "Glaskörper" aus Harz und Stein und Quarzsand

Abbildung 52: Umgestülpte, geleerte Plastikwanne mit verfüllten Fächern von Re-aktionsharzen: Die beiden hinteren bilden ganze Körper aus. Dem PU-Harz im Vordergrund gelingt dies nicht: (Ansicht von unten).

Abb. 53: Prüfkörper in der Werkstatt Roth

Abb. 54: Messaufbau zur Bestimmung der Rohdichte: Waage und Schublehre

Abb. 55: Messung des dyn. E-Moduls am Sandsteinprisma über Schallgeer und –Empfänger

Abb. 56: Maschinelle Druckfestigkeitsprüfung im Labor.

Abb. 57: Biegezugtest durch mittige Auflast eines Schneidestempels über zwei Rundaufleger

Abb. 58: Messung der kapillaren Wasseraufnahme über Schwamm, Waage und Uhr.

Abb. 59: Messung der Wassersättigung durch Fluten und Dilatation durch konstante Messung.

Abb. 60: Schnitt durch einen Gefäß zur Feuchtedurchgangsmessung: das Wasser im Becken muss durch den Prüfkörper hindurch und kann nur an der obigen, definierten Fläche austreten.

8.3. Diagrammverzeichnis

Diag. 1: Rohdichten im Vergleich: Die reinen Harze haben eine wesentlich geringere Dichte als die Sandsteine, gleichen sich aber in Verbindung mit Sandsteinkomponenten diesen an. Deutlich erkennbar ist es bei den beiden Verbundkörpern mit dem EP100-Harz: hier zeigen sich je nach Harzanteil verschiedene Dichten des Prüfkörpers bei gleicher Materialzusammensetzung. Bei den Sandwich-Körpern zeigen sich keine großen Unterschiede zwischen organisch, bzw. anorganisch verfüllten Prüfkörpern.	93
Diag. 2: Biegezug- und Druckfestigkeiten von Trocken- und Nassprismen der Sandsteine: deutlich erkennbar ist der Festigkeitsverlust bei Durchfeuchtung.	94
Diag. 3: Es zeigen zeigen sich große Unterschiede bei Ultraschallgeschwindigkeiten und dynamischen E-Module der Molassesandsteine: am stärksten zwischen Berner und Guntliweider Sandstein.	95
Diag. 4: Ultraschall und E-Module von reinen Harzprismen und Quarzsand-Harzprismen zeigen, dass die E-Module über die Zuschläge gut steuerbar sind und sowohl über Harztyp als auch Zuschlagmenge eine gute Anpassung an den jeweiligen Sandstein erfolgen kann.	95
Diag. 5: Auch im Vergleich der Ultraschall und E-Module der Sandwichkörper zeigen sich große Unterschiede. Zum nochmaligen Vergleich: Rorschacher Sandstein hat einen Edyn von 13,3 kN/mm ² (roter Kreis). Der Prüfkörper SW-Rem-KSE ist auseinandergefallen und kann nicht gemessen werden.	96
Diag. 6: Die E-Module der Verbundkörper zeigen ein im Vergleich zum Rorschacher Sandsteins mit Edyn von 13,3 kN/mm (roter Kreis) günstige Werte.	96

Diag. 7: Vergleich der E-Module aller möglichen Harz- (links) und Sandsteinprüfkörper (rechts). Die Werte des Rorschacher Sandsteins dienen als Vergleichslinien.....	97
Diag. 8: Die Molassesandsteine zeigen eine stark divergierende Sättigungsfeuchte auf.	98
Diag. 9: Die Sättigungsfeuchten der "Chaosverbundkörper verschiedener Harze im Vergleich mit dem Rorschacher Sandstein (rechts) zeigen, dass eine Wasseraufnahmeverhalten ähnlich dem Originalstein möglich ist.	98
Diag. 10: Wasseraufnahme und Steighöhe beim Berner Sandstein (rot).....	99
Diag. 11: Wasseraufnahme und Steighöhe beim Guntliweider Sandstein (rot)	99
Diag. 12: Der Vergleich der Wasseraufnahme eines Rorschacher Sandsteins (rechts) und eines Rorschacher-Epoxidharz-Verbundsteines in den ersten 120 Sekunden zeigt, dass die aufgenommene Wassermenge beim Verbundkörper geringer ist als im Sandstein, aber die lineare Wasseraufnahme gegeben ist. (grün = jeweilige Ideallinie, rot = Prüfkörper)	100
Diag. 13: Auch die die Wasseraufnahmen der Verbundkörper mit einem PMMA und einem PES-Harz zeigen nach einem etwas zögerlichen Beginn einen gesetzmäßigen, linearen Verlauf	101
Diag. 14: Die Die Unterschiede bei den Steighöhen vom Rorschacher Sandstein (rechts) und seinem Verbundkörper in den ersten 120 Sekunden ergeben sich durch die auch geringere Wasseraufnahme des Verbundkörpers.	101
Diag. 15: Die absolute Wasseraufnahme der Prüfkörper [kg/m ²] zeigt, dass sich die Verbundkörper im Bereich des originalen Rorschacher Sandsteines (MS R) bewegen.....	102
Diag. 16: Stark wassersaugende Sandsteine wie der Berner saugen auch niedrig viskose Harze stark. Insgesamt ist die aufgenommene Menge gering, reicht aber zur Ausbildung eines Filmes auf der Oberfläche.	103

Diag. 17: Feuchtedurchgänge durch die Molasseandsteine. Der Verbundkörper V-R+Rem-EP100 (violette Punkte) dient als Vergleich....	103
Diag. 18: Ein Feuchtedurchgang durch kapillares Saugen verursachte Harzfilme findet statt. Die Werte verschieben sich hin zu dichten Sandsteinen.	104
Diag. 19:Die Hygrische Dehnung der Verbundkörper wirft Fragen auf, denn sie dehnen sich mehr als der Sandstein und nehmen zum Teil auch mehr Wasser auf.	105
Diag. 20: Hygrische Dehnungen und Wasseraufnahme korrespondieren miteinander und ergeben eine deutliche Aufspaltung des Versuchsfelds mit einer mittleren Konzentration und zwei extremen.	105
Diag. 21: Bei einer thermischen Dehnung wird die Menge an eingebrachtem Harz wesentlich für das Verhalten des Körpers. Im Sandwich-Körper macht der Harzanteil ca. 20% am Volumen aus. Die Dehnung schnell entsprechend hoch.	106

8.4. Quellenverzeichnis

- Das Salemer Münster – Befunddokumentation und Bestandsicherung an Fassaden und Dachwerk, Arbeitsheft 11 Landesdenkmalamt Baden-Württemberg, Konrad Theiss Verlag, Stuttgart 2002
- Internationale Natursteinkarte (INSK), Friedrich Müller, Band 1 und 6, Ebner Verlag, Ulm 1993
- Herbert Scholz, Bau und Werden der Allgäuer Landschaft, E. Schweizerbart'sche Verlagsabuchhandlung, Stuttgart 1995
- Geologische Karte von Bayern, Bayerisches Geologisches Landesamt, 1996
- <http://de.wikipedia.org>, diverse lexikalische Begriffe
- <http://www.geodz.com>, diverse lexikalische Begriffe
- Matthes, Mineralogie, Springer-Lehrbuch, 4. Auflage
- Geotope in Bayern, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg 2009
- Walter Schumann, Der neue BLV-Steine- und Mineralienführer, BLV-Verlagsgesellschaft mbH, München 1994
- Naturwerkstein und Umweltschutz in der Denkmalpflege, Ebner Verlag Ulm, 1997
- Angela Ehling (Hrsg.), Bausandsteine in Deutschland, Band 1, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart 2011
- DIN-Normen, Beuth-Verlag
- Geotope in Schwaben, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg 2009
- Ninon Ballerstädt und Wolf-Dieter Grimm, Die unterschiedlichen Naturwerksteinqualitäten des Lechbrucker Molassesandsteins, in: Wolf-Dieter Grimm, Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland, Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, München 1989

- Schmid, Heinrich; Die natürlichen Bau- und Dekorationsgesteine“ 2. Auflage K.Graeser, Wien und B.G. Teubner, Leipzig 1905
- Francis de Quervain, Die nutzbaren Gesteine der Schweiz,3. Auflage Kümmerly & Frey Bern 1969
- Siegfried Siegesmund, Michael Auras, Rolf Snethlahe (Hrsg.), Steinzerfall und Konservierung, Edition Leipzig, 2005
- Honsinger, D. J. Strukturmerkmale polymerimprägnierter Sandsteine, Dissertation RWTH, Aachen. 1990
- Rudolf Karsten, Bauchemie, Verlag C.F. Müller, Karlsruhe 1992
- Technischer Merkblätter, BL, Motema, PCI, Remmers u.a.
- Benedix, Roland, Bauchemie, Vieweg+Teubner, Wiesbaden 2011
- <http://www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/kunststoffe/polyadd.htm>
- Josef Ineichen und Claudia Knerr, Injektionsdübel, Tagungsbeitrag zur Fachtagung „Schalenbildung am Sandstein-Maßnahmen?“, Lenzburg (CH) 2005
- DIN 52008, Prüfverfahren für Naturstein - Beurteilung der Verwitterungsbeständigkeit, Beuth Verlag, 2006-03
- DIN 52100, Naturstein – Gesteinskundliche Untersuchungen – Allgemeines und Übersicht, Beuth Verlag, 2007-06
- WTA Merkblatt 3-4-90/D, Kenndatenermittlung und Qualitätssicherung bei der Restaurierung von Natursteinbauwerken. Endgültige Fassung: Juli 90, WTA-Publications, Pfaffenhofen/Ilm
- R. Snethlage / E. Wendler, Methoden der Steinkonservierung – Anforderungen und Bewertungskriterien, in Denkmalpflege und Naturwissenschaften – Natursteinkonservierung I, Verlag Ernst & Sohn 1995
- R. Snethlage, Leitfaden Natursteinkonservierung, Fraunhofer IRB Verlag 2008
- Verbundforschungsprojekt Steinzerfall und Steinkonservierung, Denkmalpflege und Naturwissenschaft I, Ernst & Sohn, Berlin 1995

- Verbundforschungsprojekt Steinzerfall und Steinkonservierung, Denkmalpflege und Naturwissenschaft II, Fraunhofer IRB verlag, Stuttgart 1998
- Verbundforschungsprojekt Steinzerfall und Steinkonservierung, Denkmalpflege und Naturwissenschaft IV, Fraunhofer IRB verlag, Stuttgart 1998
- Hammer, Taschenbuch der Physik, Lindauer Verlag München 2004

8.5. Index

E-Modul	41	Mineralumwandlung.....	31
„Chaosverbundkörper“	69	MMA.....	35
Absanden.....	24	Molasse	
Anböschungen.....	46	Molassesandsteine	5
Anforderungen	41	Mörtel.....	37
Anker.....	49	Sandstein	5
anorganisch	33	Oberflächen	44
Ausblühungen.....	24	organisch:	33
Berner Sandstein	23	Permeabilität.....	9
Bindemittel.....	34	PES.....	35
Bollinger Sandstein	23	Polymere.....	35
CEM.....	67	Porosität	10, 41
Dehnung.....	11, 89	Prüfkörper	60
Dilatation.....	87	Prüfverfahren.....	81
Druck.....	46	Rohdichte	89
Druck- und Biegezugfestigkeit.	90	Rorschacher Sandstein.....	5
Druckfestigkeit.....	41	Sandwich	60
EP.....	35	Sättigungsfeuchte	94
Festigkeit.....	90	Schadensformen	24
Feuchte.....	88	Schalen	24
Feuchtigkeitsaufnahme.....	10	Schuppen	24
Gesteinsprismen	58	Siliziumorganisch	35
Guntliweider Sandstein	22	Tiefenverfahren	47
Hinterfüllungen	46	Varietäten.....	21
Hydratation.....	38	Verbindung	55
Hygrisch	87	Verbindungen.....	50
Injektion	53	Verbundprüfkörper	58
Karbonatisierung	38	Verfärbungen	24
Komponenten	14	Verwitterung.....	12
Konsolidierungsmittel	33	Wasseraufnahme.....	96
KSE.....	37	Wassermasse.....	98
Kunstharz	35	Werkstein.....	19
Mineralien	13	Zement.....	34

8.6. **Sonstige Anlagen** (als Kopien)

8.7. Eidesstattliche Erklärung Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Sie wurde bei keiner anderen Prüfungskommission mit gleichem, Inhalt bzw. in wesentlichen Teilen vorgelegt.

Augsburg, den 30. September 2011

Gerhard A. Roth