

II PETROGRAFISCHE UND KONSERVATORISCHE ANALYSEN

II.1 DIE VERWENDETEN MARMORE

Das Ziel der Untersuchungen war eine Provenienzanalyse der Marmore, die in der Architektur des ›Hadrianstempels‹ an der Kuretenstraße Verwendung fanden. Damit sollte zum einen die Frage geklärt werden, ob ein Marmortyp oder mehrere verschiedene Marmore verwendet worden waren. Zum anderen ist für den Marmorhandel in Ephesos die Frage von Bedeutung, ob im beginnenden 2. Jahrhundert n. Chr. ausschließlich lokale Marmore zum Einsatz kamen oder ob eventuell Importmarmore (z. B. bei bestimmten Architekturteilen) zu finden sind.

Bei dem Bau des Tempels kamen für die bearbeiteten Architekturglieder ausschließlich weiße Marmore im engeren Sinn (d. h. metamorphe Karbonatgesteine) zum Einsatz. Im Folgenden werden die Marmorvorkommen in der Region Ephesos vorgestellt und anschließend mit den am Bauwerk verwendeten Marmortypen verglichen. Es wurde im Rahmen dieser Arbeit nahezu jeder einzelne Marmorblock des ›Hadrianstempels‹ beprobt und analysiert (Taf. 104–107).

II.1.1 Proben und Probennahme, Analyse

Für die Untersuchungen zur Bestimmung der mineralogischen und petrografischen Charakteristika der Marmore des Tempels und für die Provenienzanalyse dieser Gesteine wurden insgesamt 106 Proben von nicht sichtigen Stellen oder von Bruchflächen genommen¹¹⁸⁵. Die Proben und die analytischen Ergebnisse sind in Tabelle 1 aufgelistet. Von repräsentativen Proben aller Gruppen wurden Dünnschliffpräparate für die mikroskopischen und petrografischen Analysen angefertigt.

¹¹⁸⁵ Die Probe vom Relieffries des Pronaos stammt aus dem Nachlass von F. Miltner.

Tabelle 1: Verzeichnis der Marmorproben

Probennr.	Block Nr.	Gruppe	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	MgCO_3	Fe ppm	Mn ppm	Sr ppm
HTEMP 09-1	110S	1	-8,60	3,81	1,41	197	64	175
HTEMP 09-12	145T	1	-11,22	3,75	2,87	464	167	158
HTEMP 09-20	104T	1	-7,43	3,79	1,27	192	72	189
HTEMP 09-21	027S	1	-10,88	3,85	8,50	1601	191	128
HTEMP 09-37	111D	1	-11,22	3,76	1,45	380	134	177
HTEMP 09-52	052G	1	-7,42	4,12	11,13	1116	97	157
HTEMP 09-58	021K	1	-7,00	4,03	1,25	940	40	169
HTEMP 09-69	170T	1	-9,73	4,08	9,96	1079	190	112
HTEMP 09-2	012B	2	-1,43	3,63	1,86	331	75	187
HTEMP 09-3	011B	2	-1,69	3,03	1,34	269	32	167
HTEMP 09-22	022B	2	-1,81	3,45	4,24	407	66	173
HTEMP 09-23	023B	2	-1,15	3,59	1,66	395	53	186
HTEMP 09-25	015B	2	-1,09	2,93	1,21	181	59	134
HTEMP 09-49	051G	2	-0,86	4,07	1,57	298	69	134
HTEMP 09-65 ¹¹⁸⁶		2	-1,01	3,71	0,86	300	52	139
HTEMP 09-66	149P	2	-1,25	3,76	1,42	434	45	141
HTEMP 09-82	055G	2	-1,16	4,01	4,45	159	27	105
HTEMP 10-1	055G	2	-1,23	3,95	1,64	236	73	209
HTEMP 10-3	051G	2	-0,59	3,91	1,17	245	64	135
HTEMP 10-4	059O	2	-1,09	3,61	1,30	366	51	165
HTEMP 10-8	084O	2	-1,04	3,31	1,12	287	43	152
HTEMP 09-4	134P	3	-5,24	3,54	4,02	193	35	142
HTEMP 09-5	140P	3	-6,59	3,21	8,91	217	38	123
HTEMP 09-18	113B	3	-5,06	3,45	6,87	261	46	112
HTEMP 09-26	016B	3	-6,27	3,19	5,78	392	67	112
HTEMP 09-27	131P	3	-6,85	3,03	1,54	277	68	138
HTEMP 09-28	048G	3	-5,67	3,23	3,38	340	87	121
HTEMP 09-29	035AF	3	-5,75	3,02	1,14	276	68	122
HTEMP 09-31	049G	3	-5,38	2,26	2,84	157	57	189
HTEMP 09-32	047G	3	-5,78	2,01	4,69	222	37	68
HTEMP 09-36	032AF	3	-4,68	2,28	1,90	126	59	180
HTEMP 09-43	101F	3	-5,52	3,42	2,93	184	38	156
HTEMP 09-47	038AF	3	-6,67	3,88	5,80	290	76	67
HTEMP 09-53	041F	3	-5,68	2,63	3,77	420	146	106
HTEMP 09-55	028K	3	-5,60	3,75	14,14	229	45	85
HTEMP 09-57	025K	3	-6,37	3,40	3,90	320	72	97
HTEMP 09-61	107D	3	-6,14	3,13	43,05	938	130	48
HTEMP 09-67	097L	3	-6,33	2,94	13,16	305	42	105

¹¹⁸⁶ Innenraum, Fußleiste der Wandverkleidung in der Nordostecke.

Tabelle 1 (Fortsetzung): Verzeichnis der Marmorproben

Probennr.	Block Nr.	Gruppe	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	MgCO_3	Fe ppm	Mn ppm	Sr ppm
HTEMP 09-68	098D	3	-6,13	3,14	1,09	238	80	105
HTEMP 09-70	053G	3	-5,87	3,49	3,62	137	27	112
HTEMP 09-71	053G	3	-5,06	3,91	4,81	253	40	108
HTEMP 09-72	094G	3	-5,55	3,44	5,09	208	35	115
HTEMP 09-74	093D	3	-6,19	2,71	0,65	286	97	115
HTEMP 09-76	099D	3	-7,02	3,05	9,09	384	42	120
HTEMP 09-77	099D	3	-6,23	3,04	12,52	946	60	115
HTEMP 09-79	095L	3	-6,07	3,49	3,04	285	85	123
HTEMP 09-96	006I	3	-5,98	2,45	2,08	904	27	287
HTEMP 09-98	004I	3	-6,92	2,78	10,72	324	85	117
HTEMP 09-99	002I	3	-5,21	2,70	4,64	258	73	85
HTEMP 09-101	003I	3	-5,52	2,37	2,57	299	40	113
Relieffries	714R	3	-6,23	3,18	3,25	398	92	142
HTEMP 09-6	076T	4	-4,24	3,95	8,76	251	59	99
HTEMP 09-7	142P	4	-3,54	4,22	28,02	757	138	52
HTEMP 09-10	058O	4	-3,96	4,34	5,11	185	26	125
HTEMP 09-11	076T	4	-4,26	4,33	4,95	832	61	189
HTEMP 09-13	146T	4	-4,85	4,16	2,18	198	36	136
HTEMP 09-14	082T	4	-5,03	4,32	2,22	408	38	186
HTEMP 09-16	073M	4	-3,38	4,40	5,07	197	34	125
HTEMP 09-24	019B	4	-3,48	3,26	1,56	244	49	146
HTEMP 09-30	036AF	4	-4,02	4,41	4,16	214	32	135
HTEMP 09-33	034AF	4	-3,77	4,39	3,93	152	37	114
HTEMP 09-34	033AF	4	-3,82	4,66	2,47	218	34	140
HTEMP 09-35	046G	4	-3,15	4,49	2,72	174	29	127
HTEMP 09-38	045G	4	-5,22	4,33	1,53	146	34	141
HTEMP 09-39	031AF	4	-4,18	3,80	3,01	199	42	131
HTEMP 09-40	030F	4	-4,35	4,62	3,59	491	41	152
HTEMP 09-41	043G	4	-4,48	4,34	4,25	220	32	114
HTEMP 09-42	042G	4	-3,24	4,41	3,84	133	27	133
HTEMP 09-44	100A	4	-2,67	4,75	4,12	319	39	159
HTEMP 09-45	029A	4	-2,68	4,16	5,27	184	48	107
HTEMP 09-46	044G	4	-3,92	4,04	2,53	381	122	138
HTEMP 09-48	037AF	4	-2,92	4,43	2,84	156	34	119
HTEMP 09-50	050G	4	-3,73	4,42	4,93	131	35	116
HTEMP 09-51	112D	4	-3,14	4,46	5,68	964	39	143
HTEMP 09-54	040A	4	-4,16	4,61	18,32	1816	100	118
HTEMP 09-56	089A	4	-5,38	4,76	38,24	3000	270	73
HTEMP 09-59	018K	4	-5,31	4,52	3,12	437	35	140
HTEMP 09-60	014K	4	-4,96	3,83	1,69	110	27	127

Tabelle 1 (Fortsetzung): Verzeichnis der Marmorproben

Probennr.	Block Nr.	Gruppe	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	MgCO_3	Fe ppm	Mn ppm	Sr ppm
HTEMP 09-62 ¹¹⁸⁷		4	-3,99	4,44	11,21	252	40	102
HTEMP 09-63 ¹¹⁸⁸		4	-3,58	3,74	1,04	80	20	88
HTEMP 09-64	108/ 109D	4	-4,80	4,20	5,26	634	80	122
HTEMP 09-73	090F	4	-3,67	4,54	4,03	223	38	133
HTEMP 09-75	092A	4	-2,95	4,56	2,18	234	25	143
HTEMP 09-80	115D	4	-4,02	3,66	2,30	108	13	105
HTEMP 09-81	091A	4	-3,62	4,35	1,47	265	72	227
HTEMP 09-83	054G	4	-4,43	4,34	2,49	109	25	116
HTEMP 09-84	056G	4	-3,27	4,45	3,15	100	20	107
HTEMP 09-85	057G	4	-3,13	4,53	8,05	622	60	110
HTEMP 09-87	106F	4	-3,34	4,26	7,20	390	38	103
HTEMP 09-88	114G	4	-3,41	4,33	1,27	98	20	116
HTEMP 09-89	121A	4	-4,65	4,12	7,82	184	27	95
HTEMP 09-90	122A	4	-3,68	4,29	2,70	100	23	100
HTEMP 09-91	123A	4	-2,70	4,09	1,91	118	28	108
HTEMP 09-92	010I	4	-3,97	4,06	2,87	181	35	113
HTEMP 09-93	009I	4	-4,67	4,11	3,15	159	27	127
HTEMP 09-94	008I	4	-4,54	4,18	6,26	210	45	73
HTEMP 10-5	063O	4	-1,80	4,72	2,97	410	28	159
HTEMP 10-7	144P	4	-4,14	4,31	2,58	173	30	139
HTEMP 09-8	143P	5	-2,96	0,43	0,59	54	24	86
HTEMP 09-9	070M	5	-3,07	0,36	0,49	302	25	83
HTEMP 09-15	072M	5	-2,91	0,23	0,55	317	24	73
HTEMP 09-17	065O	5	-3,57	-1,43	4,22	98	25	61
HTEMP 09-78	096L	6	-7,26	2,11	2,65	190	68	165
HTEMP 09-86	105D	6	-8,40	2,02	2,98	319	45	115
HTEMP 09-97	005I	6	-7,84	1,37	1,56	130	27	411
HTEMP 09-100	001I	6	-7,73	1,14	1,65	703	113	113

Für die weitere Analyse war es notwendig, die verwitterten Oberflächen an den Proben zu entfernen und diese anschließend etwa eine Woche lang mit destilliertem Wasser zu spülen. Die getrockneten Proben wurden für die Isotopenanalyse und für die Analyse der Spurenelemente im Achatmörser analysenfein gemahlen.

Alle Untersuchungen einschließlich der Isotopenanalysen erfolgten am Department Angewandte Geowissenschaften und Geophysik der Montanuniversität Leoben. Für die Analyse der Zusammensetzung der stabilen Isotope von Kohlen- und Sauerstoff wurde ein ThermoFisher DELTA-V-Massenspektrometer (ThermoFisher, Bremen, Germany) mit einer Online-Verbindung zu einer ThermoFisher GasBench II und einem CTC-Combi-Pal-Probengeber (bzw. Aufschluss-

¹¹⁸⁷ Steinsetzung im Gebäudeinneren, vordere Reihe, zweiter Block von Westen.

¹¹⁸⁸ Steinsetzung im Inneren, vordere Reihe, östlichster Stein, der in die Sondage hineinreicht.

einheit) verwendet. Für den Aufschluss der fein gemahlenen Proben (ca. 0,2 mg) wurde H_3PO_4 conc. in einer He-gefluteten Atmosphäre bei einer Temperatur von 70°C verwendet. Die Ergebnisse werden relativ zum PDB-Standard in der üblichen δ -Angabe ($\delta^{13}\text{C}$ und $\delta^{18}\text{O}$) wiedergegeben. Die Langzeitpräzision beträgt 0,06 ‰ für Sauerstoff und 0,05 ‰ für Kohlenstoff.

II.1.2 Die petrografische Beschreibung der untersuchten Marmore

Wie in dem Abschnitt über die Isotopenzusammensetzung der Marmore zu sehen ist (s. u.), streut die Zusammensetzung der Werte sehr stark über einen weiten Bereich des Isotopendiagramms. Es werden in der Folge die petrografischen Eigenschaften der beiden wichtigsten Gruppen der ephesischen Marmore wiedergegeben und weiters die mikroskopischen Charakteristika der Marmore des Tempels erläutert.

Eine Clusteranalyse der Ergebnisse der Isotopenuntersuchungen (Taf. 108, 2) weist sechs unterschiedliche Gruppen von Marmoren auf, die aber jeweils nicht einem bestimmten Steinbruch zuzuordnen sind. Es wird in der Folge eine petrografische Dünnschliffanalyse der Marmore dieser Gruppen gegeben, wobei aber, wie erwähnt, eine scharfe Abgrenzung nicht möglich ist. Zwei Einzelproben werden in der Folge nicht weiter behandelt: Die Probe HTEMP 09-95 stammt von einer Statuenbasis für Diocletian (**0071** Taf. 218, 2; 220) vor dem Tempel, sie besteht aus prokonnesischem Marmor. Eine weitere ›Ausreißerprobe‹ (HTEMP 10-9) von der Orthostatenplatte **0830** (Taf. 105 über Probe 10-8, ohne Farbcodierung) kann keiner Gruppe zugeordnet werden.

II.1.2.1 DIE MARMORVORKOMMEN DER REGION EPHEOS

In der Region Ephesos sind zahlreiche antike Marmorsteinbrüche zu finden, die schon seit archaischer Zeit genutzt wurden (Taf. 108, 1). Es gibt derzeit noch keine sicheren Informationen über die Nutzungszeiträume dieser Steinbrüche. Nach der von Vitruv überlieferten Legende seien die Marmorvorkommen von Belevi (heute noch gut sichtbare Steinbrüche im Tal des Kaystros – heute Küçük Menderes – gegenüber des Mausoleums von Belevi) von dem Schafhirten Pixodaros durch Zufall entdeckt und für den Bau des archaischen Artemisions verwendet worden¹¹⁸⁹. Eine umfangreiche Datenbasis für stabile Isotope der Marmore im Bereich von Ephesos und auch die Beschreibung der geologischen Situation wurden 2009 und 2010 publiziert¹¹⁹⁰.

Aufgrund isotonenchemischer Untersuchungen konnten schon sehr früh verschiedene Typen ephesischer Weißmarmore unterschieden werden. Manfra u. a.¹¹⁹¹ waren die ersten Autoren die zwei Hauptgruppen ephesischer Marmore unterschieden, was später von Herz bestätigt wurde¹¹⁹². Nach den aktuellen Untersuchungen lässt sich möglicherweise noch eine dritte Gruppe abgrenzen, deren Marmore wahrscheinlich vom Gemi Tepe kommen, einer Lokalität nahe Pamucak. Ein weißer Marmor mit schwarzen Sprenkeln (›Greco Scritto‹), der in mehreren großen Steinbrüchen bei Ephesos gewonnen wurde, wird in diesen Ausführungen ebenfalls als eigene Gruppe berücksichtigt und im Isotopendiagramm als Bereich dargestellt, obwohl dieser Marmortyp an dem ›Hadrianstempel‹ nicht gefunden wurde.

II.1.2.1.1 Die Marmore vom Typ Ephesos I

Die meisten Steinbrüche in der Region von Ephesos können der Gruppe Ephesos I (Taf. 108, 2) zugeordnet werden. Die wichtigsten sind die Brüche von Ketli Çiftlik und Ahmetli Köyü. Weiters

¹¹⁸⁹ Vitr. 10, 2, 15.

¹¹⁹⁰ Yavuz – Bruno – Attanasio 2011; Prochaska – Grillo 2010.

¹¹⁹¹ Manfra u. a. 1975, 215–221.

¹¹⁹² Die Gruppe mit der leichten C-Isotopenzusammensetzung wurde von Herz 1987 als ›Ephesos I‹ bezeichnet, jene mit C-Isotopenwerten um 0 ‰ $\delta^{13}\text{C}$ als ›Ephesos II‹. Diese Bezeichnung wurde auch in dieser Arbeit beibehalten.

gibt es bei der Ortschaft Hasançavuşlar, etwa 20 km nordöstlich des Artemisions, eine Reihe z. T. sehr großer Steinbrüche, die neben weißen Marmoren sehr guter Qualität bedeutende Mengen eines weißen Marmors mit schwarzen Sprenkeln lieferten, der als ›Greco Scritto‹¹¹⁹³ bekannt ist. Die rein weißen Marmore dieser Steinbrüche gehören entsprechend ihrer isotopischen Zusammensetzung ebenfalls zu der Gruppe Ephesos I.

Die Marmore der Steinbrüche Urfalıdağı Tepe und Göllüce zeichnen sich ebenfalls durch relativ leichte C-Isotopenzusammensetzung aus, die O-Isotope zeigen aber generell eine größere Streuung, besonders zu leichteren Verhältnissen. Diese beiden Steinbrüche führen auch Marmore mit schwankenden, aber allgemein höheren Dolomitgehalten. Generell sind die Marmore vom Typ ›Ephesos I‹ und ›Ephesos Ia‹ immer durch das Auftreten von länglichen Aggregaten kleiner Dolomitekristalle ausgezeichnet. Für diese Arbeit wurden die Marmore dieser beiden Steinbrüche von der Gruppe Ephesos I abgetrennt und als eigene Gruppe Ephesos Ia ausgewiesen.

II.1.2.1.2 Die Marmore vom Typ Ephesos II

Nach dem bisherigen Kenntnisstand tritt dieser Marmortyp in den Brüchen von Belevi und Kuşini auf sowie in einem kleineren Steinbruch in der Nähe der Ortschaft Sağlık. Von diesen Brüchen stehen umfangreiches Probenmaterial und entsprechende Analysen in Form einer Datenbank zur Verfügung.

Mit freiem Auge sind diese Marmore nicht leicht von den Marmoren des Typs Ephesos I zu unterscheiden. Allgemein sind die oben beschriebenen kleinen Dolomitekristalle, die für den Marmor Ephesos I typisch sind, hier nur sehr selten zu finden. Die Texturen dieses Marmortyps sind, je nach Steinbruch, sehr unterschiedlich: Bei dem Steinbruch Kuşini herrschen Mörteltexturen vor, während die Belevi-Marmore annähernd gleichkörnig (homöoblastisch) sind. Die Marmore von Sağlık weisen z. T. sehr große Kalzitkristalle auf (MGS [maximum grain size] bis 4,5 mm).

Die Brüche von Belevi liegen etwa 2 km nordnordwestlich der Ortschaft Belevi. Man geht davon aus, dass es sich dabei um die Brüche handelt, von denen bereits Vitruv 10, 2, 15 berichtete¹¹⁹⁴. Die Marmore von Belevi sind unter dem Mikroskop durch ein gleichkörniges, homöoblastisches Gefüge gekennzeichnet. Eine gewisse Auslängung der Kalzitkristalle deutet eine schwache Schieferung an. Eine Deformation des Gefüges wird auch durch die gebogenen Zwillingslamellen der Kalzitkristalle dokumentiert. Die maximale Korngröße der ausgelängten Kalzitkristalle beträgt ca. 1,7 mm. Die Korngrenzen sind im Gegensatz zu den Marmoren von Kuşini immer gerade und nicht verzahnt.

Wie erwähnt, sind die Marmore des untertägigen Steinbruchs von Kuşini generell heteroblastisch und weisen Mörteltextur auf. Hauptmineral ist Kalzit, dessen Zwillingslamellen teilweise leicht deformiert und regellos orientiert sind. Große Blasten mit unregelmäßigen, verzahnten Korngrenzen und ein Grundgewebe aus kleinen, unregelmäßigen Kalzitkörnern definieren die typische Mörteltextur. Die maximale Korngröße beträgt etwa 2–2,5 mm.

II.1.2.1.3 Weitere ephesische Marmore

Wie oben erwähnt, sind bei der Ortschaft Hasançavuşlar etwa 20 km nordöstlich von Ephesos einige Steinbrüche eines gesprenkelten Marmors (›Greco Scritto‹) zu finden. Im Isotopendiagramm ist das entsprechende Feld wiedergegeben, allerdings haben diese Marmore für die Architektur des ›Hadrianstempels‹ keine Bedeutung.

¹¹⁹³ Dieser charakteristische Marmortyp wurde jüngst von Yavuz – Bruno – Attanasio 2011 beschrieben.

¹¹⁹⁴ s. o.; Alzinger 1979, 167.

II.1.2.2 DIE MARMORE DES ›HADRIANSTEMPELS‹

Die am ›Hadrianstempel‹ entnommenen Marmorproben konnten durch mikroskopische und chemische Analysen sowie mithilfe der Isotopenuntersuchung in sechs Gruppen unterschieden werden. Zunächst wird in der Folge das mikroskopische Gefüge von Marmoren dieser Gruppen beschrieben. Es kann dabei nicht auf die Variationsbreite der Marmore innerhalb der Gruppen eingegangen werden. Wenn das Gefüge typisch für einen bestimmten Steinbruch oder einer Steinbruchgruppe ist, wird besonders darauf hingewiesen.

II.1.2.2.1 Gruppe 1

Generell herrscht bei den Marmoren dieser Gruppe ein gleichkörniges, granoblastisches Gefüge vor (Taf. 109). Meist handelt es sich um Kalzitmarmore, allerdings sind bei den Proben mit den höheren Mg-Gehalten auch immer wieder kleine Dolomitblasten zu sehen. Die Korngrenzen sind meist glatt und nicht verzahnt. Diese Textur kann durch den Einfluss von Oberflächenverwitterung zu einer Lockerung des Gefüges führen (Kristallzuckerkorrosion), wie etwa bei der Probe HTEMP 0920 zu sehen ist. Neben Kalzit oder Dolomit tritt hier akzessorisch Glimmer auf (z. B. Probe HTEMP 09-58). Die maximale Korngröße (MGS) dieser Marmore liegt bei ca. 2 mm.

II.1.2.2.2 Gruppe 2

Bei diesen Marmoren handelt es sich um Kalzitmarmore, die immer eine gewisse Deformation aufweisen (Taf. 110). Dieser im Allgemeinen weiße Marmor weist gelegentlich bräunliche Verunreinigungen auf und ist somit nicht von bester Qualität. Das Gefüge ist relativ gleichkörnig, allerdings kann bei starker Deformation eine deutliche Mörteltextur entstehen. Es ist fast immer eine deutliche Einregelung des Gefüges zu sehen. Die Marmore sind grobkörnig, die MGS kann bis zu 4 mm betragen.

II.1.2.2.3 Gruppe 3

Das Gefüge dieser Marmore ist ausgesprochen heteroblastisch (Taf. 110). Das mikroskopische Bild wird von Kalzitkristallen dominiert, die untereinander mäßig verzahnt sind. Das wichtigste Merkmal der Textur ist, dass immer Lagen, Linsen oder unregelmäßige Aggregate feinkörniger Dolomitkristalle in einer Matrix von unterschiedlich großen Kalzitkristallen vorhanden sind.

II.1.2.2.4 Gruppe 4

Die Marmore der Gruppe 4 sind mikroskopisch nicht von denen der Gruppe 3 zu unterscheiden und sind typische Ephesos-I-Marmore (Taf. 111). Auch hier findet man immer einen gewissen Anteil kleiner Dolomitblasten im Kalzitgefüge.

II.1.2.2.5 Gruppe 5

Es handelt sich um Kalzitmarmor mit heteroblastischem Gefüge (Taf. 112). Die Kalzitkristalle weisen nur mäßig verzahnte Korngrenzen auf, wie sie für Marmore des Typs Ephesos II charakteristisch sind.

II.1.2.2.6 Gruppe 6

Der Marmor dieser Gruppe zeigt keine Anzeichen einer syn- oder posttektonischen Beanspruchung (Taf. 112). Die Kalzitkristalle weisen keine Deformation und gerade Korngrenzen mit 120°-Winkeln auf, was einer Rekristallisation im Gleichgewicht entspricht.

II.1.2.2.7 Die chemische Zusammensetzung

Etwa 0,2 g von analysenfein gemahlenem Probenpulver werden mit 5 ml HNO_3 aufgelöst und mittels Cs-La-Pufferlösung auf 50 ml aliquotiert. Aus dieser Lösung werden nach der entsprechenden Verdünnung die zu bestimmenden Elemente mittels Atomabsorptionsspektroskopie (AAS) analysiert. Gemessen werden die Gehalte an Mg, Sr, Mn, Fe und Zn, weil diese Elemente an die Karbonatphase gebunden und im Kristallgitter eingebaut sind und daher deutlich geringere Schwankungen aufweisen als solche Elemente, die an Spurenminerale gebunden sind und infolgedessen üblicherweise inhomogen im Gestein verteilt vorkommen. Die Ergebnisse der Untersuchungen der stabilen Isotope sind in Tabelle 1 wiedergegeben.

Die Proben der Gruppe 1 weisen erhöhte Gehalte an Spurenelementen und stark schwankende Mg-Gehalte (unterschiedlicher Dolomitanteil) auf, wie sie für die Marmore vom Typ Ephesos Ia typisch sind. Die Gruppen 2, 3, 4 und 6 zeigen sehr ähnliche Spurenelementgehalte und sind auf dieser Basis nicht zu unterscheiden. Die niedrigen Mn- und Sr-Gehalte der Gruppe 5 sind für Marmore des Typs Ephesos II charakteristisch.

II.1.2.2.8 Die isotopische Zusammensetzung

Die Ergebnisse der Untersuchungen der stabilen Isotope wurden in Tabelle 1 zusammengestellt. Im Isotopendiagramm ist zum Vergleich die Zusammensetzung der verschiedenen ephesischen Marmore wiedergegeben (Taf. 108, 2), anhand dessen ist eine relativ große Streuung der Werte über einen weiten Bereich der ephesischen Marmore zu sehen¹¹⁹⁵. Mithilfe der Clusteranalyse können sechs Marmorgruppen unterschieden werden, wobei sich die einzelnen Gruppen allerdings überlappen. Diese statistische ermittelte Gruppenbildung muss natürlich nicht zwingend mit einer bestimmten Herkunft der Marmore dieser Gruppen aus einem bestimmten Steinbruch übereinstimmen.

Der Großteil der Proben (die Gruppen 1, 3, 4 und 6) liegt im Bereich der Marmore vom Typ Ephesos I oder Ephesos Ia. Diese beiden Gruppen sind petrografisch nicht sicher zu unterscheiden, die Marmore der Gruppe Ephesos Ia sind im Allgemeinen stärker silikatisch verunreinigt und weisen auch höhere Gehalte an Spurenelementen auf. Aufgrund der relativ großen Streuung der Proben Ephesos I fallen einige Proben im Isotopendiagramm in den Bereich des kleineren Steinbruchs von Tavşantepe, wenige 100 m südöstlich von Selçuk. Diese Proben sind der Gruppe 3 zuzurechnen.

Die Marmore der Gruppe 5 setzen sich von den restlichen Proben deutlich ab. Sie zeichnen sich durch relativ leichte $\delta^{13}\text{C}$ -Werte um ca. 0 ‰ und durch niedrige Sr-Gehalte aus. Damit sind diese Proben eindeutig den Ephesos-II-Marmoren zuzuordnen.

II.1.3 Diskussion der Ergebnisse

Ein wesentliches Ergebnis der Provenienzuntersuchungen der Marmore des ›Hadrianstempels‹ ist, dass nahezu ausschließlich Marmore ephesischer Herkunft für den Bau verwendet wurden. Die relativ starke Streuung der Isotopendaten zeigt deutlich, dass das Baumaterial nicht nur aus einem Steinbruch stammt, sondern ganz offensichtlich aus einer Reihe verschiedener Steinbrüche kommt.

Die meisten Marmorblöcke des Tempels stammen aus ephesischen Brüchen, vornehmlich aus jenen Brüchen, die Marmor vom Typ Ephesos I abbauen.

Die fünf Proben der Gruppe 5 liegen im Bereich der Ephesos-II-Marmore und stammen daher mit großer Wahrscheinlichkeit vom untertägigen Steinbruch Kuşini. Die Isotopenzusammenset-

¹¹⁹⁵ Die Vergleichsdaten stammen aus unserer unveröffentlichten Datenbank mit ca. 1 700 Steinbruchproben aus den klassischen antiken Marmorlagerstätten. Davon stammen etwa 200 Steinbruchproben aus dem Bereich von Ephesos.

zung würde auch eine Herkunft aus dem Steinbruch Belevi plausibel erscheinen lassen, allerdings dürfte dieser Steinbruch im 2. Jahrhundert n. Chr. nicht mehr im Betrieb gewesen sein, zumal an der Steinbruchwand karische Inschriften zu finden sind, deren Existenz eine umfangreiche Steinbruchnutzung nach Anbringung dieser Inschriften wohl ausschließt¹¹⁹⁶.

Eine weitere Möglichkeit wäre die Verwendung gänzlich umgearbeiteter Marmorbauteile aus einem oder mehreren Vorgängerbauten aus diesem Marmortyp (z. B. vom spätarchaischen Artemision¹¹⁹⁷).

Die Architekturteile der Marmorgruppe 2 bilden eine geschlossene Gruppe, die sich von den restlichen Proben absetzt und außerhalb der üblichen Zusammensetzung der bekannten ephesischen Marmore liegt. Dabei könnte es sich um Marmore eines bisher nicht bekannten ephesischen Steinbruchs handeln. Von den Marmoren der bekannten antiken Steinbrüche liegen jedenfalls nur die Kalzitmarmore der Insel Thasos in diesem Bereich der Isotopenzusammensetzung. Die Frage, ob die Marmore dieses Typs frühe Importe aus Thasos sind oder von einem noch nicht bekannten ephesischen Steinbruch stammen, muss zur Zeit noch offenbleiben.

Es ist bemerkenswert, dass sich bei der großen Zahl der untersuchten Architekturproben des Tempels keine einzige Probe prokonnesischen Marmors fand, mit Ausnahme der wesentlich später hinzugefügten Statuenbasis für Diocletian (**0071**) vor dem Tempel. Bei ephesischer Architektur des 2. Jahrhunderts n. Chr. sind sehr häufig Bauteile aus prokonnesischem Marmor zu finden, so z. B. bei dem Ostgymnasium, den Hafenthermen und in großem Ausmaß dem Serapeion. An Architektur aus hellenistischer Zeit wurde bis dato kein prokonnesischer Marmor gefunden. Nach Attanasio u. a. 2008 erfolgte der Beginn der Massenproduktion in den Steinbrüchen der Marmara-Insel etwa zu flavischer Zeit. Für den Bau des ›Hadrianstempels‹ wurden also keine neuen Bauteile aus dem damaligen überregionalem Handel bezogen.

Die verwendeten Marmore sprechen jedenfalls für eine gut entwickelte, autarke ephesische Marmorindustrie zumindest bis zu Beginn des 2. Jahrhunderts n. Chr. Von großer Bedeutung ist auch die Tatsache, dass die Verwendung der einzelnen Gruppen ephesischer Marmore ganz offensichtlich keiner Ordnung folgt und völlig irregulär auftritt (Taf. 104–108). Die verwendeten Marmore wurden also nicht aus einem einzigen Steinbruch für ein bestimmtes, komplettes Projekt geliefert. Auch sind gleichartige Bauteile nicht bestimmten Marmorgruppen zuzuordnen, sondern es scheint keine Bevorzugung eines bestimmten Marmortyps für spezielle Bauteile vorzuliegen. Wie schon oben erwähnt, ist es daher naheliegend, dass für den Bau Spolien, größere Bauteile oder gelagerte Blöcke eventuell verschiedener Vorgängerbauten verwendet worden waren, die dann für den Bau des ›Hadrianstempels‹ völlig neu gearbeitet wurden. Diese Tatsache wird auch als starker Hinweis dafür gewertet, dass es sich bei dem ›Hadrianstempel‹ um keinen Prestigebau höchster Priorität handelte, da man in einem derartigen Fall sicher von der Verwendung und Beschaffung von neuem Marmor aus einem Steinbruch im Rahmen eines einheitlich geplanten Projekts ausgehen müsste.

Walter Prochaska

¹¹⁹⁶ Dazu Alzinger 1966/1967, 61–73.

¹¹⁹⁷ Nach Kerschner – Prochaska 2011 wurde der spätarchaische ›Kroisostempel‹ aus Belevi-Marmor erbaut, bei dem spätklassischen Dipteros kamen Ephesos-I-Marmore zum Einsatz.

II.2 RESTAURATORISCHE UND KONSERVATORISCHE BESTANDS- UND ZUSTANDSERFASSUNG

II.2.1 Einleitung

Die restauratorische und konservatorische Bestands- und Zustandserfassung des ›Hadrianstempels‹ in Ephesos war ein Teilbereich des vom FWF finanzierten und von 2009–2012 durchgeführten Forschungsvorhabens¹¹⁹⁸.

Die Aufgabe des Verfassers als Restaurator bestand aus zweierlei Aspekten. Erstens galt es, die heutige Form des ›Hadrianstempels‹, welche maßgeblich durch die restauratorische Maßnahme einer Anastylose der Jahre 1957/1958 bestimmt ist, aufzuschlüsseln. Schwerpunkte dieses ersten Teils sind die Bestandserfassung, die Analyse der technischen Ausführung und der denkmalpflegerischen Grundgedanken der Anastylose. Hierfür wurde die vorhandene schriftliche und fotografische Dokumentation ausgewertet und die Bausubstanz vor Ort studiert.

Der zweite Aspekt umfasste die Beurteilung des Erhaltungszustands des Bauwerks. An der mittlerweile über 50 Jahre alten Anastylose waren seither keine nennenswerten Erhaltungs- und Pflegemaßnahmen vorgenommen worden. Dementsprechend fand sich ein reiches Spektrum an Schadensbildern, das sich sowohl auf den vorhandenen historischen Bestand als auch auf die eingebrachten modernen Materialien der Anastylose erstreckte.

II.2.2 Untersuchungskonzept – Methode

Die Herangehensweise an die Aufgabenstellung entspricht einem klassischen Zugang der Konservierungswissenschaften. Es wird hierbei zuerst eine Objektbeschreibung vorgenommen und eine Bestandsaufnahme sämtlicher vorzufindender Materialien durchgeführt. Anschließend erfolgt die systematische Erfassung der Schadensbilder mit einer Rückführung derselben auf ihre Ursache. Den Abschluss bildet die Qualifizierung und Quantifizierung der Schäden, welche eine fundierte Beurteilung des Erhaltungszustands erlauben.

Einen eindeutigen thematischen Schwerpunkt bildete im Rahmen der Untersuchung die Erhaltung der Materialien Marmor und Beton, aus welchen beinahe die gesamte Substanz des Bauwerks besteht.

Für die Beantwortung der gesetzten Ziele – Bestandserfassung, Schadenaufnahme, Zustandsanalyse, Beurteilung der Anastylose – wurde ein multipler Zugang gewählt. Dieser umfasste die Auswertung schriftlicher Quellen und Archivmaterialien, eine Untersuchung vor Ort sowie eine Analyse von Probenmaterial im Labor¹¹⁹⁹.

Die Literaturrecherche diente vor allem der Orientierung im Bestand und der Rekonstruktion der bei den Ausgrabung 1956 und der Anastylose 1957/1958 erfolgten Arbeiten. Wesentliche Quellen hierzu sind die Einträge im Grabungstagebuch, dokumentarische Aufnahmen des ÖAI-Fotoarchivs und Publikationen der mit den Arbeiten betraut gewesenen Personen¹²⁰⁰.

¹¹⁹⁸ s. U. Quatember in der Einleitung. Zu den durchgeführten Konservierungs- und Restaurierungsarbeiten s. Wissenschaftlicher Jahresbericht des Österreichischen Archäologischen Instituts 2011, 38–40; Wissenschaftlicher Jahresbericht des Österreichischen Archäologischen Instituts 2013, 30; Wissenschaftlicher Jahresbericht des Österreichischen Archäologischen Instituts 2014, 37–41 <<https://www.oeaw.ac.at/oeai/kommunikation/jahresberichte>> (22. 9. 2017).

¹¹⁹⁹ Mein ausdrücklicher Dank gilt hierbei sämtlichen Spezialistinnen und Spezialisten, welche das naturwissenschaftliche Untersuchungsprogramm begleiteten und jederzeit für Diskussionen zur Verfügung standen: Prof. Dr. Johannes Weber (Institut für Kunst und Technologie, Universität für angewandte Kunst Wien) leitete die mikroskopische Untersuchung (Stereo-, Polarisations- und Rasterelektronenmikroskopie). Karol Bayer (Fakultät für Restaurierung, Universität Pardubice) führte die Infrarot (IR)-Spektroskopie durch. Die Röntgendiffraktometrie (XRD) erfolgte durch Dr. Erich Halwax (Institut für Chemische Technologien und Analytik, TU Wien). Die Untersuchung der entnommenen Betonkerne wurde am Institut für Ingenieursgeologie, TU Wien, unter Prof. Dr. Andreas Rohatsch durchgeführt. Die Interpretation des biogenen Bewuchses begleitete Prof. Dr. Katja Sterflinger (Institut für Angewandte Mikrobiologie, Universität für Bodenkultur Wien).

¹²⁰⁰ s. dazu Miltner 1958b; Miltner 1959a; Miltner 1959d.

Die Aufgabe der Untersuchungstätigkeit vor Ort bestand in der Aufnahme des Bestands und des Erhaltungszustands des ›Hadrianstempels‹. Es wurde entschieden, diese in Form einer grafischen Kartierung vorzunehmen (Taf. 113–161)¹²⁰¹. Dieses Verfahren hat sich im Rahmen der Denkmalpflege und Bauwerksdiagnostik etabliert und liefert flächendeckende übersichtliche Darstellungen der vorgefundenen Situation¹²⁰². Begleitet wurde die Kartierungstätigkeit durch zerstörungsfreie bzw. zerstörungsarme technische Prüfmethoden. Zum Einsatz kamen hierbei z. B. ein Ultraschallmessgerät, das ›Karsten'sche Prüfröhrchen‹ und der ›Schmidt-Hammer‹ (Taf. 163, 1–3).

Für die exakte Definition der vorhandenen Materialien sowie zur detaillierten Untersuchung der einzelnen Schadensbilder kamen naturwissenschaftliche Untersuchungen im Labor zur Anwendung. Diese erfolgten an insgesamt 33 Proben des ›Hadrianstempels‹. Das Untersuchungsprogramm umfasste Mikroskopie, Rasterelektronenmikroskopie (REM), Infrarot-Spektroskopie, Röntgendiffraktometrie sowie mechanische Prüfverfahren¹²⁰³.

Die angewandten Untersuchungsmethoden vor Ort und im Labor sollen an dieser Stelle kurz vorgestellt werden.

II.2.2.1 KARTIERUNG

Für die Kartierung des ›Hadrianstempels‹ kam das Programm Metigo Map 3.0 der Fokus GmbH Leipzig zur Anwendung. Die Software ist speziell für den Einsatz in der Denkmalpflege konzipiert und vereint Funktionen von Bildbearbeitungs- und Zeichenprogrammen für Architektinnen und Architekten.

Als Kartierungsgrundlagen dienten maßstabsgetreue Ansichten, die auf den von Robert Kalasek angefertigten Laserscans des Tempels beruhen (Taf. 162)¹²⁰⁴. Die maßstabsgetreuen Ansichten des Scans wurden mit entzerrten Fotografien überlagert, da eine Fotografie gegenüber dem Scan den Vorteil hat, dass neben dem Oberflächenrelief auch die optische Erscheinung wiedergegeben wird. Dies hat im Sinne der konservatorischen und restauratorischen Zustandserfassung besondere Bedeutung, zumal sich viele Materialien und Schadensbilder durch ihre optische Erscheinung von ihrer Umgebung abheben.

Der zweite vorbereitende Arbeitsschritt noch vor der Umsetzung der eigentlichen Kartierungstätigkeit bestand in der Definition der verschiedenen Kartierungsklassen. Zu diesem Zweck wurde ein ausführlicher Bestands- und Schadenskatalog angelegt. Darin enthalten sind eine Charakterisierung sowie die Interpretation sämtlicher vorgefundener Materialien und Schadensbilder. In die Kartierung wurden nur jene Gruppen des Bestands- und Schadenskatalogs übertragen, die eine besondere Bedeutung für die Zustandsbeschreibung aufwiesen (Tab. 2).

Insgesamt wurden 35 Bestandsklassen, 24 Schadensklassen und 9 Klassen zur Dokumentation der naturwissenschaftlichen Untersuchungen kartiert. Da das umfangreiche Programm aus zeitlichen und finanziellen Gründen nicht an allen Oberflächen durchgeführt werden konnte, musste eine Auswahl getroffen werden. Der Schwerpunkt wurde auf die aufsteigende Architektur gelegt, während die Mauerkrone und der Boden ausgespart blieben.

¹²⁰¹ Die Arbeiten erfolgten im Rahmen eines einmonatigen Aufenthalts im September 2010.

¹²⁰² s. dazu Eckstein 2003; Fitzner-Kownatzki 1989.

¹²⁰³ s. Kap. II.2.1 Im Folgenden wird mit der Angabe der Probennummer HTEMP 1–28 bzw. HTEMP K1–K5 auf die ausführlichen Analyseprotokolle sowie die dort enthaltenen Abbildungen verwiesen.

¹²⁰⁴ s. Kap. I.3.

Tabelle 2: Auflistung der Kartierungsklassen

	Gruppe	Klassen
Bestand	Systematik	Werkstein Nummerierung
		Fugenschnitt
		Bemaßung
		Gesteinsschichtung
	Marmor	Gruppe 1: Ephesos Ia
		Gruppe 2: unbekannter Steinbruch von Thasos
		Gruppe 3: Ephesos I (Tavşantepe)
		Gruppe 4: Ephesos I
		Gruppe 5: Ephesos II
		Gruppe 6: Greco scritto
		Prokonnessos
		Marmor unbestimmt
	Bruchsteinmauerwerk	Typ Marmor dunkel
		Typ Marmor hell
		Schiefer
		Ziegel
		Kalkstein
		Serpentinit
		Sintergestein
		Spolien
	Beton	Schalung <i>in situ</i>
		Schalung Werkstatt
		Abformung
Bestand	Metalle	Betonbewehrung
		Steinverbindung Miltner
		Steinverbindung antik
	Mörtel	Mauermörtel antik
		Hinterfüllmörtel antik
		Restauriermörtel Miltner
		Mauermörtel Miltner
		Mörtel Beleuchtung
	diverse Werkstoffe	Polyester
		Holz
		Lampen
		Kabel
Naturwissenschaften	Probenentnahme	Probenentnahmestelle
	Ultraschall	Ultraschallmessung
		Ultraschallmesspunkt
		US Zustand 1
		US Zustand 2
		US Zustand 3
	Wasseraufnahme	›Karsten'sches Prüfröhrchen‹
	Betonfestigkeit	›Schmidt-Hammer‹
	Salznachweis	Salztest

Zustand	Verlust	Ausbrüche / Fehlstellen
		Oberflächenverlust 2
		Oberflächenverlust 3
		Abplatzung Beton
		Auswaschung Beton
		Offene Fuge
	biogene Besiedlung	höhere Pflanzen
		Mikrobiologie
		Erde
	Krusten	Kruste: rezent
		Kruste: historisch
	Risse	Einzelriss
		gesteinsimmanent
		verklebt
		Betonriss
		Trennschicht Beton
	Entfestigung	schadhafter Kunststoff
		schadhafte Ergänzung
		Schollenbildung
	Verschmutzung	Klebe- und Mörtelreste
		Handschweiß
		Kaugummi
		Eisenverfärbung
	Schadssalze	Schadssalze

Fortsetzung Tabelle 2

Der definierte Bestands- und Schadenskatalog findet sich in den Kapiteln II.2.3 und II.2.4 integriert (Taf. 113–161)¹²⁰⁵. Ebenfalls dort werden sowohl die Definitionen der jeweiligen Klassen als auch die auf der Kartierung basierenden Ergebnisse, wie z. B. Angaben zum Schadensausmaß, behandelt.

II.2.2.2 NATURWISSENSCHAFTLICHE PRÜFVERFAHREN – IN SITU

Die angewandten naturwissenschaftlichen Untersuchungsmethoden haben sich bereits in der Vergangenheit als Verfahren der Bauwerksdiagnostik bewährt¹²⁰⁶. Sie dienen der Erfassung material- und verwitterungsrelevanter Parameter der Baustoffe und ermöglichen eine naturwissenschaftlich fundierte Beurteilung des Schadensausmaßes. Die gewählten Methoden sind als zerstörungsarm oder sogar als zerstörungsfrei einzustufen und relativ einfach vor Ort durchführbar.

Überprüft wurden die Laufzeit von Ultraschall, die Wasseraufnahme mit dem ›Karsten'schen Prüfröhrchen‹, die Festigkeit des Betons mit dem ›Schmidt-Hammer‹, die Zusammensetzung vorhandener Schadsalze, die Tiefe der Bewehrungseisen sowie der Fortschritt der Karbonatisierung des Betons.

II.2.2.2.1 Ultraschalluntersuchung

Die zerstörungsfreie Prüfmethode der Ultraschalluntersuchung basiert auf einer Durchschallung des Gesteins mittels Frequenzen, die oberhalb des menschlichen Hörbereichs liegen (>20 KHz).

¹²⁰⁵ Kap. II.2.3 und II.2.4.

¹²⁰⁶ Vgl. Auras – Meinhardt – Snethlage 2011, 43.

Üblich ist die Messung der Laufzeit der Kompressions- oder p-Wellengeschwindigkeit (t)¹²⁰⁷. Dividiert man die Messdistanz (l) durch diese Laufzeit ergibt sich die Geschwindigkeit (v) der Welle im Festkörper (Formel 1). Diese ermittelte Geschwindigkeit lässt sich in weiterer Folge mit dem Verwitterungszustand des Natursteins in Beziehung setzen. Vereinfacht gesagt, korreliert hierbei die Verlangsamung der Geschwindigkeit mit der Entfestigung des Gesteins¹²⁰⁸.

Formel 1 $v = l/t$

Es sei an dieser Stelle jedoch darauf hingewiesen, dass die Messung der Ultraschallgeschwindigkeiten sowohl von den lithologischen Eigenschaften des zu untersuchenden Gesteins als auch von weiteren physikalischen Rahmenbedingungen (Temperatur, Wassergehalt des Porenraums, Druck etc.) beeinflusst wird¹²⁰⁹. Eine Beurteilung des jeweiligen Verwitterungsgrades ausschließlich auf Grundlage der Ultraschallgeschwindigkeit ist deshalb problematisch. Nach aktuellem Wissensstand ist es sinnvoller, die Ultraschalldiagnostik als eine Methode unter mehreren im Rahmen einer umfassenden Zustandsuntersuchung zu sehen und die Werte nicht überzuinterpretieren.

Untersuchungen an bruchfrischem Marmor ergaben etwa je nach Textur wesentliche Unterschiede der Laufzeiten¹²¹⁰. Dieser Effekt steht im Wesentlichen mit der unterschiedlichen Ausbreitung der Ultraschallwelle im Hauptbestandteil des Gesteins, dem Mineral Kalzit, in Verbindung. Parallel zur Hauptachse des Kristalls (c-Achse) beträgt die Geschwindigkeit 5,6 km/s, senkrecht dazu hingegen 7,4 km/s. Diese im Labor bestimmten Werte stellen jedoch Idealfälle dar und können bei dem Naturprodukt Marmor abweichen. Je nach Ausrichtung der Kalzitkristalle und dem Anteil weiterer Mineralien liegen gemessene Werte in der Regel zwischen den genannten Zahlen. Als Richtwerte von Ultraschalllaufzeiten zur Beurteilung von Carraramarmor gibt das Labor Köhler¹²¹¹, welches sich seit etwa zwei Jahrzehnten mit dieser Untersuchungsmethode auseinandersetzt, folgende Daten an:

Zustand	Ultraschalllaufzeit [km/s]
bruchfrischer Marmor	5,4–6,7 km/s
stark verwitterter Marmor	3,0–4,0 km/s
abbruchgefährdeter Marmor	2,0–3,0 km/s
vollständig zerstörter Marmor	1,0–2,0 km/s
Zuckermarmor	unter 1,0 km/s

Im Rahmen der Zustandserfassung am ›Hadrianstempel‹ wurden diese Werte trotz ihrer beschränkten Aussagekraft in Bezug auf andere Gesteinsvarietäten als Beurteilungskriterien der zu untersuchenden Marmore herangezogen. Hierbei erfolgte eine zusätzliche Vereinfachung der errechneten Geschwindigkeiten in drei Zustandskategorien.

Zustand	Ultraschalllaufzeit [km/s]
gut	>4 km/s
befriedigend	4,0–2,0 km/s
schlecht	<2,0 km/s

¹²⁰⁷ Bei der Durchschallung eines Prüfkörpers entstehen mehrere verschiedene Wellen im kristallinen System: Longitudinalwellen (p-Welle, Kompressionswelle, Schwingungsebene entspricht der Ausbreitungsrichtung der Welle), Transversalwelle (Schubwelle, Schwingungsebene steht normal zur Ausbreitungsrichtung der Welle), Biegewelle, Oberflächenwellen (Rayleighwelle, Grenzflächen zweier Medien).

¹²⁰⁸ Dürrast – Siegesmund – Prasad 1999, 359.

¹²⁰⁹ Dürrast – Siegesmund – Prasad 1999, 360.

¹²¹⁰ Fleischer 2002a, 54.

¹²¹¹ F. Köhler, Die Ultraschallmethode <<http://www.labor-koehler.de/ultraschall.html>> (9. 7. 2011).

Die Ultraschalluntersuchung der einzelnen Werksteine erfolgte direkt am Objekt (*in situ*). Gemessen wurde mit dem tragbaren Ultraschallmessgerät ATH MA-C369, einem sog. Taschen-Ultrasonic-Betonprüfgerät, mit einer Frequenz der Messköpfe von 55 KHz und einem Messbereich von 0–1999 μ s (Taf. 163, 1). Sämtliche Laufzeiten wurden im Durchschallungsverfahren gewonnen, die Kopplung zwischen verwitterter Gesteinsoberfläche und Sender bzw. Empfänger erfolgte mit Sanitärkitt. Vor jeder Messung erfolgte eine Kalibrierung des Geräts mittels mitgelieferter Kunststoffzylinder, da die ermittelte Laufzeit sehr stark vom Anpressdruck und der Kopplung zum Untergrund abhängt¹²¹².

Zur besseren Veranschaulichung wurden die Ergebnisse in die Kartierung übertragen (Taf. 113–117). Die einzelnen Messpunkte mit den exakten Ergebnissen von Messdistanz, Laufzeit, Schichtung und Geschwindigkeit sind im Kapitel III.2 Naturwissenschaftliche Untersuchungen aufgelistet¹²¹³.

II.2.2.2.2 ›Karsten'sches Prüfröhrchen‹

Das sog. Karsten'sche Prüfröhrchen ist eine genormte, glockenförmige Glasröhre, mit welcher die Wasseraufnahme eines Natursteins geprüft werden kann (Taf. 163, 2)¹²¹⁴. Das Glasgebilde wird dazu mit seinem runden, 30 mm messenden Ausgang an die Steinoberfläche angebracht. Die Verbindung zum Stein erfolgt über Sanitärkitt am verbreiterten Glasrand. Anschließend wird das Prüfröhrchen bis zum Ausgangspunkt der Messskala mit Wasser gefüllt.

Das zerstörungsfreie Verfahren wird seit den 60er Jahren an Bauwerken angewandt. Die ermittelten Werte ermöglichen Rückschlüsse auf den Verwitterungsgrad und die Empfindlichkeit gegenüber mit Wasser in Verbindung stehenden Schadensfaktoren. Die gewonnenen Daten finden sich ebenfalls im nachfolgenden Kapitel II.2.4 Zustandserfassung wieder.

II.2.2.2.3 ›Schmidt-Hammer‹

Der sog. Schmidt-Hammer oder Rückprallhammer dient der zerstörungsarmen, punktuellen Messung der Druckfestigkeit von mineralischen Werkstoffen (Taf. 163, 3). Die Funktionsweise des Messgeräts basiert auf einem Schlagbolzen, der mit einer Feder aufgezogen wird und dann gezielt auf die Werkstoffoberfläche aufschlägt. Je nach Beschaffenheit und Festigkeit des Werkstoffs prallt der Bolzen dabei mehr oder weniger stark zurück. Im Allgemeinen gilt: Je härter der Werkstoff, desto größer die Rückprallstrecke. Diese wird von der im Gerät enthaltenen Skala abgelesen.

Getestet wurden im Rahmen der Zustandserfassung ausschließlich die Betonelemente, um deren Festigkeit und Tragfähigkeit einzuschätzen. Von einer Testung der Marmorelemente wurde abgesehen, da der Aufprall des Bolzens auf dem Marmorgestein eine Beschädigung hervorrufen würde. Insgesamt wurden an dem Tempel 50 Messungen vorgenommen. Das Ergebnis jeder Messung entspricht hierbei einem Mittelwert aus fünf Tests, da natürliche Inhomogenitäten des Werkstoffs (Poren, Zuschlag, Unebenheiten etc.) starken Einfluss auf die Messung haben können.

Die Lokalisation der Messpunkte ist in der Kartierung dargestellt (Taf. 113–118). Die exakten Ergebnisse des Mittelwerts, der Schwankungsbreite und der sich daraus ergebenden Festigkeit finden sich in Kapitel III.¹²¹⁵

¹²¹² Fleischer 2002a, 55.

¹²¹³ Die Beurteilung der gewonnenen Daten bezüglich des Entfestigungsgrads in Kap I.7.4.1; s. auch Kap. II.2.3 Tabellen.

¹²¹⁴ D'Ham – Meinhardt – Niemeyer 2011, 82.

¹²¹⁵ s. Kap. II.2.3 Tabellen.

II.2.2.2.4 *Salztests*

Der Nachweis von vorhandenen Salzen am Objekt wurde mit Teststreifen der Firma Merck, Merckoquant® erbracht. Die zu untersuchenden Bereiche oder Bruchstücke wurden zu diesem Zweck mit Wasser benetzt und nach einer kurzen Wartezeit für die Mobilisierung vorhandener Salze (10–15 min) mit dem Stäbchen beprobt. Die Teststreifen reagieren auf die Präsenz spezifischer Verbindungen mit einer Farbreaktion.

Die Untersuchung der ausgewählten Bereiche umfasste insgesamt vier verschiedene Anionen, die am häufigsten im Zusammenhang mit Schadsalzen an Bauwerken vorkommen. Es sind dies Chlorid (Cl^-), Sulfat (SO_4^{2-}), Nitrat (NO_3^-) und Nitrit (NO_2^-). Das Ergebnis der Tests liefert eine Angabe der Konzentration des Anions pro Volumen [mg/l]. Für einen Nachweis von Salzen haben sich diese Tests in der Praxis bewährt. Eine Aussage über das konkret vorhandene Salz kann wegen der unvollständigen Information bezüglich des dazugehörigen Kations jedoch nicht gegeben werden¹²¹⁶.

II.2.2.2.5 *Karbonatisierungstiefe des Betons*

Die Überprüfung des Karbonatisierungsfortschritts in den Bauteilen aus Beton wurde mit dem pH-Indikator Phenolphthalein an gezogenen Bohrkernen durchgeführt. Der Indikator ist ein sog. Triphenylmethanfarbstoff, welcher ab einem pH-Wert von >8,5 deutlich Rot oder Magenta in Erscheinung tritt.

Die Porenlösung von Beton hat im frischen und intakten Zustand durch das eingelagerte Kalziumhydroxid alkalisches Milieu. Dies ist im Zusammenhang mit der Verwitterung von besonderer Bedeutung: In einem derartigen Milieu bildet sich auf der Oberfläche der eingebauten Stähle eine sog. Passivierungsschicht, die Eisen vor Korrosion schützt¹²¹⁷. Der Indikator färbt sich in alkalischen Zonen rot. Hat hingegen das Kalziumhydroxid mit dem CO_2 der Luft reagiert und im Beton Kalziumkarbonat gebildet, so ändert sich der pH-Wert Richtung sauer. Die Farbreaktion des Indikators bleibt aus. Der Stahl im Beton ist von Korrosion bedroht.

II.2.2.2.6 *Betonbewehrung*

Zur Untersuchung des im Beton enthalten Bewehrungsstahls wurde die Oberfläche ausgewählter Zonen mit einem Bewehrungssuchgerät Ferroskan PS200 der Firma Hilti abgefahren. Das Messgerät detektiert ein induziertes magnetisches Wechselfeld und ermöglicht auf diese Art die Abschätzung von Tiefe und Stärke der Bewehrungseisen. Im Rahmen der Zustandserfassung wurden 20 Messungen an aussagekräftigen Stellen vor Ort durchgeführt¹²¹⁸.

II.2.2.3 NATURWISSENSCHAFTLICHE PRÜFVERFAHREN – LABOR

Für die naturwissenschaftliche Untersuchung im Labor wurden insgesamt 33 Proben entnommen. In der Regel handelte es sich um lose anhaftende Substanz entlang von Bruchflächen oder Rissstrukturen (HTEMP 1–28). Von der Betonsubstanz wurden zusätzlich fünf Kernbohrungen von ca. 10 cm Länge und 5 cm Durchmesser entnommen (HTEMP K1–K5).

Kritisch anzumerken ist im Rahmen der Untersuchung von Proben die jeweils nur punktuelle Aussagekraft der Ergebnisse. Die gewonnenen Daten und Werte müssen daher immer gemeinsam mit der makroskopisch feststellbaren Verwitterung interpretiert werden. Zu beachten ist auch

¹²¹⁶ Anmerkung: Die weitere Analyse von Salzen wurde aufgrund der geringen Bedeutung dieses Schadensphänomens am Bauwerk unterlassen. Die exakte Analyse von Schadsalzen ist aufwendig und kann nur im Labor durchgeführt werden.

¹²¹⁷ Schwarz 1999, 5.

¹²¹⁸ Die Umsetzung der Messungen erfolgt durch die Betest Yapı Malzemesi Laboratuvarı (Izmir). Die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse wurde vom Verfasser durchgeführt. s. Kap. II.2.2.

eine mögliche Veränderung der Probe (z. B. die Vergrößerung von Rissweiten) bei der Entnahme und beim Transport.

II.2.2.3.1 Lichtmikroskopie

Die Mikroskopie erlaubt ein besseres Verständnis der gefundenen Schadensbilder. Das Verfahren liefert eine sehr gute Darstellung des mineralischen Gefüges, es zeigt den ausgebildeten Porenraum bzw. das Rissbild. Zusätzlich können die vorhandenen Auflagen wie Krustenbildungen oder biogene Besiedlung studiert werden.

Den Beginn des Untersuchungsprogramms bildete die Betrachtung der gewonnenen Probenstücke mit einem Stereomikroskop des Typs Olympus BX40. In weiterer Folge wurden, je nach Fragestellung und fortführender Analysen, An- und/oder Dünnschliffe hergestellt. Insgesamt wurden 14 Dünnschliffe und 26 Anschliffe hergestellt. Als Einbettungsmedium der Proben kam ein Epoxidharz¹²¹⁹ zum Einsatz, welches zur besseren Sichtbarkeit des Porenraums blau gefärbt wurde.

Die hergestellten Präparate wurden anschließend ein weiteres Mal mit dem Stereomikroskop sowie ergänzend mit dem Polarisationsmikroskop des Typs Nikon SMZ 1500 untersucht. Die genormten Dünnschliffe von 20–30 µm Stärke eignen sich besonders zur Identifizierung der beteiligten Mineralien des Gesteins und erlauben einen exakten Einblick in das Gefüge.

II.2.2.3.2 Elektronenmikroskopie (REM)

Die Rasterelektronenmikroskopie (REM)¹²²⁰ ermöglicht Beobachtungen der Gesteinsstrukturen unter sehr hoher Vergrößerung und dient der Elementanalyse. Die Proben müssen für diese Untersuchung mit Kohlenstoff oder Gold bedampft werden, um die elektrische Ladung durch den Elektronenstrahl abbauen zu können.

Aus den Rückstreuielektronen (BSE) ergibt sich ein Bild in unterschiedlichen Graustufen. Je höher die Ordnungszahl des Elements, desto heller ist die Darstellung. Die Untersuchung erfolgte an den hergestellten Anschliffen. Sie dient für die Identifizierung vorhandener Bindemittel von Beton und Mörtel sowie der Charakterisierung von Krustenbildungen und mineralischen Strukturen.

Die Sekundärelektronen (SE) eignen sich besonders für die hochauflösende, dreidimensionale Darstellung von Oberflächen und wurden an Bruchstücken durchgeführt. Der Untersuchungsschwerpunkt liegt auf der Morphologie der verwitterten Oberflächen sowie der biogenen Besiedlung.

Ergänzend wurde eine Elementanalyse in Form der energiedispersiven Röntgenspektroskopie (EDX) angewendet. Diese punktuelle Analyse wurde fortlaufend während der REM-Untersuchung vorgenommen und diente der Identifizierung der verschiedenen Mineralphasen.

II.2.2.3.3 Infrarot-Spektroskopie

Zur Identifizierung der vorgefundenen Kunststoffe, welche im Zuge der Anastylose 1957/1958 eingebracht worden waren, kam die Infrarot-Spektroskopie zum Einsatz. Das Prinzip dieser Testmethode basiert auf der Wechselwirkung von Infrarotstrahlung mit Materie. Je nach Atombindung werden gezielt spezifische Infrarotstrahlungen absorbiert. In weiterer Folge ergibt sich für jede chemische Substanz ein einzigartiges Spektrum bezüglich der Transmission von Infrarotstrahlung (<fingerprint>), durch das die Substanz identifiziert werden kann.

¹²¹⁹ Araldit 2020, Produkt der Firma Huntsman Advanced Materials (Switzerland) GmbH, Zweikomponenten-Klebstoffsystem (XW 396/XW 397) auf Epoxidharzbasis.

¹²²⁰ Rasterelektronenmikroskop: Philips XL 30.

II.2.2.3.4 Röntgendiffraktometrie

Die Untersuchungsmethode der Röntgendiffraktometrie wurde an drei Streupräparaten aus den Bestandteilen der Krustenbildungen von Probe HTEMP 3, 27 und 28 durchgeführt. Die Methode basiert auf einer Interpretation der Beugungsmuster von Röntgenstrahlen an Kristallgittern und ermöglicht eine qualitative und quantitative Analyse des Probenmaterials. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Identifizierung der einzelnen Mineralien. Es galt zu klären, ob die Krustenbildungen die Folge eines historischen Flechtenbewuchses sind und dementsprechend die Mineralien Whewellit und Weddellit vorkommen.

II.2.2.3.5 Physikalische Prüfverfahren

Unter der Bezeichnung physikalische Prüfverfahren werden die unterschiedlichen Untersuchungsverfahren subsummiert, welche an den fünf Proben der Kernbohrungen vorgenommen wurden. Diese orientieren sich an gängigen Prüfverfahren für Baustoffe, wie sie in der Österreichischen und Europäischen Norm festgeschrieben sind.

Die Charakterisierung der Probekörper erfolgte über eine Vermessung und der Bestimmung der Rohdichte (ÖNORM EN 1936). Das Verhalten gegenüber Wasser wurde über die massebezogenen Wasseraufnahme (ÖNORM EN 13755), der massebezogenen Wasserabgabe und der Kapillarwasseraufnahme (ÖNORM EN 1925) analysiert.

Die Beurteilung der Festigkeit des Betons geschah über die Messung der Laufzeit von Ultraschall sowie der Bestimmung der Spaltzugfestigkeit (ÖNORM B 3124-4) und Druckfestigkeit (ÖNORM EN 1926). Die Probekörper lagen nach diesen mechanischen Prüfungen am Ende des Untersuchungsprogramms irreversibel zerstört vor.

II.2.3 Bestand

Die konservatorische Bestandsaufnahme dient primär der Identifizierung sämtlicher vorgefundener Materialien hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung, ihres Aufbaus, ihrer Herstellung und ihrer Anwendung. Bei der Auseinandersetzung mit dem Bestand des ›Hadrianstempel‹ erfolgte in einem ersten Schritt die Unterteilung in zwei zeitliche Gruppen: einerseits in die historische Bausubstanz, d. h. sämtliches erhaltenes antikes Kulturgut des Tempels, das 1956 ausgegraben wurde, und andererseits in das eingebrachte Material der Anastylose von 1957/1958. In einem zweiten Schritt erfolgt dann die Zuordnung zur jeweiligen Werkstoffklasse.

II.2.3.1 HISTORISCHE SUBSTANZ

Der erhaltene historische Baubestand des ›Hadrianstempel‹ kann, mit Ausnahme einer Eisenklammer und den Mauerhaken der Wandverkleidung, vollständig den mineralischen Werkstoffen zugeordnet werden. Der weitaus größte Anteil entfällt hierbei auf diverse Natursteine, vor allem Marmor. Untergeordnet finden sich in der Baueinheit des Bruchsteinmauerwerks und im Bodenbereich ebenfalls antike Mörtel.

Der Bestand der historischen Gesteinssubstanz ist heute auf mehrere Orte verteilt. Die Hauptmasse der Steine ist im wiederaufgebauten Tempel direkt an der Kuretenstraße verbaut. Wie bei Anastylosen üblich, konnten aber nicht alle Werksteine in das bestehende Konzept integriert werden. Der Umgang mit dieser Substanz bestand einerseits in der Aufstellung derselben in der unmittelbaren Umgebung sowie im Tempel selbst als Einzelobjekte. Andererseits wurden die vier Friesblöcke der Tempelvorhalle zum besseren Schutz in das Museum von Selçuk überführt¹²²¹. Am Tempel selbst sind stattdessen heute Kopien angebracht.

¹²²¹ s. dazu Kap. I.6 sowie II.1.5.

II.2.3.1.1 Marmor

Der Begriff Marmor leitet sich in diesem Bericht von der petrografischen Definition im Kontext der modernen Erdwissenschaften ab. Man versteht darin ein durch Kontakt- oder Regionalmetamorphose entstandenes Gestein¹²²² mit einem hohen Kalkanteil des Ausgangsgesteins. Der karbonatische Anteil (Kalzit/Dolomit) des Marmors liegt über 50 %¹²²³.

Aufgrund des Marmorreichtums der Region Ephesos bildet auch am ›Hadrianstempel‹ der Werkstoff Marmor den weitaus größten Anteil der erhaltenen historischen Substanz¹²²⁴. Auffallend sind vor allem die exakt bearbeiteten Werksteinquader der prunkvollen Fassade. Bei der petrografischen Analyse zeigte sich das Gestein aber auch als Hauptbestandteil des Bruchsteinmauerwerks, ebenso dient es als Bodenbelag der Cella sowie als Wandverkleidung. Eine Übersicht des aufgenommenen Gesteinsbestands der einzelnen Marmorwerkblöcke – ohne die Steine des Bruchsteinmauerwerks und des Bodenbelags – zeigt Tabelle 3.

Tabelle 3: Zuordnung der aufgenommenen Marmorwerkblöcke (147 Stück) nach verschiedenen Kriterien – Architekturverband, Herkunftsbestimmung, Lokalisation

Gesamtanzahl aufgenommenener Werkblöcke				147 ¹²²⁵	
Zuordnung Marmorbestand – Architektur		Herkunft		Lokalisation	
Statuenpostament	10	Gruppe 1	8	Anastylose	124
Säule/Pfeiler	9	Gruppe 2	11	Einzelobjekte	19
Gebälk	32	Gruppe 3 (Ephesos I)	30	Museum	4
Kranzgesims	17	Gruppe 4 (Ephesos I)	45		
Dachkonstruktion	18	Gruppe 5 (Ephesos II)	4		
Lünette	3	Gruppe 6	4		
Wandverkleidung	18	Prokonessos	1		
Binder	4	unbestimmt	44		
Türrahmung	14				
Vierung	1				
Stufen	17				

Wie aus der Tabelle hervorgeht, haben sich von der Fassade inklusive der erhaltenen Ausstattung des Pronaos 147 Werksteine erhalten. Der Großteil (124 Stück) findet sich in der Anastylose wieder und bestimmt das heutige Erscheinungsbild des Bauwerks.

Die Verteilung der erhaltenen Werksteine im Architekturverband zeigt eine Konzentration des historischen Bestands in der bodennahen Zone der aufsteigenden Architektur, bestehend aus: der Bodengestaltung, den Basen von ehemaligen Skulpturen, Säulen und Pfeilen sowie der Wandverkleidung der Vorhalle bis zur ersten Binderebene. Eine weitere Anhäufung erhaltener

¹²²² Metamorphite sind die dritte große Gesteinsgruppe neben den Magmatiten und Sedimentgesteinen. Ihre Entstehung ist auf eine Druck- und/oder Temperaturbeanspruchung bereits vorhandener Gesteine zurückzuführen, in welchen sich der Mineralbestand des Ausgangsgesteins neu formiert. Vgl. Grotzinger – Press – Siever 2008, 73 f. 78 f.

¹²²³ Naturstein Lexikon (2003) 231 s. v. Marmor.

¹²²⁴ s. dazu auch Kap. II.1.

¹²²⁵ In der Gesamtanzahl des Marmorbestands fehlen die Gesteinsblöcke des Bodenbelags und der Wandverkleidung der Cella. Nach einer Abschätzung anhand der Pläne handelt es sich um ca. 20 Stück. Der Bodenbelag in der Vorhalle wurde ebenfalls nicht erfasst, es handelt sich jedoch um ein anderes Gestein und damit nicht um einen Teil des Marmorbestands.

Steine findet sich auf Höhe des Gebälks und umfasst die Kapitelle, Architrave, Frieze, das Horizontalgeison sowie diverse Elemente der Dachkonstruktion.

Im Kontrast zu dem Pronaos sind in der Cella nur spärliche Reste des Bodenbelags und der Wandverkleidung aus hellem Marmorstein erhalten. Dominierend ist die Oberfläche des Mauerwerks, ein römisches *opus incertum*. Der häufigste Baustein dieses Mauerwerks ist ebenfalls ein Marmor. Der Stein hat gräuliche Erscheinung mit mehr oder weniger starker, heller oder dunkler Bänderung und steht direkt vor Ort in Ephesos an.

Die Gliederung des Marmorbestands basiert auf den chemisch-mineralogische Untersuchungen durch Walter Prochaska¹²²⁶, wonach am Tempel sieben Marmorgruppen unterschieden werden können (Taf. 104–107).

Die erhaltenen Marmorsteine des Tempels zeigen zu einem überwiegenden Prozentsatz Spuren von Oberflächenbearbeitung durch Steinmetzen und Bildhauer¹²²⁷. Eine Farbfassung der Steine, die nach heutigem Wissenstand für die Architektur der römischen Kaiserzeit in Kleinasien anzunehmen ist¹²²⁸, konnte nicht nachgewiesen werden¹²²⁹.

II.2.3.1.2 Metalle

Der Bestand antiker Metalle spielt am »Hadrianstempel« eine untergeordnete Rolle. Er umfasst eine Eisenklammer im Bereich des Marmormauerwerks, einzelne Mauerhaken im Bruchsteinmauerwerk sowie metallische Reste in einzelnen Ausnehmungen im Bereich des Tympanonreliefs (**097L**, **098D**, **170K**). Damit ist nur ein kleiner Teil der unzähligen Klammern und Dübeln des Bauwerks erhalten. Der wertvolle Rohstoff Metall wurde wahrscheinlich nach dem Einsturz beraubt¹²³⁰. Offensichtlich konnten nur die vermutlich unter dem Schutt verborgenen oder von einer ehemaligen Putzschicht überdeckten Metallelemente in den unteren Bereichen der Mauer des Innenraums nicht gefunden werden.

Der aussagekräftigste Rest einer antiken Eisenklammer findet sich im Bereich der westlichen Ante. Diese diente dort als Verbindungselement zweier Werksteine aus Marmor im bodennahen Bereich, die an dieser Stelle als Spolien im Rahmen des vermutlich im 4. Jahrhundert n. Chr. erfolgten Umbaus¹²³¹ versetzt worden waren (Taf. 164, 1). Die Klammer besteht aus Schmiedeeisen und zeigt Bleiverguss.

Die erhaltenen Mauerhaken finden sich im Inneren der Cella. Sie sind dort im Mauermörtel der Wände verankert und dienten ursprünglich als Haltepunkte der Wandverkleidung aus Marmor- und Buntsteinplatten. Sichtbar sind ausschließlich die Köpfe der Haken (Taf. 164, 2). Diese sind zwischen 2–3 cm lang und haben eine Dicke von ca. 0,8 mm. Anhand der grünlich blauen Farbigekeit der Haken, die von den anhaftenden Korrosionsprodukten herrührt, handelt es sich vermutlich um eine Kupferlegierung (Bronze).

II.2.3.1.3 Bruchsteinmauerwerk

Die antike Substanz des Bruchsteinmauerwerks umfasst die Cella inklusive der vorkragenden Anten. Der Erhaltungszustand zur Ausgrabungszeit kann anhand der historischen Fotodokumentation dieser Zeit gut nachvollzogen werden (Taf. 10). In den der Straße zugewandten Anten und der Nordwand des Pronaos reicht die Mauer etwa bis zur Höhe der ersten oder der zweiten

¹²²⁶ s. Kap. II.1.

¹²²⁷ s. Kap. III.1.2.

¹²²⁸ Brinkmann 2010.

¹²²⁹ Eine naturwissenschaftliche Untersuchung der Friesblöcke der Vorhalle im Ephesos Museum Selçuk zur Klärung der Frage nach Fassungsresten konnte im Rahmen des FWF-Projekts zur Baugeschichte und Deutung des Tempels (Projektnr. 20947-G02) leider nicht erfolgen. Die Blöcke bieten nach genauerer Autopsie durchaus mögliche Stellen, an denen sich Farbe erhalten haben könnte.

¹²³⁰ s. dazu Kap. I.4.6.

¹²³¹ s. dazu Kap. I.4.1, I.6.4.2 und I.4.5.1.

Binderebene. Nach hinten hin steigt die Mauerkonstruktion dem Abhang folgend bis zur Rückwand der Cella leicht an. Das heutige Niveau der Nordwand entspricht weitestgehend dem der Ausgrabungssituation.

Die Rückwand des Pronaos und die Anten bestehen aus ca. 60 cm starkem, reinem Bruchsteinmauerwerk. Dem gegenüber sind die Ost-, West- und Nordwand der Cella von größerer Stärke. Sie sind als Schalenmauerwerk ausgeführt und mit *opus caementicium* vergossen.

Die Bestandteile der Mauer – Mörtel und Stein – werden im Anschluss getrennt voneinander beschrieben. Der Gesteinsbestand umfasst hierbei sowohl die antiken als auch die rekonstruierten Areale der Anastylose. Die Begründung für diese Ausnahme innerhalb der Bestandsbeschreibung liegt darin, dass es sich bei den Mauersteinen ausschließlich um antike Substanz handeln dürfte. Vermutlich wurden die Mauersteine in der näheren Umgebung ergraben und in weiterer Folge für die Rekonstruktion fehlender Bereiche der Mauer des ›Hadrianstempels‹ verwendet.

Mörtel

Der Mörtel des antiken Mauerverbands zeigt sich an vielen Stellen der erhaltenen Bausubstanz. Hierbei wurden Proben vom Mauermörtel des Bruchsteinmauerwerks (HTEMP 17) und von einem Hinterfüllmörtel der ehemaligen Wandverkleidung (HTEMP 18) genommen. Beide Mörtelmassen stammen aus dem Bereich der Cella.

Der Mauermörtel zeigt sich optisch durch die vorhandenen Kalkspatzen im Gefüge als auf der Baustelle gelöschter Kalkmörtel. Charakteristisch ist sein leicht rötliches Erscheinungsbild, welches durch den hohen Anteil an Ziegelsplitt als Zuschlagsstoff zustande kommt. Der Splitt hat Größen zwischen 1 und 7 cm (Taf. 165, 1 HTEMP 17). Weitere Zuschläge des Mörtels umfassen diverse Gesteinsfragmente – wie Phyllit, Marmor und Quarz¹²³². Sie haben maximale Korngrößen von 2,5 cm bei bimodaler Korngrößenverteilung (Grobkorn: 1–2,5 cm, Feinkorn <3 mm).

Wie die Untersuchung mit dem REM zeigte, findet sich in der Kalkmatrix des Mörtels immer auch ein gewisser Anteil an Silizium (Si). Es ist daher von einem Hydraulefaktor¹²³³ im Mörtel auszugehen. Des Weiteren ist auch im Grenzbereich vieler Ziegelbruchstücke ein ausgebildeter Saum von 200 µm Dicke zu sehen, welcher ebenfalls aus Hydratphasen besteht.

Als Hinterfüllmörtel werden Spuren eines intensiv rötlich gefärbten Mörtels bezeichnet, welche sich auf der Wandoberfläche finden (Taf. 165, 2 HTEMP 18). Das Material wurde zur Hinterfüllung der vorgestellten Wandverkleidung aus Marmor eingesetzt. Wie die begleitende Grabung dieses Forschungsvorhabens im östlichen Teil der Cella zeigte (Taf. 60), bildet dieses Material ebenfalls das Mörtelbett des Bodenbelags¹²³⁴. Bei der farbgebenden Komponente handelt es sich um Ziegel, der mit Ausnahme einzelner Schichtsilikate, den gesamten Zuschlag darstellt. Die Ziegelzuschläge haben Größen bis zu 1 cm Durchmesser bei breiter Korngrößenverteilung. Der Anteil an feinstem Ziegelmehl <0,5 mm ist besonders hoch. Unter hoher Vergrößerung konnte ebenfalls ein geringer Anteil an feinkörnigen Schichtsilikaten – Glimmer und/oder Chlorit – als Zuschläge identifiziert werden. Größere Fragmente dieses Mörtels finden sich nur noch im bodennahen Bereich der Nordostecke und an der Westwand der Cella.

Das Bindemittel des Hinterfüllmörtels ist Kalk. Er liegt im Gefüge gemeinsam mit kleinsten Schichtsilikaten (tonige Bestandteile) vor. Eine Bildung von Hydratphasen zwischen den kalzigen und tonigen Bestandteilen sowie zwischen dem Kalk und dem Ziegelsplitt konnte nicht nachgewiesen werden. Dies ist bemerkenswert, da die Zuschläge fast ausschließlich aus Ziegel

¹²³² Die Zusammensetzung des Zuschlags weist auf einen lokalen Flussschotter der Region Ephesos hin, wie er in anderen Baukomplexen der Stadt vorkommt. Kuleli u. a. 2005, 176.

¹²³³ Hydraulische Bindemittel (z. B. Zement) erhärten infolge des Einbaus von Wasser (Hydratation) unter Bildung von sog. Hydratphasen. Hydraulefaktoren in Kalkmörteln sind demnach Komponenten des Mörtelgemisches, welche auf diese Weise mit Wasser reagieren. Ihre Herkunft sind tonige Bestandteile des für das Kalkbrennen eingesetzten Gesteins oder bewusst zugesetzte Stoffe bei der Herstellung des Mörtels (Puzzolane, Trass, Ziegel). s. Benedix 2011, 310. 319. 323.

¹²³⁴ Vgl. Kap. I.4.2.5.

bestehen und eine Reaktion zu erwarten war. Eine mögliche Ursache dafür könnte sein, dass das Wasser des Mörtels zu rasch vom saugfähigen Untergrund oder von den nicht vorgesennten Ziegelzuschlägen selbst entfernt worden war.

Mauersteine

Das mengenmäßig dominierende Gestein der Mauer ist ein grauer Marmor (Taf. 128–131, 134–135, 165, 3). Diese Varietät steht im gesamten Stadtgebiet von Ephesos an¹²³⁵. Die hellen Varietäten von Marmor sind deutlich seltener anzutreffen. Ihre Verteilung zeigt außerdem eine Verbindung zur Wiederaufbautätigkeit der 1960er Jahre, denn fast der gesamte Bestand befindet sich in derartigen Arealen¹²³⁶. Vermutlich wurde bei der Rekonstruktion der Mauern einfach in der näheren Umgebung ergrabenes, nicht zuordenbares Material als Mauerstein zweitverwendet. Diese Arbeitsweise wird durch den hohen Anteil an Spolien bestätigt.

Daneben wurden vereinzelt meist plattenförmige Steine aus Schiefer (Phyllit) im horizontalen und vertikalen Fugenwerk verwendet (Taf. 165, 4). Sie dienen hier dem Ausgleich von Höhenunterschieden zwischen den einzelnen Lagen aus grob behauenen, größeren Bruchsteinen. Das Gestein stammt direkt aus Vorkommen, die sich an mehreren Stellen des Panayırdağ erstrecken. Ein Aufschluss findet sich z. B. in der Nähe des Magnesischen Tors und im Hanghaus 2¹²³⁷. Das Gestein weist eine bräunlich grünliche Farbigekeit auf. Es handelt sich hierbei um ein niedriggradig metamorphes Gestein der Grünschieferfazie. Hauptbestandteil ist Muskovit mit einem Anteil von mehr als 50 %. Die blättrigen Kristalle sind mit freiem Auge und anhand der intensiven Lichtreflexion bei richtigem Einfallswinkel gut zu erkennen.

Vereinzelt sind im Mauerverband cremefarbige Kalksteine und grünliche Serpentine anzu-treffen (Taf. 165, 5; 166, 1). Ein Vorkommen derartiger sedimentärer Steine ist in der näheren Umgebung nicht bekannt. Vermutlich handelt es sich um einzelne Gesteinsbrocken, die im Raum Ephesos als Reste eines verwitterten Gesteinskörpers vorhanden waren.

Dieser Befund deckt sich mit Bruchsteinmauern anderer Gebäudekomplexe in Ephesos.

Bei einigen der Bruchsteine handelt es sich um Spolien (Taf. 166, 2). Zu unterscheiden sind einerseits Spolien im erhaltenen originalen Mauerwerk, welche von abgebrochenen Gebäuden der Entstehungszeit stammen, und andererseits jene Spolien, die im Zuge der Anastylose 1957/1958 eingebracht wurden. Letztere sind die Folge einer Zweitverwendung ergrabener, nicht zuordenbarer Bruchstücke aus der näheren Umgebung des Tempels. Es besteht eine Verbindung zu dem Bestand an hellen Marmorsorten im Mauerwerk.

II.2.3.1.4 Ziegel

Der Bestand an Ziegel konzentriert sich wie derjenige des hellen Marmors auf wiederaufgebaute oder reparierte Bereiche im Zuge der Anastylose. Es handelt sich um in der näheren Umgebung ergrabenes historisches Material, das als Mauerstein verwendet wurde. Plattenförmige Bruchstücke von Ziegel finden sich ebenfalls in größeren Fugen (Taf. 165, 6).

¹²³⁵ Es handelt es sich um einen hellgrauen, schwachmetamorphen Kalkmarmor mit kaum erkennbarem Parallelgefüge, das von millimeterbreiten weißlichen Kalkadern durchzogen ist. Die durchschnittliche Korngröße des Marmorgefüges liegt unter 0,2 mm, die Kristalle der Kalkadern sind etwas größer ausgebildet mit bis zu 0,7 mm Durchmesser. Im Marmorgefüge finden sich außerdem zahlreiche Dolomitkörner, die bevorzugt in Nestern oder Zeilen angeordnet sind und stets mit Hohlräumen einhergehen. Als Akzessorien finden sich Titanit und Apatit, meist an Dolomit gebunden. Makroskopisch fallen sehr häufig natürliche Inhomogenitäten in Form von mehr oder weniger großen Hohlräumen auf. Vgl. J. Weber, Naturwissenschaftlicher Untersuchungsbericht. Serapeion Ephesos (unveröffentlichter Bericht im Zuge der Forschungsarbeiten am Serapeion von Ephesos 2013) Probe ESer 3a.

¹²³⁶ s. dazu die Bestandskartierung des Bruchsteinmauerwerks der Ostwand (Taf. 90), an welcher sich dies deutlich ablesen lässt.

¹²³⁷ Rantitsch – Prochaska 2011, 245.

Es muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass die Renovierungsarbeit im Bereich des Variusbades durch Scholastikia ebenfalls vorwiegend in Ziegel ausgeführt wurden. Als Beispiel sei auf den Mauerabschnitt an der Ostwand direkt am Ende der Treppe hingewiesen. Diese Reparaturphase hatte keine direkten Auswirkungen auf den Bestand des Tempels¹²³⁸.

II.2.3.1.5 Bodenbelag Vorhalle

Die abschließende Gruppe der antiken Substanz umfasst den Bodenbelag der Vorhalle. Es handelt sich hierbei um einen Plattenbelag aus Naturstein, welcher über einer rötlichen Mörtelbettung, vergleichbar jener in der Cella, gelegt ist. Das Gestein ist ein dichter Kalkstein mit einer leicht gräulichen Matrix (HTEMP 21). In diese eingebettet sind Graphit (schwarz), Eisenoxid (rostrot) und Kalksteinkörner (weiß, maximale Korngröße ca. 2 mm).

II.2.3.2 MODERNE MATERIALIEN – ANASTYLOSE 1957/1958

Die zweite Gruppe des vorhandenen Bestands umfasst sämtliche moderne Materialien, die im Zuge des Wiederaufbaus in den Jahren 1957/1958 eingebracht wurden. Die nicht im Zusammenhang der Anastylose stehenden Steine, welche sich im Museum befinden oder als Einzelobjekte im Grabungsgelände präsentiert werden, erfahren hierbei keine nähere Begutachtung, da an ihnen bis auf die Verklebung von Bruchstücken keine Restaurierungsmaßnahmen festgestellt werden konnten.

Hinsichtlich der Klassifizierung des modernen Bestands zeigt sich analog der historischen Materialien eine Dominanz sog. mineralischer Werkstoffe. Es existiert eine reiche Palette zementgebundener Massen, angefangen von den verschiedensten Betongusselementen für die Rekonstruktion fehlender Bauteile bis zu den diversen Ergänzungs- oder Mörtelmassen. Eine weitere Werkstoffklasse umfasst die Eisenelemente. Diese kamen entweder als statische Verbindungselemente zwischen den Werkblöcken oder als Bewehrungsstahl des Betons zu Einsatz. Für die Verklebung gebrochener Steinsubstanz wurde ein synthetischer Klebstoff verwendet, welcher ebenfalls eine eigene Kategorie bildet. Schlussendlich finden sich noch Reste von Holz als Zeugnisse des Arbeitsprozesses der Anastylose sowie die spätere Installation eines Beleuchtungssystems.

II.2.3.2.1 Beton

Der seit der Mitte des 20. Jahrhunderts sämtliche Bereiche der Bauwirtschaft dominierende Werkstoff Beton¹²³⁹ wird in der Regel über Rohdichte¹²⁴⁰, Festigkeit¹²⁴¹ und Zusammensetzung (Zement, Zuschlag) am ausgehärteten Material klassifiziert¹²⁴².

¹²³⁸ s. dazu Kap.I.7.1.3.

¹²³⁹ Naturstein Lexikon (2003) 41 s. v. Beton; Weber 2010, 13. Der Werkstoff Beton ist laut Definition eine Mischung aus Zement, Zuschlagsstoffen (Sand, Kies, Schotter etc.) und Wasser. Er unterliegt zunehmend Normen und Richtlinien, s. dazu Weber 2010, 117 f.; Pickhardt – Bose – Schäfer 2012, 8 f.

¹²⁴⁰ Entsprechend der Rohdichte unterscheidet man Leichtbeton (400–2 000 kg/m³), Normalbeton (2 200–2 500 kg/m³) und Schwerbeton (2 800–3 500 kg/m³). Dazu Pickhardt – Bose – Schäfer 2012, 40.

¹²⁴¹ Die in der Norm angegebenen Festigkeitsklassen beziehen sich auf ermittelte Werte der Druckfestigkeit an Würfeln und Zylindern mit definierten Kantenlängen. Dazu Weber 2010, 38.

¹²⁴² Zur Klassifizierung von Beton dient darüber hinaus eine Vielzahl weiterer Faktoren. Diese sind etwa die Art der Bewehrung, des Einbringens des Betons, des Verdichtens und die Oberflächenbeschaffenheit, der Ort des Mischens sowie die Konsistenz des Frischbetons, die Wasserdurchlässigkeit und seine Widerstandsfähigkeit gegenüber Umweltfaktoren (Expositionsklassen). Dazu Weber 2010, 13 f.; Pickhardt – Bose – Schäfer 2012, 40 f.

Laut Angaben von Franz Miltner wurden die Rekonstruktionen von Marmorstein in Beton ausgeführt¹²⁴³. Die untersuchten Betonproben zeigten ein weites Spektrum verschiedener Zusammensetzungen, sowohl hinsichtlich des Bindemittels (Zement) als auch der Zuschläge. Das angegebene Mischungsverhältnis der damaligen Restauratoren – Dykerhoff-Weißzement¹²⁴⁴ mit Marmorsplitt – konnte nur an den für den Betrachter gut sichtbaren Bereichen der Tempelrekonstruktion bestätigt werden (HTEMP 13 und 14).

Wie sich zeigte, bildet die bei Miltner angegebene Betonmischung den Großteil der sichtbaren Betonoberflächen der Schauseite, d. h. jener Areale, die dem Betrachter auf der Kuretenstraße zugewandt sind. Es handelt sich jedoch meist um eine nur wenige Zentimeter dicke Schicht. Im Inneren schließt eine andere, graue Betonmischung an. Einen Einblick in diese Arbeitsweise geben das Foto von der Herstellung der Türverdachung (Taf. 167, 1) sowie die einsehbare Oberseite eines Friesblocks der Vorhalle (HTEMP 14 – **086Re**). Weniger sichtbare Betonkonstruktionen wurden schließlich in gänzlich abweichender Zusammensetzung gefertigt. Die festgestellten Abweichungen betreffen sowohl das verwendete Bindemittel Zement als auch den gewählten Zuschlag.

Der Nachweis der unterschiedlichen Zemente wird anhand der mikroskopischen Untersuchung von Probe HTEMP 14 deutlich. Sie wurde an der Oberseite von Block **086Re** am Übergangsbereich von hellem zu grauem Beton genommen. Es zeigte sich, dass die optische Differenzierung auf zwei verschiedene Zementtypen zurückzuführen ist. Der Zuschlag ist einheitlich und besteht aus Marmorkörnern zwischen 0,7–1,2 cm Größe und einem Kalkfüller. Im optisch grauen Bereich des Betons zeigt sich der Zement im REM-BSSED-Bild¹²⁴⁵ in Form heller Klinkerreste (HTEMP 16, Klinker-Typ I). Diese haben eine Größe von bis zu 500 µm¹²⁴⁶ und entsprechen den optisch schwarzen Punkten in der Zementmatrix. Es handelt sich um einen sog. Portlandzement. Im Gegensatz dazu finden sich im optisch hellen Areal des Betons körnige, hell bis dunkle Klinkerreste (HTEMP 16, Klinker-Typ II). Die Klinker können in diesem Fall makroskopisch nur schwer wahrgenommen werden, sie zeigen sich unter dem Mikroskop aber ebenfalls bis zu 300 µm groß. Charakteristisches Merkmal ist das Fehlen von Eisenverbindungen (Fe), was den angewandten Zement als Weißzement klassifiziert.

So gut wie alle weiteren Betonproben des Tempels lassen sich in dieses vorgegebene Schema aus einem Portland- oder Weißzement einordnen (HTEMP 12–14. 16. K1–K5). Bei der Anastylose sind folglich zumindest zwei verschiedenen Zementtypen zum Einsatz gekommen.

Die zweite Abweichung zwischen dem vorgefundenen Beton und der von Miltner angegebenen Mischung besteht in der Zusammensetzung des Zuschlags. Während Miltner weißen Marmorsplitt als Zuschlag nennt¹²⁴⁷, ist dieser in vielen Bereichen durch andere Materialien ersetzt. Nach ihrer chemischen Zusammensetzung handelt es sich vorwiegend um Quarz, Feldspat, metamorphe Silikate (z. B. Phyllit), Dolomit und Ziegelbruchstücke. Diese »Fremdkörper« heben sich, durch ihre in der Regel dunklere Farbe, markant von den weißen Marmorkörnern ab (Taf. 167, 2; vgl. HTEMP 12. 15. 16 auf Taf. 118). Es handelt sich vermutlich um lokalen Bruchsand der Region Selçuk.

Auffallend hohe Anteile dunkler Zuschläge zeigen die *in situ* gegossenen Stützen der Fassade (zwei Säulenschäfte, ein Pfeiler), die Binderebenen in den rekonstruierten Arealen der Cellamauern sowie der massige Betonkörper in Höhe der Frieszone in den Anten und der Südwand

¹²⁴³ Miltner 1959d, 4.

¹²⁴⁴ Weißzement zeichnet sich durch das Fehlen eisenhaltiger Zementphasen aus (CAF). Das reine pulverförmige Bindemittel ist von fast reinweißer Erscheinung.

¹²⁴⁵ Anmerkung: Rasterelektronenmikroskop – backscattered electron (REM-BSSED) liefert eine digitale Abbildung auf Grundlage der Detektion der Primärelektronen.

¹²⁴⁶ Die Größe der Klinkerreste ist im Vergleich zu modernen Betonen mit ca. 20–30 µm Klinkergröße sehr deutlich. Dieser Umstand spiegelt die technische Entwicklung des Werkstoffs Zement in den letzten Jahrzehnten wider.

¹²⁴⁷ Miltner 1959d, 4.

des Pronaos. Sämtliche aufgezählten Elemente sind Areale mit wichtigen statischen Funktionen. Offensichtlich wurde über die Modifikation der Zuschläge versucht, die Betonqualität in diesen Bereichen zu verbessern. Der weiße, scharfkantige Marmorsplitt mit seinen negativen Eigenschaften bezüglich des Bedarfs an Zementleim und der Verdichtung des Betons ist gezielt durch die besser gerundeten, dunklen Zuschläge ersetzt. Maximale Korngrößen der dunklen Zuschläge erreichen bis zu 3 cm, wobei sich eine breite Korngrößenverteilung zeigt. Ein hoher Anteil besteht aus feinen Zuschlägen unter 0,6 mm (HTEMP 12. 16 auf Taf. 118).

Die folgende Einteilung des Betonbestands erfolgt je nach Herstellungsverfahren. Unterschieden werden: Schalungsguss vor Ort, der Guss von Fertigteilen in der Werkstatt sowie die Herstellung von Abformungen antiker Bauteile. Die erste Gruppe entspricht demnach einem Ort beton, die anderen beiden Gruppen sind sog. Betonzeugnisse¹²⁴⁸. Alle Betonelemente sind als Normalbetone (Rohdichte von 2000–2600 kg/m³)¹²⁴⁹ anzusprechen, welche der Expositions-klasse XC4¹²⁵⁰ ausgesetzt sind. Die wichtigsten Informationen zu Zementtyp und Zuschlägen sind in den Tabellen 4–6 zusammengefasst.

Das erste Herstellungsverfahren – der Schalungsguss *in situ* – ist gekennzeichnet durch seine Anwendung direkt vor Ort. Das heißt, die Betonelemente wurden an ihrem Bestimmungsort am Bauwerk gefertigt. Als Schalung dienten, je nach ästhetischen Anforderungen, einfache Holzbretterkonstruktionen oder aufwendiger gestaltete Formteile mit Profilierungen in Holz oder Gips. Im Fall der vor Ort gegossenen Säulen wurde z. B. eine vierteilige Form konstruiert. Die einzelnen Teile bestanden aus einem verstärkten hölzernen Rahmen und waren innen mit Gips ausgekleidet (Taf. 168, 1). Bei dieser Arbeitsweise entstanden feste Verbindungen zur historischen Substanz des Tempels. Im Minimalfall handelte es sich nur um den Boden des Betonteils, es konnte aber auch wie im Bereich der Nordwand des Pronaos deutlich in den antiken Bestand eingegriffen werden. Als Bewehrung der gegossenen Betonelemente kam Baustahl zum Einsatz¹²⁵¹.

Am ›Hadrianstempel‹ können insgesamt 15 Elemente unter den oben beschriebenen Kriterien der Klasse Schalung *in situ* identifiziert werden (Tab. 4 Taf. 119–126). Wie aus der Tabelle hervorgeht, handelt es sich durchgängig um Bereiche mit wesentlicher statischer Funktion. Es sind dies die Stützen und der westliche Architrav der Fassade, welche das Gewicht des Gebälks nach unten ableiten, des Weiteren die betonierten Ebenen auf Höhe der ursprünglichen zweiten und dritten Binderebenen an den Wänden des Pronaos. Diese haben eine stabilisierende Eigenschaft auf das Mauerwerk und dienen gleichzeitig als Auflageflächen für die Wandverkleidung. Die letzte Gruppe umfasst den Mauerabschluss der Anten und der Türwand. Der massive, aus mehreren Einzelementen hergestellte Betonkörper bildet das Türgewände, den Türsturz, und füllt praktisch die gesamte Frieszone aus. Er dient als Auflage des Gebälks der Fassade und des Tympanonreliefs über dem Portal.

¹²⁴⁸ Pickhardt – Bose – Schäfer 2012, 40.

¹²⁴⁹ Die gemessene Rohdichten der Kernbohrungen HTEMP K1–K5 liegen zwischen 2,0–2,25 g/cm³.

¹²⁵⁰ Die Expositions-klassen von Beton umfassen: X0 – kein Risiko, XC – Bewehrungskorrosion infolge Karbonatisierung, XD und XS – Bewehrungskorrosion durch Chloride, XF – Frost ohne und mit Taumittel, XA – chemischer Angriff, XM – Verschleißbeanspruchung, W – Betonkorrosion durch AKR. Die Klasse des ›Hadrianstempels‹ – XC4 – betrifft in diesem Zusammenhang durch Karbonatisierung bedrohte Betonelemente im Außenbereich mit direkter Beregnung und wechselnden nassen und trockenen Bedingungen. Pickhardt – Bose – Schäfer 2012, 46.

¹²⁵¹ s. dazu im Abschnitt zu den Metallen. Zur näheren Beschreibung der einzelnen Konstruktionen aus Bewehrungsstahl inklusive der Ergebnisse der elektromagnetischen Detektion mit dem Untersuchungsgerät Ferrosan PS 200, s. Kap. II.2.4.2.

Tabelle 4: Auflistung der einzelnen Elemente der Betonklasse – Schalung *in situ*

Bauteil Nr.	Beschreibung	Zuordnung – Architektur
017Se	westliche Säule, Betonguss, Weißzement, heller und dunkler Zuschlag	Säule/Pfeiler
020Se	östliche Säule, Betonguss, Weißzement, heller und dunkler Zuschlag	Säule/Pfeiler
024Se	östlicher Pfeiler, Betonguss, Weißzement, heller und dunkler Zuschlag	Säule/Pfeiler
029Ae	östlicher Architrav der Fassade, Hälfte Betonguss, Weißzement, heller und dunkler Zuschlag	Gebälk
071Me	Portalwand Westseite, horizontales Band über der mittleren Orthostatenreihe, Betonguss, Portlandzement, heller und dunkler Zuschlag	Binder
074Me	Portalwand Ostseite horizontales Band über der mittleren Orthostatenreihe, Betonguss, Portlandzement, heller und dunkler Zuschlag, eventuell eine Einheit mit 075Me	Binder
075Me	Ostwand, horizontales Band über der mittleren Orthostatenreihe, Betonguss, Portlandzement, heller und dunkler Zuschlag, eventuell eine Einheit mit 074Me	Binder
165Me	Portalwand Ostseite und Ostwand, Auflage der Friesen der Vorhalle, horizontales Band, Betonguss, Portlandzement, heller und dunkler Zuschlag	Binder
166Me	Portalwand Westseite und Westwand, Auflage der Friesen der Vorhalle, horizontales Band, Betonguss, Portlandzement, heller und dunkler Zuschlag	Binder
167Me	Westwand, Betonkörper hinter Fries 085Re, Auflagefläche des Gebälks der Fassadenarchitektur, Betonguss, Portlandzement, heller und dunkler Zuschlag	Binder
168Te	Türsturz, Betonguss, Weißzement, heller Zuschlag	Türsturz
169Me	Betonkörper auf Höhe der Frieszone Vorhalle, Betonguss, Portlandzement, heller und dunkler Zuschlag	Frieszone
172Te	Türgewände West, Betongusselement, Weißzement, heller Zuschlag	Türrahmen
173Te	Türgewände Ost, Betongusselement, Weißzement, heller Zuschlag	Türrahmen
174Me	horizontales Band, Cella-Südwand, Abschluss, Betongusselement, Portlandzement, heller und dunkler Zuschlag	Frieszone

Andere Bauteile wurden als Schalungsguss in der Werkstatt oder am Werkplatz hergestellt. Nach dem Aushärten des Betons wurde das Element ausgeschalt und wie ein Fertigteil oder ein Werkblock im Natursteinverband verbaut (Taf. 168, 2). Die herstellungstechnischen Parameter, wie Schalungsbau, Zusammensetzung der Betonmischung und der Bewehrung, sind im Wesentlichen als identisch mit dem Schalungsguss *in situ* zu bezeichnen. Die elf derartigen Betonelemente umfassen hauptsächlich Rekonstruktionen der Orthostaten des Pronaos (Tab. 5 Taf. 119–126). Diese Platten haben im Rahmen der Anastylose ästhetische Funktion, da sie das dahinterliegende Bruchsteinmauerwerk überdecken, welches offensichtlich als störend empfunden wurde.

Tabelle 5: Auflistung der einzelnen Elemente der Betonklasse – Schalung Werkstatt

Bauteil Nr.	Beschreibung	Zuordnung – Architektur
013Se	westlicher Pfeiler, Betonguss, Weißzement, heller Zuschlag	Säule/Pfeiler
039AFe	Architravfriesblock, Bestandteil des Bogens, Betonguss, Weißzement, heller Zuschlag	Gebälk
060Oe	Orthostatenblock, Betonguss, Weißzement, heller Zuschlag	Wandverkleidung
061Oe	Orthostatenblock, Betonguss, Weißzement, heller Zuschlag	Wandverkleidung
062Oe	Orthostatenblock, Betonguss, Weißzement, heller Zuschlag	Wandverkleidung
066Oe	Orthostatenblock, Betonguss, Weißzement, heller Zuschlag	Wandverkleidung
068Oe	Orthostatenblock, Betonguss, Weißzement, heller Zuschlag	Wandverkleidung
069Oe	Orthostatenblock, Betonguss, Weißzement, heller Zuschlag	Wandverkleidung
163Be	Basis unter östlicher Säule, Betonguss, Weißzement, heller Zuschlag	Säule/Pfeiler
164Se	westlicher Pfeiler, Zwischenstück im antiken Teil 110S, Weißzement, heller Zuschlag	Säule/Pfeiler
171Ke	Kranzgesims des Portals, Betonverguss, heller und dunkler Zuschlag	Kranzgesims

Die letzte Klasse der Betonelemente umfasst jene Werkstücke, deren Sichtflächen eine Kopie der antiken Originale darstellt (Tab. 6 Taf. 122–123; 125). Die prominentesten Beispiele im Rahmen der Anastylose sind die Abformungen der Friesblöcke der Vorhalle. Die Originale wurden aufgrund ihrer kunsthistorischen Bedeutung und des fortgeschrittenen Schadens nicht wiederverbaut, sondern in das Museum gebracht¹²⁵².

Um eine exakte Abformung der Oberfläche zu erhalten, bedienten sich die österreichischen Denkmalpfleger der Gummischmelzmasse VL 997¹²⁵³. Dieses elastische synthetische Produkt wurde über der Flamme erhitzt und so in flüssigen Aggregatzustand überführt. Anschließend goss man die Masse über die Oberfläche des zu kopierenden Werkblocks (Positiv), wo die Schmelzmasse abkühlte und erstarrte. Abschließend wurde dann noch eine Form, vermutlich aus Gips oder Holz, um den entstandenen elastischen Film gebaut. Der anschließende Betonguss erfolgte bei diesen Elementen ausschließlich mit Marmorsplitt als Zuschlag. Als Bindemittel findet sich Weißzement im oberflächennahen Bereich, dahinter schließt eine mit Portlandzement gebundene Masse an. Die Bewehrung besteht aus Baustahl mit einem Durchmesser von 6–8 mm in einer netzförmigen Struktur. Die Verwendung des 16 mm starken Stahls unterblieb, da keines der Elemente eine statische Funktion erfüllte. Die Abformungen haben eine Dicke von nur ca. 20 cm und sind deshalb aus technischer Sicht als Wandverkleidungen zu sehen. Die statische Funktion übernimmt in allen Fällen ein angrenzender Betonkörper der oben besprochenen Gruppe von Schalung *in situ*.

Neben den bereits erwähnten Friesblöcken der Vorhalle kam die Herstellung von Abformungen sonst nur im Bereich der Türrahmung des Eingangs zur Cella zum Einsatz (Taf. 168, 3–4). In diesem Fall handelt es sich jedoch nicht um Kopien antiker Steine, sondern es wurde ein Verlust an Gesteinssubstanz durch Reproduktion eines erhaltenen Teilstücks vervollständigt. Der Arbeitsablauf war durch diese Bedingung etwas aufwendiger als bei den Friesblöcken, denn es galt, zuerst die passenden Positive für die Form des Gusses herzustellen. Dafür wurde zuerst ein Teil des originalen Rahmenprofils abgeformt. Im konkreten Fall handelt es sich um ein ca. 1 m langes Stück der östlichen Türleibung (076T). In weiterer Folge wurde dann in der Werkstatt eine Vielzahl an Gipskopien dieser Abformung angefertigt und schließlich zu dem passenden Positiv zusammengesetzt.

¹²⁵² Miltner 1959d, 8: »[...] die Originale waren offenbar so starken Feuereinwirkungen ausgesetzt, daß sie ob ihrer Brüchigkeit nicht länger unmittelbaren atmosphärischen Einflüssen ausgesetzt bleiben dürfen.«

¹²⁵³ Miltner 1959d, 4.

Tabelle 6: Auflistung der einzelnen Elemente der Betonklasse – Abformung

Bauteil Nr.	Beschreibung	Zuordnung – Architektur
078Te	Türrahmen zum Innenraum, Betonguss, Weißzement, heller Zuschlag	Türrahmen
079Te	Türrahmen zum Innenraum, Betonguss, Weißzement, heller Zuschlag	Türrahmen
080Te	Türrahmen zum Innenraum, Betonguss, Weißzement, heller Zuschlag	Türrahmen
085Re	Relief, Westwand, Betonguss, Weißzement und Portlandzement, heller Zuschlag	Gebälk/Relief
086Re	Relief, Portalwand, Betonguss, Weißzement und Portlandzement, heller Zuschlag	Gebälk/Relief
087Re	Relief, Portalwand, Betonguss, Weißzement und Portlandzement, heller Zuschlag	Gebälk/Relief
088Re	Relief, Ostwand, Betonguss, Weißzement und Portlandzement, heller Zuschlag	Gebälk/Relief
124Te	Türrahmen zum Innenraum, Betonguss, Weißzement, heller Zuschlag, an 077T	Türrahmen

Die Oberfläche der Betonelemente wurde auf zwei unterschiedliche Arten gestaltet. Beide Fälle sind als Anpassung an die historischen Oberflächen anzusehen. Der erste Typ umfasst jene Oberflächen, welche keine weitere Bearbeitung nach der Ausschalung erfuhren. Sie sind gekennzeichnet durch eine dichte und in der Regel glatte Erscheinung (Taf. 167, 3). Derartige Oberflächen sind typisch für gegossene Elemente und werden als Sichtbetonoberfläche bezeichnet. Sie bestehen vorwiegend aus Zementleim, einer Anreicherung von Zement und feinsten Zuschlägen. Vereinzelt finden sich ebenfalls größere Poren, sog. Lunker¹²⁵⁴. Diese sind auf Luft-einschlüsse oder Wasserüberschuss beim Gießvorgang zurückzuführen. Anhand der Textur der Betonoberfläche kann in vielen Fällen ebenfalls die Art der Schalung abgelesen werden. Im Falle von Holz findet sich beispielsweise häufig ein Abdruck der Maserung auf der Betonoberfläche wieder. Bereiche ohne weitere Bearbeitung der Oberfläche finden sich am »Hadrianstempel« an sämtlichen Stellen, wo eine exakte Kopie antiker Originale oder eine glatte Oberfläche gefragt war. Derartige Elemente sind z. B. die Kopien der Friese und des Türrahmens, aber auch sämtliche Bauteile mit Profilierung wie Pfeiler, Säulen und Gebälksteine.

Der zweite Typ der Oberflächengestaltung ist die steinmetzmäßige Bearbeitung mit dem Zahneisen. Die Oberfläche erfährt dabei eine deutliche Reliefbildung und verliert ihren glatten und dichten Charakter. Die vorhandenen Zuschläge des Betons treten stärker in den Vordergrund. Derartige Oberflächen finden sich an den Elementen der Wandverkleidung der Vorhalle, den Türrahmen der Cella und an den großen Flächen der Cella-Südwand. So zeigt sich der Perlstab der Türrahmung mit intakter Zementhaut, während die seitlichen Flächen mit dem Zahneisen nachbearbeitet sind (Taf. 167, 4). Die Gestaltung entspricht in allen Fällen einer Anpassung an die bearbeiteten historischen Oberflächen. Des Weiteren lässt sich feststellen, dass sich große, in dieser Art bearbeitete Betonkörper besser in das ruinöse Erscheinungsbild der Anastylose einordnen als jene mit unbearbeiteten Oberflächen.

II.2.3.2.2 Mörtel

Mörtelmassen kamen im Zuge der Anastylose 1957/1958 in mehrfacher Hinsicht zum Einsatz. Die Unterscheidung erfolgt entsprechend der verschiedenen Anwendungsbereiche.

Mauermörtel wurde für die Instandsetzung und Rekonstruktion des Bruchsteinmauerwerks eingesetzt. Wie aus der Analyse des historischen Fotomaterials der Bauzeit abgelesen wer-

¹²⁵⁴ s. Kap. II.2.4.

den kann, erfolgte der Antrag großflächig über die gesamte Fläche der historischen Substanz. Anschließend wurden die Fugen nachgekratzt und bis unter das Steinniveau zurückgedrängt (Taf. 20). Der Mauermörtel hat graubraune Erscheinung und zeichnete sich im Rahmen der Befundung vor allem durch seine geringe Festigkeit aus, welche die Entnahme einer kompakten Probe schwierig gestaltete (Taf. 169, 1 HTEMP 19. 20). Der Zuschlag hat Größen bis zu 1,5 cm und zeigt breite Korngrößenverteilung. Der Rundungsgrad der Körner und die Zusammensetzung lassen auf einen lokalen Bruchsand schließen. Hauptbestandteile sind Quarz, Feldspat und eisenhaltige Mineralien. In geringem Anteil findet sich ebenfalls feinkörniger Marmor. Das Bindemittel des Mauermörtels konnte unter dem Mikroskop als Kalk identifiziert werden. Der Anteil von Zuschlag zu dem Bindemittel ist sehr hoch, sodass der Mörtel als stark gemagert bezeichnet werden kann. Das Mörtelgefüge zeigt sich hochporös mit einem geschätzten Porenraum von ca. 30 %, seine Festigkeit ist gering, und es sind deutliche Schwundrisse ausgebildet.

Die als Restauriermörtel bezeichnete Masse umfasst sämtliche angetragene Mörtel im Bereich der aus historischem weißem Marmor bestehenden Konstruktionen. Derartige Zonen sind vor allem die Fassade und die Vorhalle des Tempels (Taf. 169, 2). Wie die Befundung zeigte, wurde der Restauriermörtel zum Schließen von Fehlstellen, als Fugenmörtel und als Versatzmörtel angewandt (HTEMP 10. 19. 23. 24). Er hat demnach ausgeprägte konservatorische und ästhetische Funktion. In seiner Zusammensetzung ist der Restauriermörtel mit den vorher besprochenen Betonelementen nahe verwandt. Dieser Umstand wird besonders deutlich in Zonen, in denen es große Fehlstellen von mehreren Kubikdezimetern zu schließen galt. Der Restauriermörtel lässt sich dort praktisch nicht vom Beton unterscheiden und hat vergleichbare Farbigkeit und Zuschlagszusammensetzung.

In der Regel sind die Areale mit Restauriermörtelantrag aber von kleinerer Dimension. Die Verwendung von bis zu 1,5 cm großen Zuschlägen ist für die Verarbeitung demnach ausgeschlossen. Die untersuchte Probe HTEMP 24 des Fugenmörtels zeigt z. B. bis zu 3 mm große Zuschläge und weist eine breite Korngrößenverteilung auf. Hauptbestandteil ist Marmor, untergeordnet findet sich Quarz. Der Anteil an Zuschlägen im Vergleich zum Bindemittel ist sehr hoch, weshalb der Mörtel als abgemagert zu bezeichnen ist. Nachweise über das angewandte Bindemittel finden sich in Form von bis zu 150 µm großen Klinkerresten. Der Mörtel ist demnach, wie der Beton, zementgebunden. Von ihrem chemischen Aufbau her bestehen die Klinker aus den Zementphasen C_3S und C_2S . Der geringe Anteil an Eisen (Fe) lässt auf einen Weißzement schließen. Luftporen und Schwundrisse sind in geringem Ausmaß vorhanden, der Porenraum ist dementsprechend gering und die Festigkeit hoch. Der Mörtel zeigt sich allgemein in gutem Erhaltungszustand.

Eine spezielle Gruppe an Ergänzungsmassen findet sich an der Oberfläche von einzelnen Betonelementen. Es handelt sich hierbei um eine sehr dünn angetragene Schicht von 1–3 mm Stärke (HTEMP 22). Vermutlich diente sie als rein ästhetische Maßnahme zur Anpassung einzelner Betonoberflächen an den Originalbestand. Als Beispiel sei an dieser Stelle auf den östlichen Pfeiler verwiesen, der nachweislich mit dem Zahneisen überarbeitet wurde. Die unschönen Ausbrüche des Betons wurden offensichtlich mit der angesprochenen Masse homogenisiert. Eine detaillierte Untersuchung wurde nicht durchgeführt, es lässt sich aber im Querverweis bereits gewonnener Ergebnisse und anhand des Rissbilds von einer zementgebundenen Masse mit feinen Marmorzuschlägen ausgehen. Diese ist dem Restauriermörtel des Marmormauerwerks eng verwandt und wurde deshalb in der Kartierung in diese Gruppe einbezogen.

II.2.3.2.3 *Metalle*

Die eingebrachten metallischen Materialien der Anastylose umfassen ausschließlich Eisen. Differenziert wird zwischen den Elementen des Steinverbands, bestehend aus Klammern und Armierungen, Abstandhaltern und dem Bewehrungsstahl des Betons.

Die erste Kategorie Klammern und Armierungen findet sich im Bereich des Mauerverbands der großen Marmorquader. Die metallischen Elemente dienen dort der Verbindung der Werkblöcke untereinander oder stabilisieren gebrochene Steine (Taf. 170. 171, 1). In allen Fällen

haben sie bedeutende statische Funktion und sind entscheidende Faktoren der Standsicherheit der Konstruktion in Natursteinbauweise.

Der weitaus größte Anteil dieser Elemente besteht aus Baustahl mit einem Durchmesser von 8–16 mm. Mit hoher Wahrscheinlichkeit handelt es sich um zweckentfremdeten Bewehrungsstahl, welcher während der Anastylose an den Betonrekonstruktionen zum Einsatz kam. Des Weiteren finden sich einzelne Bandeisen. Diese haben eine Breite von 4,5 cm und eine Stärke von 5 mm. Eine Sonderstellung innerhalb dieser Klasse nehmen die Eisenbalken an der Unterseite des gebrochen Architravs **040A** ein. Wie sich anhand der Korrespondenz der damaligen Projektmitarbeiter¹²⁵⁵ und der Beobachtungen vor Ort zeigte, handelt es sich bei diesen um eine Zweitverwendung von Feldbahnschienen¹²⁵⁶. Dieser Umstand weist auf eine bestehende Ressourcenknappheit oder finanzielle Not hin, wie sie in der Nachkriegszeit durchaus realistisch scheint. Die Schienen waren durch das Vorhandensein einer Feldbahn für den Abtransport des anfallenden Grabungsschutts leicht verfügbar, sodass vermutlich keine zusätzlichen Kosten anfielen.

Zur Verankerung der Eisenelemente in den jeweiligen Werkblöcken dienten passende Ausführungen. In diesem Zusammenhang wurden für die Verklammerung der Steine untereinander teilweise die überlieferten antiken Ausnehmungen¹²⁵⁷ genutzt. Wo dies nicht möglich war oder im Falle von gebrochenen Bereichen, wurden diese im Zuge der Anastylose hergestellt. Für die stabile kraftschlüssige Verbindung der Klammern und Armierungen kam schließlich noch ein Klebstoff zum Einsatz. Angewandt wurden überwiegend ein Polyesterharz oder eine Schwefelverbindung. In Ausnahmefällen findet sich ein feinkörniger Zementmörtel mit hohem Bindemittelgehalt.

Die zweite Kategorie von Eisenelementen im Mauerverband der großen Werksteine sind sog. Abstandhalter. Diese befinden sich im Lagerfugenbereich der Konstruktion und wurden zum Einrichten der Steine im Zuge des Wiederaufbaus benötigt (Taf. 171, 2). Je nach Anforderung kamen dünnere oder dickere Eisenelemente zum Einsatz. Großteils handelt es sich um kurze Stücke von Bandeisen.

Die letzte Klasse der Kategorie Metalle umfasst die Bewehrungsseisen in Inneren der hergestellten Betonelemente. Ihre Funktion im Rahmen dieses Verbundwerkstoffs besteht in der Aufnahme vorhandener Zugkräfte, während der Beton die Druckspannungen übernimmt¹²⁵⁸. Um die in der Betonmatrix versteckten Eisen sichtbar zu machen, erfolgte die Abtastung ausgewählter Zonen mit einem Bewehrungssuchgerät (Messung 4307–4325)¹²⁵⁹. Ergänzt wurden diese Daten mit historischen Fotografien des Bauprozesses und der optischen Begutachtungen vor Ort (Taf. 172).

Das allgemeine Konstruktionsprinzip der Bewehrung zeigte sich hierbei wie folgt: Sie besteht aus Baustahl in zwei unterschiedlichen Stärken, einem dickeren mit 16 mm und einem dünneren von 6–8 mm Durchmesser. In der Regel durchziehen die stärkeren Stäbe das Bauelement in seiner maximalen Längenausdehnung, während die dünneren normal zu den Erstgenannten verlaufen und diese als Bügel umfassen. An den Kreuzungspunkten der Konstruktion sind die Stäbe mit Draht von 1 mm Stärke verbunden.

Beispiele für diese Ausführung der Bewehrung sind am ›Hadrianstempel‹ die Säulen und Pfeiler der Fassade. Diese bestehen aus mindestens vier Längseisen, welche in einem Abstand von 30–45 cm von Bügeln umschlossen sind (Messung 4309–4311, 4318–4319). Ein weiteres Beispiel ist Architrav **029A** (Messung 4317): Dieser wird von insgesamt sechs Längseisen

¹²⁵⁵ In einem Brief vom 29. September 1957 von Gerhard Miltner an Karl Heinz Göschl berichtet dieser: »Das mit den Schienen beim Architrav hat gut funktioniert, in Verbindung mit Akemie.«

¹²⁵⁶ Ein Rest der damaligen Feldbahn findet sich in Ephesos im Areal der Tetragonos Agora. Die dort einsehbaren Schienenelemente entsprechen nach DIN 5901 dem Typ S 10.

¹²⁵⁷ s. dazu Kap. II.2.3.1.

¹²⁵⁸ Stahl hat im Vergleich zu Beton einen um 6- bis 10-fach größeren Elastizitätsmodul. Bei Verformungen übernimmt der Stahl demnach den Großteil der Spannung. Rieche-Wehrle 2009, 62 f.

¹²⁵⁹ Gerät Ferroscan PS 200 der Fa. Hilti. s. Kap. II.2.2.

durchzogen und weist eine Bügeldistanz von 35 cm auf. Die der Unterkante zugewandten Längseisen sind hierbei in die angrenzende Hälfte des originalen Marmorblocks eingebohrt. Weitere Elemente mit analoger Ausführung sind die rekonstruierten Bereiche des westlichen Pfeilers der Fassade (**013Se** und **132Se**), das Profil des Türsturzes (**079Te**, Messung 4312) und der Betonkörper auf Höhe des Frieses an der westlichen Ante (**167Me**). Da an diesen Stellen eine Untersuchung mit dem Bewehrungssuchgerät unterblieb, kann jedoch keine detaillierte Aussage über den Aufbau gemacht werden.

Etwas komplizierter, aber dem beschriebenen Schema immer noch sehr nahe, sind sich auch die Betonelemente der Türrahmung – **172Te**, **173Te** und **168Te** – und das darüberliegende Element im oberen Bereich der Nordwand des Pronaos (**169Te**) konstruiert. Der wesentliche Aspekt besteht darin, dass die Bewehrungssysteme dieser nebeneinanderliegenden Elemente ineinander greifen und eine Einheit bilden. Die Verbindung zwischen Türlaibung und Türsturz erfolgt beispielsweise über die Längseisen des Türsturzes (Taf. 172, 2). Ansonsten finden sich keine Abweichungen. Im Detail besteht der Betonkörper **169Te** aus mindestens vier Längseisen und Bügeln im Abstand von 20–30 cm. Das Türsturzelement **168Te** zeigt im Vergleich dazu eine massive Bewehrung in Längsrichtung mit schätzungsweise 8 oder 9 cm dicken Bewehrungseisen (Messung 4312). Die Bügel stehen dort ebenfalls enger und haben einen Abstand von 20 cm. Die Türlaibungen (**172Te**, **173Te** – Messung 4320–4325) sind schließlich wieder zurückhaltender ausgeführt und haben drei Längseisen und eine sehr unregelmäßige Anordnung der Bügel im Abstand von 10–50 cm. Die Ursachen dieses etwas unsystematischen Aufbaus sind vermutlich die erhaltenen originalen Reste der Türlaibung im unteren Bereich, die in die Konstruktion mit eingeschlossen werden mussten.

Vergleichbar unsystematischen Bewehrungsaufbau aufgrund der Integration erhaltener Substanz zeigen in diesem Zusammenhang auch das Element **171Ke**, ein Teil des Kranzgesimses und das westliche Kapitel **014K**. Die Bewehrungen sind hierbei an die Bruchflächen der Originale angepasst und punktuell mit diesen über Bohrungen verbunden. Einen Einblick in diese Arbeitsweise gibt das historische Foto der Herstellung des Kranzgesimses (Taf. 167, 1). Eine nähere Untersuchung mit dem Bewehrungssuchgerät wurde nicht durchgeführt.

Schließlich finden sich am Tempel mit nur 8 mm starkem Bewehrungsstahl ausgeführte Betonelemente. Hierzu gehören die dem Bruchsteinmauerwerk vorgestellten Orthostaten (**060Oe**, **061Oe**, **062Oe**, **066Oe**, **068Oe**, **069Oe** – Messungen 4307–4308), deren Bewehrungsnetz aus insgesamt fünf Längs- und acht Querstäben besteht (Taf. 169, 3). Ihre tragende Funktion beschränkt sich auf das Eigengewicht. Hinzu kommen die sog. Binderelemente des Bruchsteinmauerwerks (**071Me**, **074Me**, **075Me**, **166Me**, **165Me**, **174Me** – Messung 4313–4314). Diese durchziehen in Form durchgängiger Schichten das Mauerwerk der Nordwand der Vorhalle und der angrenzenden Anten. Sie dienen der Stabilisierung des Mauerwerks und als Auflageflächen der Orthostaten und der abschließenden Frieze. Die auftretenden Kräfte auf diese Binderebenen sind vor allem Druckkräfte, welche vom Beton übernommen werden. Die Zugkräfte und folglich die Dicke der Bewehrungseisen ist gering.

II.2.3.2.4 Diverse Werkstoffe

Bei »diversen Werkstoffen« ist zu differenzieren zwischen Kunststoffen und Holz sowie einer modernen Lichtinstallation. Während die Kunststoffe bei der Anastylose gezielt und punktuell eingesetzt wurden, ist das Holz als Zeugnis des Arbeitsprozesses zu betrachten.

Entlang von Rissen einzelner Marmorblöcke findet sich am »Hadrianstempel« immer wieder eine gräuliche elastische Substanz (HTEMP 9. 11 Taf. 173, 1). Es handelt sich hierbei um einen Kunststoff, der offensichtlich für Verklebungen der Blöcke im Zuge der Anastylose zum Einsatz kam. Unter Einbeziehung der Angaben Miltners¹²⁶⁰ kann die Substanz als Steinkitt der Firma

¹²⁶⁰ Miltner 1959d, 2 f.

Akemie mit der Bezeichnung Universal + HS Paste identifiziert werden. In seinem Beitrag über den Wiederaufbau des Tempels schrieb Miltner 1959: »Akemie Universal + HS Paste, ein Steinkitt von äußerst schneller Klebefähigkeit, der ein wirklich zügiges Arbeiten ermöglicht; seine hervorragende Klebefestigkeit gestattet es zudem, in vielen Fällen, wo man sonst die Festigkeit des gealterten Marmors gefährdende Klammern oder unschöne Traversen einsetzen müßte, ohne solche das Auslangen zu finden.«¹²⁶¹.

Die Untersuchung von Proben des bei der Anastylose angewendeten Klebers mit dem IR-Spektrometer ergab ein Produkt auf Polyesterbasis mit feinem Siliciumoxid als Füllstoff und Verdickungsmittel sowie Pigmenten (HTEMP 9, 11). Diese Ergebnisse korrespondieren mit den Produktangaben des nach wie vor existierenden Betriebs der Fa. Akemie¹²⁶². Laut Hersteller ist das Produkt ein ungesättigtes Polyesterharz, welches durch die Zugabe von Dibenzoyl-Peroxyd zur Aushärtung gelangt. Das Verdickungsmittel wurde je nach Bedarf von den ausführenden Restauratoren beigegeben.

Neben der Anwendung des Steinkitts für Verklebungen findet sich das Polyesterharz auch in Rissen der Mauerkrone und an einzelnen horizontalen Fugen des Marmormauerwerks. Wie die Verteilung zeigt, besteht hierbei einerseits eine Verbindung zu den konstruktiven Eisenverbindungen. Auf diese Weise sollte das Eindringen von Regenwasser vermieden und das Eisen bestmöglich vor Korrosion geschützt werden (HTEMP 7). Das Polyesterharz besitzt hier einen relativ hohen Anteil an Verdickungsmittel. In mehreren Beispielen an der Mauerkrone wurde das Harz ebenfalls mit Pigment schwarz oder braun eingefärbt und enthält den Füllstoff Kalziumkarbonat (HTEMP 8). Andererseits dient die vollflächige Einbringung des Harzes in einzelne Fugen der Verbesserung der Standfestigkeit des Tempels und der Verbindung der Blöcke untereinander. Gezielt findet es sich in Schlüsselstellen der Konstruktion wie in sämtlichen Fugen der Pfeiler und Stützen der Fassade, im Bereich des Bogenansatzes sowie im Bereich der Architravzone.

Die gefundenen Holzreste sind als Zeugnis des Arbeitsprozesses der Anastylose zu interpretieren (Taf. 173, 2). Das Holz diente als Grundstoff der Betonschalung und wurde zum Einrichten der Werkblöcke verwendet. In der Regel wurden die temporären Holzelemente nach vollzogener Arbeit wieder entfernt, was an einzelnen Stellen jedoch verabsäumt worden war, sodass das Holz im Mauerverband verblieb.

Wie viele andere Objekte im Grabungsgelände ist auch der »Hadrianstempel« in ein modernes Beleuchtungskonzept eingebunden. Es handelt um ein von den türkischen Verantwortlichen installiertes System aus dem Jahr 2005 (Taf. 174)¹²⁶³. Die Lampen des Lichtsystems zeigen zwei verschiedene Ausführungen. Diejenigen am Boden sind fix in eine extra angefertigte, kubische Fassung aus einer mineralischen Mörtelmasse eingelassen. Der zweite Lampentyp wurde im ruinösen Mauerwerk eingefügt. Diese Lampen zeigen einen kubischen Fuß aus mineralischer Masse und weisen an einer Seite einen beweglichen Kopf auf.

Die notwendige Stromversorgung der Lampen untereinander erfolgt über 13 mm dicke, schwarze Kunststoffkabel. Die Kabel sind oberirdisch verlegt und laufen in der Regel in natürlichen Vertiefungen der Ruinenlandschaft (z. B. Fugen) oder in den Ecken. In nichteinsehbaren Zonen liegen die Kunststoffkabel offen. Einsehbare Bereiche zeigen im Gegensatz dazu eine Überdeckung der schwarzen Kabel mit ockerfarbiger Mörtelmasse. Für die Verteilung der Kabel sind im Netz immer wieder Verteilerdosen eingeschaltet. Diese haben ähnlich kubische Form wie die Bodenlampen.

Die Lichtinstallation am »Hadrianstempel« umfasst insgesamt sieben Verteiler, elf Lampen und ein Kabelsystem in der Vorhalle, der Cella und entlang der Mauerkrone. Je ein Verteiler befindet sich im Zwischenraum der Tetrarchenpostamente und den Fassadenstützen, drei sind

¹²⁶¹ Miltner 1959d, 2–4.

¹²⁶² Die Angaben stammen aus einem persönlichen Mailverkehr mit Dr. Ioannis Pomakis, Leiter der Anwendungstechnik, Fa. Akemie.

¹²⁶³ Vgl. Jahresbericht 2005, 337.

entlang der Ostwand im Bereich des Stiegenaufgangs zum Variusbad aufgestellt. Der eigentlichen Beleuchtung dienen fünf Bodenlampen in der Vorhalle, vier Bodenlampen in der Cella und zwei Lampen in der Mauerkrone der Fassade.

II.2.4 Zustandserfassung

Seit der Freilegung und Anastylose des ›Hadrianstempels‹ sind Pflege- und Erhaltungsmaßnahmen weitgehend unterblieben¹²⁶⁴. Die historische Substanz ist seit diesem Zeitpunkt wieder dem natürlichen Verwitterungsprozess freier Exposition ausgesetzt. Die Untersuchung dieser Spuren ist von besonderem Interesse, da sie an der Substanz deutlich sichtbar sind.

Verwitterung ist die Wechselwirkung von Materie mit der Umwelt, bei der sich die äußere Form oder die Phasenzusammensetzung des Materials verändert¹²⁶⁵. Die Einteilung der zerstörenden Verwitterungseinflüsse erfolgt im Rahmen der in der Konservierungswissenschaften üblichen Weise in:

- physikalische Verwitterung (Frost- und Salzsprengung, thermisch und hygrische Dehnung, mechanische Beanspruchungen)
- chemische Verwitterung (Lösungsangriff, Änderung der chemischen Zusammensetzung)
- biogene Verwitterung (chemische oder physikalische Verwitterung durch die Tätigkeit von Organismen)

Je nach Einfluss der verschiedenen Verwitterungsfaktoren kommt es bei freier Bewitterung zu der Ausbildung unterschiedlicher Schadensbilder. Wesentlich für das Verständnis ist, dass sich die unterschiedlichen Zerstörungsfaktoren nicht eindeutig voneinander abgrenzen und in freier Expositur stets gekoppelt auftreten¹²⁶⁶.

Im konkreten Fall des Tempels zeigt sich heute ein reiches Spektrum an Schadensbildern. Dieses erstreckt sich sowohl auf den vorhandenen historischen Bestand als auch auf die eingebrachten modernen Materialien der Anastylose. Der Erhaltungszustand muss in vielen Arealen als schlecht eingestuft werden, was bis hin zu einsturzgefährdeten Teilen reicht.

Die Gliederung der Zustandsanalyse erfolgt entsprechend den Gruppen der Bestandserfassung. In diesem Zusammenhang erstreckt sich die detaillierte Erfassung der Schadensbilder der Marmorsubstanz ausschließlich auf die auf Sichtflächen gearbeiteten Werksteine, während das Bruchsteinmauerwerk aufgrund seiner untergeordneten Bedeutung und auch aus zeitlichen Gründen nicht näher untersucht wurde. Als Einleitung in die jeweilige Materialgruppe sind zum besseren Verständnis der Schadensbilder die spezifischen Verwitterungseigenschaften kurz wiedergegeben. Eigene Kapitel beschäftigen sich im Anschluss mit den übergreifenden Themen der Statik, den akuten Gefahren sowie mit dem Wasserhaushalt des Bauwerks.

Der Zustandserfassung des Marmors als wichtigstem Baumaterial wird besondere Aufmerksamkeit geschenkt, da in die Anastylose nicht alle Blöcke integriert sind. Einige Marmorblöcke werden als Einzelobjekte am Grabungsgelände präsentiert, während sich die Friesblöcke des Pronaos im Ephesos Museum Selçuk befinden. Die Gegenüberstellung der unterschiedlichen Erhaltungszustände liefert wichtige Hinweise über die Verwitterungsdynamik und gibt Auskunft über das Schädigungspotenzial der verschiedenen Verwitterungsfaktoren. Anhand dessen ist es möglich, Aussagen für den Erhalt historischen Kulturguts in Bezug auf seine Lagerung zu treffen.

¹²⁶⁴ s. dazu Kap. I.1.2.

¹²⁶⁵ Meyers Großes Taschenlexikon XXIII Veni-Wel (1998) 86 s. v. Verwitterung; Wihr 1986, 39.

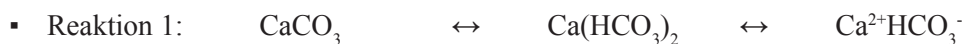
¹²⁶⁶ Snethlage 1985, 20 f.

II.2.4.1 HISTORISCHE SUBSTANZ

II.2.4.1.1 Marmor (*Anastylose*)

Marmor zeigt sich im Verwitterungskanon besonders empfindlich gegenüber dem Lösungsangriff saurer Flüssigkeiten und den thermischen Beanspruchungen¹²⁶⁷. In beiden Fällen liegt die Ursache dafür im Hauptbestandteil des Gesteins, dem Mineral Kalzit (CaCO_3), begründet.

Die Löslichkeit von Kalzit in reinem Wasser (pH 7) ist sehr gering und beträgt bei 25°C 13 mg/l. In der Natur wird das Wasser jedoch durch den CO_2 -Gehalt der Luft mit Kohlensäure angereichert und der durchschnittliche pH-Wert von Regenwasser beträgt 5,6¹²⁶⁸. Die Löslichkeit von Kalzit erhöht sich in diesem Fall auf 40 mg/l, und berechnete Marmoroberflächen zeigen bereits in kürzester Zeit eine Aufräuhung und eine Mikroreliefbildung¹²⁶⁹. Wie in Reaktion 1 ersichtlich, löst sich das Karbonat als Bikarbonat, welches wiederum in einem chemischen Gleichgewicht zu der vorhandenen Kohlensäure steht. Je höher der Kohlensäuregehalt des Wassers, desto höher die Löslichkeit von Kalziumkarbonat¹²⁷⁰.



Ähnlich dramatisch wirkt sich die Einwirkung weiterer Säuren aus. Erwähnt werden an dieser Stelle nur die häufig im Regenwasser anzutreffende Schwefelsäure (H_2SO_4) sowie die Salpetersäure (H_2NO_3), umgangssprachlich als ›saurer Regen‹ bekannt. Ihre Entstehung steht in direktem Zusammenhang mit der anthropogenen Umweltverschmutzung und den sauren Luftschadstoffen SO_2 und NO_x ¹²⁷¹.

Der zweite Schlüsselfaktor für die Verwitterung von Kalzit ist die thermische Beanspruchung. Hier zeigt das Mineral anisotropes Verhalten. Das heißt, bei Temperaturerhöhung dehnt sich der Kalzitkristall nicht gleichmäßig in alle Raumrichtungen aus, sondern es können – typisch für triklone Kristallsysteme – unterschiedliche Längenänderungen in zwei Achsen beobachtet werden. Die Ausdehnungskoeffizienten für Kalzit, von $\alpha_{11} = 26 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ parallel zur c-Achse und $\alpha_{22} = \alpha_{33} = -6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ parallel zu den a-Achsen¹²⁷² zeigt, dass es hierbei gleichzeitig zu einer Dehnung wie auch einer Schrumpfung des Kristalls kommt. Die Folge sind erhebliche Spannungen im Gesteinsgefüge an den Grenzflächen der einzelnen Kristalle, was schließlich zur Ausbildung von Mikrorissen und Entfestigung führt¹²⁷³. Im weiteren Verwitterungsfortschritt lösen sich die oberflächlichen Kalzitkristalle immer weiter vom Untergrund ab, bis sie die Bindung vollkommen verlieren und abfallen. Aufgrund der charakteristischen optischen Erscheinung dieses Ausbruchs einzelner Kalzitkristalle wird dieses Schadensbild allgemein als ›Zuckerzerfall‹ bezeichnet.

Ein wichtiger Aspekt der thermischen Verwitterung von Marmor ist die Tatsache, dass sich mit dem entstehenden Mikrorissnetz die Porosität des Gesteins gravierend erhöht¹²⁷⁴. Folglich dringt in den geschädigten Zonen weit mehr Wasser in das Innere des Gesteins ein, wodurch eine signifikante Verstärkung sämtlicher mit Wasser in Verbindung stehender Schadensbilder auftritt. Das Spektrum dieser Schäden ist äußerst vielfältig und umfasst sowohl Frost- und Salzsprengung, Lösungs- und Quellungsvorgänge als auch ein erhöhtes Wachstum von Mikroorganismen¹²⁷⁵.

¹²⁶⁷ Allgemein dazu Publikationen des Eureka-Projekts EU496 – EUROCARE EUROMARBLE (1990–2000), Siegesmund u. a. 1999a; zu thermischen Prozessen: Widhalm 1993, 53.

¹²⁶⁸ Benedix 2011, 124.

¹²⁶⁹ Grimm 1999, 206.

¹²⁷⁰ Okrusch – Matthes 2005, 277.

¹²⁷¹ Benedix 2011, 119. 122.

¹²⁷² Siegesmund u. a. 1999b, 245.

¹²⁷³ Tschegg – Widhalm – Eppensteiner 1999, 285.

¹²⁷⁴ Die Porosität von frischem Marmor ist in der Regel <1 % und die Wasseraufnahme dementsprechend gering. Verwitterte Marmore haben einen Porenanteil von bis zu 10 % mit einem erheblichen Anteil von kapillaraktiven Poren. Die Wasseraufnahme ist extrem erhöht. Grimm 1999, 203 f.

¹²⁷⁵ Grimm – Schwarz 1985, 73; Poschold 1990, 11.

Die vorgefundenen Schäden an der Marmorsubstanz wurden im Rahmen der Zustandserfassung je nach Schadenstyp in fünf Gruppen unterteilt: Verlust/Gefügeschädigung, biogener Bewuchs, Krustenbildungen, Risse und Verschmutzungen (Taf. 127–161).

Die erste Gruppe an Schäden umfasst sämtliche Verluste an historischer Gesteinssubstanz. Zunächst zeigt die lückenhafte Anastylose den Verlust ganzer Werkblöcke, die vermutlich nach dem endgültigen Einsturz des Bauwerks beraubt wurden¹²⁷⁶.

Zur Klassifizierung des Verlusts an der erhaltenen historischen Marmorsubstanz wird, dem Leitfaden vom Makro- zum Mikroskopischen folgend, zwischen dem Ausbruch größerer Bruchstücke sowie Oberflächenverlusten je nach Verwitterungsgrad auf einer dreistufigen Skala (1, 2 und 3) unterschieden. Hauptkriterium des Verwitterungsgrads ist, neben dem Ausmaß an Oberflächenverlust, der Grad an Entfestigung des Gefüges.

Ausbrüche und Fehlstellen

Unter Ausbrüchen oder Fehlstellen werden Verluste kompakter Bruchstücke des Gesteins unterschiedlichen Ausmaßes, deren Umfang von mehreren Kubikdezimetern bis zu kleinteiligen Ausbrüchen von wenigen Kubikzentimetern reicht, subsummiert. Die Ausbrüche zeigen eine charakteristische Bruchfläche (Taf. 175, 1–2). Als Schadensursache kommen vor allem mechanische Belastungen in Betracht, wie sie z. B. bei einem Zusammenbruch des Tempels, durch statische Belastungen oder menschliche Nutzung auftreten. Im Bezug der kleinteiligen Ausbrüche spielt parallel dazu die natürliche Verwitterung oder ein bereits bei der bildhauerischen Bearbeitung angelegtes Rissnetz eine Rolle. Große Bedeutung kommt in beiden Fällen den natürlichen Schwachstellen im Gesteinsgefüge des jeweiligen Marmors zu. Eine ausgewiesene Schwachstelle des Hauptbaugesteins vom Typ Ephesos I besteht beispielsweise in der mineralischen Inhomogenität. Die Kalzitgrundmasse wird hierbei immer wieder von dünnen Lagen oder Adern aus kleinen Dolomitkristallen durchzogen. Risse bilden sich bevorzugt im Grenzbereich dieser Zonen unterschiedlicher Zusammensetzung aus¹²⁷⁷.

Der Verschmutzungsgrad der vorgefundenen Bruchflächen gibt einen Anhaltspunkt über das Alter des Ausbruchs. Zeigt sich der blanke Stein in kräftig heller Farbe, so ist der Ausbruch in freier Bewitterung jüngeren Datums, schätzungsweise von wenigen Jahren bis zu einem Jahrzehnt, entstanden. Entspricht der Verschmutzungsgrad dem der erhaltenen Originaloberfläche, so ist der Ausbruch vermutlich vor der Anastylose erfolgt.

Betroffene Areale sind abstehende, dünnwandige Bereiche sowie sämtliche Kanten. Hierzu zählen auch sämtliche detaillierten Bildhauerarbeiten der Türrahmung, der korinthischen Kapitelle, des Gebälks mit der Frieszone, des Gesimses sowie die Darstellungen der Tyche im »syrischen Bogen« und die »Rankenfrau« in der Lünette. Ein Großteil der Oberflächen ist durch Ausbrüche und Fehlstellen geprägt. Laut den Auswertungen der Kartierung sind 8,6–22,4 % der Oberflächen von Ausbrüchen betroffen.

Oberflächenverlust 1

Für die Klasse »Oberflächenverlust 1« charakteristisch ist ein flächiger, nicht tiefgreifender Oberflächenverlust durch Abrieb ohne nennenswerte Entfestigungserscheinungen. Härtere Bereiche im Marmor, wie sie z. B. bei dem Typ Ephesos I in Form der Dolomitadern vorkommen, werden dadurch herauspräpariert (Taf. 175, 3). Bei mechanischen Belastungen der Oberfläche, z. B. mit der Hand, brechen keine Kalzitkörner aus dem Kornverband aus.

An exponierten Flächen sind die Ursachen dieses Abriebs Luftbewegungen in Kombination mit mitgeführten Staub- und Sandpartikeln oder Lösungsvorgänge durch abfließendes Regenwasser. Der Abrieb im bodennahen Bereich ist vor allem die Folge der historischen sowie der

¹²⁷⁶ s. dazu Kap. I.4.6.

¹²⁷⁷ s. dazu Kap. II.2.4.1 Schadenstyp Riss – gesteinsimmanent.

rezenten, vor allem touristischen Nutzung. Ein anschauliches Beispiel dieses anthropogenen Abriebs sind die ausgetretenen Bodenplatten. Der allgegenwärtige Kies am Grabungsgelände beschleunigt diesen Substanzverlust.

Das Schadenspotenzial dieser ersten Stufe des Oberflächenverlusts 1 kann als gering eingestuft werden. Eine Behandlung der Werksteine ist aus konservatorischer und restauratorischer Sicht nicht notwendig. Die Reduktion des rezenten anthropogenen Abriebs des Bodens kann langfristig nur über Änderungen in der touristischen Nutzung erfolgen. Oberflächenverlust 1 wurde nur im Rahmen der Zustandserfassung definiert, eine Aufnahme in die grafische Kartierung unterblieb aufgrund des geringen Schadenspotenzials.

Oberflächenverlust 2

Die Klasse ›Oberflächenverlust 2‹ stellt die Steigerung der vorangegangenen Schadensform dar. Der Verwitterungsangriff hat in diesem Stadium bereits zu Verlusten einzelner Kalzitkristalle geführt, und die Oberfläche zeichnet reliefartig das Korngefüge des Marmors nach (Taf. 175, 4). Zusätzlich zu dieser verstärkten Rückwitterung der Oberfläche kann eine einhergehende Entfestigung des Marmorgefüges festgestellt werden. Im Fall einer mechanischen Beanspruchung brechen immer wieder einzelne Kalzitkristalle von der Oberfläche aus.

Das dazugehörige Mikrorissnetz ist charakterisiert durch einzelne größere Risse von 80–200 µm Durchmesser, welche bis über 1 cm tief in das Marmorgefüge eindringen. Von diesen Rissen ausgehend, findet sich in der unmittelbaren Umgebung ein feineres Rissnetz von 20–50 µm. Ein vergleichbar feines Rissnetz bis zu einer Tiefe von zwei bis drei Kalzitkristalllagen existiert ebenfalls im Bereich der exponierten Oberfläche. Die Risse folgen den Korngrenzen oder den Spaltflächen der Kalzitkristalle (Taf. 176, 1 – vgl. HTEMP 4. 6. 25. 27. 28).

Der induzierende Verwitterungsfaktor dieses oberflächlichen Aufbrechens des Kalzitgefüges ist das thermisch anisotrope Verhalten der einzelnen Kristalle und die mineralogische Inhomogenität (Kalzit – Dolomit). In weiterer Folge greifen, je nach Expositur der Oberflächen, weitere Umwelteinflüsse an diesen gestörten Bereichen an. Bedeutend sind vor allem Kombinationen mit Lösungsvorgängen durch abfließendes Regenwasser und der biogenen Besiedlung der Gesteinsoberfläche.

Die betroffenen Areale konzentrieren sich auf die Zonen mit intensiver Sonneneinstrahlung. Es ist dies allen voran die Fläche der Mauerkrone mit einem Schadensausmaß von 20 % der Fläche. Weitere betroffene Areale sind die nach Süden ausgerichtete Fassade und die Rückwand des Pronaos sowie die nach Osten ausgerichteten Areale der Ost- und Westwand. Deutlich zeigt sich in diesen Zonen eine Verstärkung des Schadensausmaßes in Bereichen mit erhöhtem Feuchtigkeitseintrag und biogener Besiedlung. Besonders bedroht sind bildhauerisch aufwendig gearbeitete Oberflächen. Dort wurde bereits durch die Belastungen des Fertigungsprozesses ein Rissnetz angelegt.

Oberflächenverlust 3

Die charakteristischen Merkmale der höchsten Steigerungsform dieses Schadensphänomens sind der gravierende Verlust an Gesteinssubstanz im Ausmaß von mehreren Lagen der Kalzitkristalle und die deutliche Entfestigung des Marmorgefüges. Von den Oberflächen brechen schon bei der kleinsten Erschütterung einzelne Körner und kleinteilige Konglomerate aus (Taf. 176, 2). Das Rissnetz umfasst in diesem Fall das gesamte Volumen des jeweiligen Bereichs und ist deutlich auszumachen. Die Kalzitkristalle haben sich voneinander gelöst und ihre Bindungen sind sehr schwach. Das vorher beschriebene Schema des Oberflächenverlusts 2 – einzelne größere Risse (200 µm) und ein feinmaschiges Netz in der Umgebung (20–50 µm) – wird beibehalten (HTEMP 2. 5. 26).

Die Ursachen für diesen gravierenden Oberflächenverlust und die starke Gefügeschädigung sind identisch mit der vorherigen Klasse ›Oberflächenverlust 2‹. In den betroffenen Zonen treten

jedoch immer mehrere schädigende Umweltfaktoren gleichzeitig in Erscheinung. Die entscheidenden Faktoren sind die Sonnenexpositur, der Grad mikrobiologischer Besiedlung und das Vorhandensein angelegter Rissysteme durch die Intensität der bildhauerischen Bearbeitung.

Am ›Hadrianstempel‹ finden sich derartige Bereiche vor allem entlang von Ecken und Kanten und den reich skulpturierten Oberflächen. Dramatisch erscheint der Verlust vor allem in der Frieszone des Gebälks der Fassade. Hier besteht dringender Handlungsbedarf, unterbleibt eine konservatorische Behandlung, so ist im nächsten Jahrzehnt mit einem erheblichen Verlust an den Akanthusranken und den figürlichen Darstellungen zu rechnen.

Biogene Besiedlung

Mineralische Substanzen sind beliebte Substrate für eine umfangreiche Reihe von Mikroorganismen¹²⁷⁸. Je nach vorhandenen Umweltparametern wie Temperatur, Licht oder Feuchtigkeit kommt es zu einer Entwicklung charakteristischer Gesellschaften von Organismen¹²⁷⁹. Biogene Besiedlung unterschiedlichen Ausmaßes findet sich so gut wie an allen entnommenen Proben (HTEMP 1–6, 26–28) der Marmorsubstanz. Das Spektrum an identifizierten Organismen umfasst Flechten, Pilze und Cyanobakterien. Parallel dazu finden sich im Rahmen der Ruinenarchitektur ebenfalls viele Stellen, die ein Wachstum höherer Pflanzen ermöglichen.

Die Voraussetzung für die Besiedlung mit höheren Pflanzen findet sich am Tempel praktisch an allen Wänden in Form offen stehender Fugen und Risse wieder (Taf. 177). Die zerstörerische Wirkung des Wachstums höherer Pflanzen geht von dem entstehenden Wurzeldruck aus. Die Haftorgane suchen gezielt die Schwachstelle im Steinverband, meistens im Fugenbereich, und wachsen von dort in das umliegende Areal ein. Die entstehenden mechanischen Belastungen (Sprengwirkung) können im schlimmsten Fall bis zum partiellen Einsturz führen. Des Weiteren kommt es zu einem chemischen Angriff durch Ausscheidungsprodukte der Wurzelspitzen (H^+ -Ionen)¹²⁸⁰. Am ›Hadrianstempel‹ zeigt sich eine verstärkte Besiedlung an sämtlichen horizontalen Flächen, wo sich im Laufe der Zeit eine immer dicker werdende Schicht an Substrat angesammelt hat. Derartige Bereiche sind die Mauerkronen und vorstehende Gesimse sowie die gesamte Bodenzone. Bevorzugt werden geschützte Ecken und künstliche oder natürliche Vertiefungen (z. B. Fugen, Wolfslöcher) besiedelt.

Der Schwerpunkt der Besiedlung mit höheren Pflanzen liegt im Bereich des Bruchsteinmauerwerks, da sich zwischen den grob zugearbeiteten Bruchsteinen und dem erheblichen Mörtelanteil eine Vielzahl von Löchern und Vertiefungen im Fugenraum findet und damit an vielen Stellen ideale Wachstumsbedingungen gegeben sind. Dokumentierte Schäden sind die Zerstörung von Fugenmörtel und die Lockerung einzelner Bruchsteine. Dies tritt vor allem im Bereiche der Mauerkrone der Cellawände auf, wo die gesamte oberste Steinlage keine Haftung an dem Untergrund aufweist. Pflanzenarten, welche auf lange Sicht eine potenzielle statische Gefahr darstellen, finden sich ausschließlich in Form eines Feigenbaums im Nordwesten des Geländes. Zum aktuellen Zeitpunkt geht von dem regelmäßig geschnittenen Wurzelstock keine Gefahr aus, es sind auch keine Schäden vorhanden.

Die zweite Gruppe der biogenen Besiedlung umfasst die Gesellschaft von Mikroorganismen auf der Oberfläche des Marmors. Von seiner optischen Erscheinung her handelt es sich um einen vorwiegend dunkel gefärbten Überzug, der im Extremfall die gesamte Oberfläche eines Werksteins betrifft (Taf. 176, 3; 176, 5 HTEMP 1). Die Gesellschaft von Mikroorganismen ist charakteristisch für den Raum Ephesos und findet sich an sämtlichen karbonatischen Steinoberflächen im Grabungsgelände wieder. Bisher wurde in Ephesos noch keine naturwissenschaftliche Identifizierung der einzelnen Organismen vorgenommen.

¹²⁷⁸ Caneva – Nugari – Salvadori 1991, 3 f.

¹²⁷⁹ Clair – Seaward 2010, 1 f.

¹²⁸⁰ Caneva – Nugari – Salvadori 1991, 99 f.

Unter Einbeziehung von Forschungsarbeiten an anderen archäologischen Stätten des östlichen Mittelmeers kann davon ausgegangen werden, dass sowohl Pilze, Bakterien, Cyanobakterien als auch Flechten am Aufbau des Mikrohabitats beteiligt sind¹²⁸¹.

Dominierende und farbgebende Organismen sind die sog. Mikrokolonie bildenden Pilze, die sich im gesamten mediterranen Raum auf kalziumkarbonatischen Untergründen finden¹²⁸². Die Pilze sind extrem resistente Lebewesen gegenüber sämtlichen Umweltfaktoren (Temperatur, UV, Salz, pH, Chemikalien, Wasser). Sie wachsen sehr langsam in typischen knollenförmigen Kolonien von 50 und 400 µm (HTEMP 3–6). Die einzelnen Zellen haben eine Größe von 5 µm und sind in der Regel stark inkrustiert. Die mineralische Schutzhülle hat einen relativ hohen Anteil der chemischen Elemente Aluminium (Al) und Silicium (Si). Die Verbreitung am Substrat erfolgt über 1 µm dünne Zellfäden, welche in die Umgebung gestreckt werden. Gezielt dringen diese Zellfäden in vorhandene kleinste Vertiefungen oder Risse der verwitterten Marmoroberfläche ein und bilden dort neue Kolonien (Taf. 176, 4). Bei Probe HTEMP 2 ist das Wachstum entlang der Korngrenzen der einzelnen Kalzitkörner zu beobachten. Da sie den dunklen Farbstoff Melanin produzieren, sind sie die Hauptursache der dunklen Verfärbung der Marmoroberflächen. Ätzungen durch Ausscheidungsprodukte und Entfestigung durch hygrischen Druck bilden ein weiteres, von den Pilzen verursachtes Schadenspotenzial.

Neben den Pilzen sind Flechten die zweithäufigsten Organismen der Marmoroberflächen, von denen insgesamt drei verschiedene Gattungen unterschieden werden konnten. Am auffälligsten tritt eine weiße Krustenflechte, deren maximale Größe 3 cm im Durchmesser beträgt, in Erscheinung (Taf. 175, 4 HTEMP 1 und 4). Die Flechte wächst epilithisch, d. h., ihr Fruchtkörper dringt nicht in die Gesteinssubstanz ein, sondern bildet eine kompakte, krustenförmige Struktur an der Gesteinsoberfläche. Die Dicke des Flechtenkörpers beträgt ca. 0,5 mm, er zeigt einen schichtartigen Aufbau aus Mykobiont – Photobiont – Mykobiont. Die Substanz des Flechtenkörpers besteht zu einem großen Teil aus mineralischen, karbonatreichen Komponenten (HTEMP 1)¹²⁸³.

Des Weiteren konnten zwei endolithische Flechtenarten nachgewiesen werden (HTEMP 4). Der Fruchtkörper dieser Wuchsform ist im Inneren des Gesteins ausgebildet. An der Gesteinsoberfläche treten die Organismen nur durch ihre Vermehrungseinheiten in Erscheinung. Die Farbigkeit der Vermehrungseinheit ist bei einer der Flechten gelblich orange und bei der anderen bläulich schwarz.

Die dritte Gruppe an vorgefundenen Mikroorganismen umfasst die Cyanobakterien (HTEMP 2, 3, 5, 26). Diese wachsen wie die endolithischen Flechten ausschließlich im Inneren der Marmorsubstanz. Bevorzugt werden »große« Rissstrukturen der Werkblöcke und stark geschädigte Bereiche mit einem hohen Anteil an sekundärem Porenraum (Taf. 176, 6). Die Cyanobakterien dringen dort bis in eine Tiefe von 1,5 cm in das Innere des Gesteins vor. Das lebensnotwendige Sonnenlicht für die Photosynthese erhalten die Organismen durch die relativ hohe Durchlässigkeit von sichtbarem Licht des Kalzits. Darüber hinaus benötigen sie eine relativ hohe Feuchtigkeit, die in den großen, kapillaraktiven Rissen gegeben ist. Wasser wird dort rasch aufgenommen und über einen längeren Zeitraum gespeichert.

Das Schadensausmaß der mikrobiogenen Besiedlung ist äußerst komplex und grundsätzlich in physikalische und chemische Angriffe zu unterteilen. Physikalische Beanspruchungen kommen hierbei durch das Wachstum und Größenveränderungen der Organismen zustande¹²⁸⁴. So nehmen die im sekundären Porenraum der Marmorsubstanz lebenden Pilze und Cyanobakterien verfügbares Wasser in ihre Zellen auf und üben dadurch einen mechanischen Druck auf

¹²⁸¹ H. Sert – H. Sömbül – K. Sterflinger, Biodiversity and Biodeteriorative Potential of Microcolonial Fungi isolated from Antique Marble Monuments in Antalya/Turkey (Side, Perge, Termessos), Forschungsstudie der Österreichischen Orientgesellschaft, Austrian Center of Biological Resources and Applied Mycology (ACBR), Poster.

¹²⁸² Sterflinger – Krumbein 1997, 220.

¹²⁸³ Der Mykobiont der Flechten scheidet Oxalsäure ab, welche mit der mineralischen Substanz des Gesteins reagiert. Je nach chemischer Zusammensetzung des Gesteins bilden sich verschiedene Mineralien. Im Fall von Kalzit handelt es sich um Whewellit und Weddelit. Seaward 2010, 10.

¹²⁸⁴ Caneva – Nugari – Salvadori 1991, 26. 97.

die umliegende Steinsubstanz aus. Ähnliche Spannungen, durch Quellung und Schrumpfung, werden auch über die an der Gesteinsoberfläche wachsenden Krustenflechten ausgeübt. Die fest anhaftenden Organismen wurzeln jedoch in der Regel nicht tief im Gefüge und üben eine Art Scherbelastung auf die Oberfläche aus.

Der chemische Angriff durch die Mikroorganismen ist vor allem durch die Ausscheidung von Stoffwechselendprodukten bedingt. Diese Substanzen haben meistens die Zusammensetzung von Säuren¹²⁸⁵, gegenüber denen der Marmor besonders empfindlich ist. Die Folge des Säureeinflusses ist die Lösung des Karbonats. Die Organismen greifen an ihrer Wachstumsstelle das Gestein aktiv an und »arbeiten« sich so unter die Oberfläche der umgebenden Gesteinssubstanz hinein. Ist dieses Phänomen besonders deutlich ausgeprägt, wird von sog. bio-pits gesprochen (vgl. HTEMP 2).

Wesentlich für das Schadenspotenzial der mikrobiologischen Auflage ist eine starke Korrelation mit den Bereichen der entfestigten Marmorsubstanz. Es existiert praktisch keine Entfestigung ohne zusätzliche biogene Besiedlung. Offensichtlich bietet die gestörte Gesteinssubstanz mit ihren Rissen im Korngefüge, der höheren Porosität und ihrer rauen Oberfläche ideale Wachstumsbedingungen für die Organismen. Die Schädigung des Marmors erfährt durch die Mikroorganismen eine zusätzliche Beschleunigung.

Darüber hinaus existiert eine Verbindung der Besiedlungsintensität mit der Verfügbarkeit von Wasser. So sind an der Fassade jene Bereiche, in denen Regenwasser abläuft, um ein Vielfaches stärker von biogener Besiedlung betroffen. Analog verhält es sich bei Vertiefungen oder horizontalen Flächen, in denen sich nach Regengüssen Pfützen bilden. Auch dort ist eine verstärkte Besiedlung durch Mikroorganismen festzustellen.

Erde (Humus, Pflanzenreste, Bausubstanz)

Als Erde werden Ansammlungen von feinem Sand, von Zersetzungsprodukten abgestorbener Pflanzen (Humus) und verwitterter Bausubstanz benannt, die sich durch den natürlichen Bodenbildungsprozess bilden. Betroffene Areale sind horizontale Flächen sowie jegliche Art von Vertiefungen, wie sie sowohl bei Ausbrüchen und Fehlstellen als auch bei ursprünglichen Ausarbeitungen für Steinverbindungen auftreten (Taf. 173, 3; 177, 2; 178, 2).

Der feine Sand entspricht der Zusammensetzung des umgebenden Bodens und wird durch Windtransport eingebracht. Die Pflanzenreste stammen von direktem Bewuchs der Bausubstanz. Vermischt sind diese Elemente mit verwitterter Bausubstanz des Tempels, vor allem aus Fugenmasse und zerfallenem Marmorstein.

Es ist festzustellen, dass die Erde in vielen Fällen, beispielsweise im Bereich der Mauerkrone, einen Schutz für die darunterliegende Bausubstanz vor Umwelteinflüssen darstellt. Zugleich existieren aber auch negative Faktoren, und es muss genau abgewogen werden, welcher Effekt dominiert. Negativ ist etwa das höhere Wasserrückhaltevermögen, wodurch die Stelle nach Regengüssen länger feucht bleibt. Die Erde dient darüber hinaus als Substrat für die Verankerung von Wurzeln, das ein Wachstum höherer Pflanzen ermöglicht.

Im Bereich des Bodens von Vorhalle und Cella wurde das sichtbare Material zum großen Teil im Zuge der Anastylose bewusst eingebracht. Es diente der Gestaltung der großen Fehlstellen des ursprünglich mit Steinplatten gekleideten Bodens. Die massive Begehung des »Hadrianstempels« durch Touristen in den letzten Jahrzehnten hat schließlich zu einer Verteilung dieser Substanz auf der gesamten Fläche geführt. Erhaltene Bodenplatten sind unter dieser Schmutzschicht einer erhöhten Abrasion ausgesetzt.

¹²⁸⁵ Das Spektrum möglicher Säuren durch die Aktivität von Algen, Cyanobakterien, Pilzen und Flechten umfasst eine große Palette. Sie reicht von Kohlen-, Phosphor- und Schwefelsäure bis zu den mannigfaltigen organischen Säuren (z. B. Zitronen-, Oxal- oder Milchsäure).

Krustenbildungen

Krustenbildungen existieren am »Hadrianstempel« in typischer Art und Weise für frei exponierte Objekte aus Naturstein an den vor ablaufendem Regenwasser geschützten Bereichen. Sie sind die Folge einer Ablagerung von Staub- und Schmutzpartikeln der Luft¹²⁸⁶. Betroffene Zonen sind vor allem die Untersichten sowie Bereiche unter intakten Tropfnasen und vorspringenden Gesimsen. Die Farbigkeit dieser Krusten der Regenschattenzonen ist in Ephesos typischerweise rötlich (Taf. 178, 1; 179, 2–3).

Parallel dazu finden sich am Gebäude aber noch weitere Krustenbildungen, die nicht in dieses Konzept der Regenschattenseiten passen. Es handelt sich um rötlich braungraue Auflagen, die bereichsweise sehr dick ausgebildet sind (Taf. 179, 1). Ihr Auftreten zeigt eine Konzentration im bodennahen Bereich sowie eine sonst unregelmäßige Verteilung über den gesamten Tempel. Die Krustenbildungen sind das Ergebnis des langen historischen Verwitterungsverlaufs bis zur Ausgrabung im Jahr 1956 und stehen nicht in Verbindung mit der heutigen Expositur (Taf. 136–143).

Die mit der Bezeichnung »Kruste – rezent« versehene Auflage umfasst die typische Kruste in den Regenschattenzonen der heutigen Anastylose. Ihre Oberflächen nachzeichnende, dünne, rötliche Haut ist das Ergebnis des Verwitterungsangriffs seit dem Wiederaufbau (HTEMP 25). Im Querschnitt zeigt sie eine Stärke von ca. 100–150 µm und weist ein dichtes Netz aus einzelnen Kristallen auf. Hauptbestandteil der Krustenbildung ist Gips, dessen einzelne Kristalle ein dichtes Netz bilden. Vereinzelt finden sich auch kleine Körner von Kalzit oder Quarz in der Kruste eingebunden (HTEMP 25). Mikroorganismen treten üblicherweise in diesen Krusten nicht auf, die rötliche Farbigkeit der Krusten ist auf kleine Mengen an Eisenverbindungen zurückzuführen. Das Schadenspotenzial derartiger Krustenbildungen besteht einerseits in Form von Spannungen zwischen Kruste und Steinuntergrund, deren Ursache die unterschiedliche mineralische Zusammensetzung von Kruste und Stein ist. Andererseits wird durch die Oberflächenauflage auch die natürliche Wechselwirkung zwischen Stein und Atmosphäre beeinflusst. Dies betrifft vor allem das Verhalten gegenüber Wasser in flüssigem oder gasförmigem Aggregatzustand. Krusten stellen in diesem Zusammenhang häufig eine dichte Sperrschicht dar, d. h., sie verlangsamen die Wasseraufnahme und Austrocknung des Gesteins. Im konkreten Fall des »Hadrianstempels« lässt sich eine zerstörende Wirkung der Kruste ausschließlich in Bereichen des Wachstums über bereits geschädigtem Gefüge feststellen (Taf. 179, 2). Ist der Marmorstein in gutem Zustand, so kann, bis auf die rötliche Verfärbung, kein weiterer negativer Effekt nachgewiesen werden.

Bei der sog. historischen Krustenbildung handelt es sich um eine Sammelgruppe von Krusten, die vor der Ausgrabung entstanden ist. Theoretische Ursachen sind Regenschattenzonen eines ehemaligen Bauverbands, ein abgestorbener Bewuchs von Flechten, die lange Bodenlagerung oder Reste einer ursprünglichen Fassung. Zum Zeitpunkt der archäologischen Grabung lag das Bodenniveau ca. 4 m über dem heutigen Niveau der Kuretenstraße, sodass die Steine teilweise verschüttet waren. Dementsprechend unterschiedlich und komplex stellen sich die historischen Krustenbildungen dar: Die Proben HTEMP 3 und 27 zeigen an der exponierten Oberfläche eine kalziumkarbonatische Krustenbildung. Diese ist von schichtenförmigem Aufbau, hat eine Dicke von bis zu 500 µm und ist rotbraun gefärbt (Taf. 179, 1). Die Kruste zeigt Lösungserscheinungen, die mit dem heutigen biogenen Bewuchs und abfließendem Regenwasser in Verbindung gebracht werden können. Mit dem Gestein besteht eine intensive Verzahnung, vereinzelt finden sich Quarzkörner (Flugstaub) in die Kruste integriert. Auffallend ist auch, dass die Übergangsschicht zu dem Marmorgestein hin silikatreich ist. Die Morphologie dieser Kruste deutet auf einen biogenen Ursprung hin. Sowohl die Verzahnung mit dem Untergrund als auch die Oberfläche erinnern stark an den rezenten Flechtenbewuchs (HTEMP 1. 4). Vermutlich bildete sich die Flechte nach dem Einsturz oder im Zuge der sekundären Nutzung aus. Mit der fortschreitenden Verschüttung der Steine starben die Organismen schließlich wieder ab. Zurück blieben die mineralischen Komponenten der Flechte, vorwiegend Salze der Oxalsäure. Die kennzeichnenden

¹²⁸⁶ Künzel 1988, 65.

Mineralien, Weddellit und Whewellit, konnten mittels XDR-Analyse jedoch nicht nachgewiesen werden (HTEMP 3. 27) und stellen einen Widerspruch zur morphologischen Interpretation dar. Ein davon abgeleiteter zweiter möglicher Ursprung der Krusten ist die Ausfällung von Kalk aus abfließendem Wasser.

Eine weitere rötliche Krustenbildung zeigt die Oberfläche von HTEMP 28. Diese hat eine Stärke von 0–75 µm, die Hauptbestandteile sind Quarz, Schichtsilikate und Kalziumkarbonat. Die darunterliegende Marmoroberfläche weist keine Ätzspuren auf. Die Krustenbildung geht vermutlich auf die lange Lagerung im Erdreich zurück.

Risse

Das Spektrum der vorgefundenen Schäden durch Rissstrukturen reicht von unbeschädigt bis hin zu vollständig durchgezogen. Beispiele für den unbeschädigten Erhaltungszustand sind HTEMP 1 und 3, die ein ungestörtes Gefüge unterhalb einer Krustenbildung zeigen. Beide Proben weisen keine Rissstrukturen auf und haben fast keinen Porenraum ausgebildet.

Der negative Einfluss von Rissstrukturen beruht auf der Erhöhung der Wasserwegigkeit im Stein und der dadurch hervorgerufenen Schadensmechanismen. Des Weiteren stellen sie, im Fall der fortschreitenden Ausbreitung in das Innere der Gesteinssubstanz, einen erheblichen Festigkeitsverlust dar, sodass Materialversagen droht. Dieser Schadenstyp umfasst verschiedene Arten von ausgebildeten Rissstrukturen der Marmorsteine – anhand ihrer Ausprägung sowie der Schadensursache werden vier Schadensklassen unterschieden:

Die erste Klasse ausgebildeter Risse besteht aus jenen Strukturen, welche der Gesteinsschichtung¹²⁸⁷ des Marmors folgen – gesteinsimmanente Risse (Taf. 180, 1 HTEMP 4. 6. 25. 27. 28). Es handelt sich in der Regel um lange Einzelrisse mit unscharfen Grenzen aufgrund ausgebildeter Mikrorissysteme und kleinteiligen Ausbrüchen in der direkten Umgebung (s. z. B. HTEMP 28). Die Risse erfuhren keine Behandlung im Rahmen der Anastylose. Die Schadensursache besteht in der Regel in einer unterschiedlichen mineralogischen Zusammensetzung der Werksteine aus Marmor. Im Fall wechselnder Umweltparameter entstehen zwischen den ungleichen Mineralien Spannungen, die zur Rissbildung führen. Am »Hadrianstempel« zeigt sich dieses Phänomen am Marmor des Typs Ephesos I. Die Risse folgen gezielt den gesteinsimmanenten, dolomitreichen Zonen.

Eine weitere Schadensursache sind mechanische Belastungen, wie sie beispielsweise in Folge eines Zusammensturzes auftreten. Schichtungsgrenzen sind häufig Schwachstellen im Gefüge und definierte Sollbruchstellen bei hohen Belastungen¹²⁸⁸.

Am »Hadrianstempel« sind etwa ein Drittel der marmornen Architekturglieder von gesteinsimmanenten Rissen betroffen. Das Schadensausmaß ist jedoch trotz dieser hohen Anzahl relativ gering. Mithilfe der Ultraschalluntersuchung konnte nachgewiesen werden, dass sich der Großteil der Rissstrukturen auf den oberflächennahen Bereich bis zu einer Tiefe von 5 cm beschränkt. Des Weiteren war auch in der Antike der Einfluss der Gesteinsschichtung auf die Qualität des Natursteins bekannt und wurde bei der Errichtung berücksichtigt. Die Schichtungen verlaufen dementsprechend in der Regel im rechten Winkel zu den wirkenden statischen Kräften, d. h., sie sind horizontal ausgebildet. Bei dieser Nutzung treten selbst bei fortgeschrittenem Schadensverlauf keine Gefahren für die Standsicherheit auf.

¹²⁸⁷ Der Begriff Schichtung bezeichnet unterschiedliche Lagen in einem Gestein. Dieser Effekt tritt bei Sedimentgesteinen und Metamorphiten auf und leitet sich von unterschiedlichen Zusammensetzungen der einzelnen Schichten ab. Naturstein Lexikon (2003) 337 s. v. Schichtung.

¹²⁸⁸ Druck- und Biegezugfestigkeit sind wichtige technische Kennwerte von Naturstein. Gesteine mit einer ausgeprägten Schichtung zeigen je nach Ausrichtung der Schichtung starke Unterschiede der Biegezugfestigkeit. Diesem Umstand wird sowohl bei der Herstellung des Werkstücks als auch in Form der Ausrichtung im späteren Architekturverband Rechnung getragen. Bernhard 1996, 45.

Der idealen Ausrichtung der Schichtung im Bauverband sind jedoch aufgrund des Abbauverfahrens von Naturstein Grenzen gesetzt. Deshalb finden sich, vor allem bei Werkblöcken größerer Dimension, immer wieder Steine mit abweichender Orientierung. Beispiele am »Hadrianstempel« sind die erhaltenen Halbpfeiler (**027S**, **110S**), die Werkblöcke des Tympanons des Cellaportals (**095L–097L**) und ein Giebelblock (**042G**). Die Schichtung verläuft in diesen Fällen vertikal und ist parallel zu den Sichtflächen der Werksteine ausgebildet. Probleme ergeben sich hier vor allem im Bereich vorspringender Elemente, wie z. B. bei Gesimsen oder der plastischen Dekoration. Diese werden durch die sich ausbildenden gesteinsimmanenten Rissysteme vom Untergrund gelöst¹²⁸⁹ und drohen abzufallen. Je kleiner die Verbindung des abstehenden Elements zur Gesteinsmasse, desto stärker ist es gefährdet. Deutliche diesbezügliche Schäden zeigen besonders die exponierten Blöcke des Tympanons (**095L–097L** Taf. 180, 2).

Die zweite Klasse besteht aus langen Einzelrissen, die nicht mit der Marmorschichtung in Verbindung gebracht werden können. Die Risse zeichnen sich durch einen klar definierten Verlauf aus, der über das gesamte Volumen des jeweiligen Werkblocks deutlich ausgemacht werden kann. Das Mikrorissnetzwerk in der unmittelbaren Umgebung ist meist schwach ausgebildet (Taf. 180, 3–4 HTEMP 2. 5. 26).

Eine restauratorische Behandlung im Zuge der Anastylose fand nicht statt. Die Schadensursache der Einzelrisse kann auf starke Druck- und Zugspannungen infolge mechanischer Belastungen zurückgeführt werden. Mit wenigen Ausnahmen dürften diese vor allem im Zuge des Einsturzes der Bausubstanz aufgetreten sein. Die Häufung kurzer Einzelrisse an den grob gearbeiteten, nicht sichtbaren Oberflächen der Werksteine ist zusätzlich von der Steinmetztätigkeit beeinflusst. Neben diesen historischen Schadensursachen finden sich aber auch Risse jüngeren Datums. Sie entstanden im Zeitraum der rezenten Anastylose und sind auf die Korrosion konstruktiver Eisenelemente zurückzuführen.

Das Schadensausmaß von Einzelrissen ist mit jenem der vorherigen Klasse der gesteinsimmanenten Risse zu vergleichen. Obwohl ungefähr ein Drittel der Steine betroffen ist, beschränkt sich der Schaden größtenteils auf den oberflächennahen Bereich (bis 5 cm). Es besteht kein akuter Substanzverlust und keine Gefahr für die Standfestigkeit. Das Schadensausmaß kann als gering eingestuft werden.

Ausnahmen von dieser allgemeinen Tendenz sind diejenigen Risse, welche in den letzten Jahrzehnten neu entstanden sind. Derartige Risse ziehen oft tief in das Gesteinsgefüge und spiegeln einen aktiven Schadensprozess wider. Besonders betroffene Areale am »Hadrianstempel« sind die Werkblöcke **040A**, **053G**, **095L**, **099D** und **018K**. Im Fall der ersten vier Werkblöcke besteht die akute Gefahr des Absturzes größerer Bruchstücke¹²⁹⁰. Bei dem Kapitell **018K** droht eventuell ein Bruch und damit einhergehend ein möglicher partieller Einsturz des Tempels. Das Rissnetz verläuft diagonal durch den Werkblock und ist ein Spiegel der hier angreifenden Scherkräfte. Offensichtlich hält der geschwächte historische Werkstein der statischen Belastung des Eigengewichts nicht stand (Taf. 181, 1).

Gemeinsames Merkmal der Klasse der verklebten Risse ist ihre Behandlung im Zuge der Anastylose. Deutlich sichtbar ist der angewandte Klebstoff Polyester im Rissystem (Taf. 181, 2–4)¹²⁹¹. Die Werkblöcke wurden für die Wiederverwendung im Bauverband vermutlich aus Gründen der Standsicherheit derart bearbeitet. Die Schadensursache der Brüche ist auf mechanische Belastungen im Zuge historischer Zusammenstürze zurückzuführen. Wie den schriftlichen Quellen zur Anastylose entnommen werden kann, erfolgte die Klebung in der Regel ohne zusätzliche Stützkonstruktion¹²⁹². Nur bei zwei Architraven wurde hiervon eine Ausnahme gemacht:

¹²⁸⁹ Vgl. unten zu Schadensklasse Schollenbildung.

¹²⁹⁰ s. dazu Kap. II.2.4.3.

¹²⁹¹ s. dazu Kap. II.2.3.2.

¹²⁹² Miltner 1959d, 2–4.

Architrav **040A** ist auf der Unterseite durch zwei Eisenbalken unterstützt, **100A** zeigt Klammern an den Seitenflächen und enthält drei Dübeln.

Am »Hadrianstempel« finden sich insgesamt 15 Werkblöcke der aufsteigenden Architektur mit Verklebungen. In der Regel quillt das angewandte Polyesterharz an der Klebefläche oder der Rissstruktur hervor und die Umgebung ist mit Klebstoffresten verunreinigt (Taf. 181, 2). Das Polyesterharz zeigt sich in sichtbaren Bereichen mit deutlichen Verwitterungsschäden. Feststellen lässt sich eine Versprödung und eine schlechte Haftung an dem Gesteinsuntergrund. Dementsprechend hat sich der Klebstoff bereits an vielen Stellen gelöst und ein Sekundärrissnetz ist ausgebildet (Taf. 181, 4). Abfließendes Regenwasser dringt über den geschädigten Kunststoff ungehindert in den verklebten Riss ein. Weiters zeigen die verklebten Risse eine Vielzahl von Bereichen ohne Klebstoff. Diese sind auf eingeschlossene Luftblasen oder auf das Ausfließen des Klebemittels zurückzuführen. Beide möglichen Ursachen verweisen, unter Berücksichtigung der starken Verunreinigungen in der Umgebung, auf eine nicht ideale Anwendung des Klebstoffs. Offensichtlich waren die Konsistenz des Polyesterharzes zu flüssig und die Klebetechnik nicht ausgereift.

Zusammenfassend ergibt sich aus dieser Betrachtung des Schadensbildes eine denkbar schlechte Beurteilung des Zustands. Die Klebungen sind durchwegs als stark geschädigt, mit schwacher Klebekraft und als statisch bedenklich einzustufen. Bestätigt wird diese Einschätzung durch die naturwissenschaftliche Methode der Laufzeitmessung von Ultraschall. Demnach sind Schäden an drei von vier verklebten Rissen nicht nur an der sichtbaren Oberfläche, sondern auch in der Tiefe ausgebildet. Einen weiteren Beleg für den problematischen Zustand stellen auch die bereits abgefallenen, ehemals verklebten Eckbereiche des Postaments von Diocletian (**007I**) und des Kapitells des östlichen Pfeilers (**025K**) dar.

Die Schadensklasse Schollenbildung stellt die letzte zu nennende Gruppe von Rissen dar. Charakteristisch ist die Ausbildung eines weitreichenden Hohlraums zwischen Scholle und Untergrund, d. h., die betroffenen Areale haben großflächig ihren Kontakt zum Untergrund verloren. In der Regel erheben sich die Schollenbildungen über das Niveau der umgebenden Steinsubstanz oder stehen leicht vom Untergrund ab (Taf. 182, 1–2). Als Schadensursache kann der Verwitterungsfortschritt seit der Wiederaufstellung der Werksteine gelten. Dieser findet vor allem im Bereich bereits angelegter, nicht konservatorisch behandelter Einzelrisse oder gesteinsimmanenter Risse statt. Eine weitere Schwachstelle sind Bereiche mit integrierten Eisenelementen. Hier verursacht die einsetzende Korrosion eine Volumenvergrößerung des Eisens, und es bilden sich ein Riss und schließlich eine Scholle in der umliegenden Gesteinssubstanz aus. Diese Bereiche kompakter Gesteinssubstanz sind absturzgefährdet. Die Lokalisierung der Schollenbildungen erfolgte akustisch, durch das einfache Testverfahren des Abklopfens der Gesteinsoberfläche mit dem Meißelkopf. Die dabei induzierten Schwingungen erzeugen eine Resonanz in den Luftschichten von Hohlräumen und verursachen einen dumpfen Ton. Im Gegensatz dazu klingt ein »gesunder« Stein ohne markante Hohlraumbildung hell.

Die Auswertung der Kartierungsdaten (Taf. 153–160) zeigt folgende Tendenzen des Schadensausmaßes von Schollenbildungen: Allgemein sind abstehende fragile Bereiche, wie z. B. die plastische Gestaltung der Oberfläche oder Kanten, stärker betroffen. Des Weiteren stechen sieben Werkblöcke – **027S**, **040A**, **042G**, **053G**, **095L**, **099D** und **104T** – mit einer markanten Häufung an Schollen hervor. Die Ursachen sind im Fall von **027S** und **104T** die weitreichende Zerstörung des Marmorgefüges. Die Blöcke **042G**, **053G**, **095L** und **099D** zeigen eine aktive Verwitterung entlang bestehender Rissstrukturen (Taf. 182, 1). Die Schollenbildung an der Unterseite von Architrav **040A** ist die Folge der Korrosion der Eisenbalken (Taf. 182, 2)¹²⁹³.

¹²⁹³ s. dazu Kap. II.2.3.2.

Sämtliche Schollenbildungen sind als akut absturzgefährdet einzustufen und können sich jederzeit vom Untergrund lösen. Um ihren Verlust zu verhindern, sind restauratorische Sofortmaßnahmen dringend anzuraten¹²⁹⁴.

Verschmutzungen

Die Kategorie Verschmutzungen summiert eine Reihe von Oberflächenveränderungen mit vorwiegend ästhetischen Aspekten und geringem Schadenspotenzial. In direkter Verbindung zur touristischen Nutzung stehen die Klassen »Handschweiß« und »Kaugummi«. Bei den Klebe- und Mörtelresten handelt es sich um Oberflächenauflagen, welche auf die Arbeitsweise der Anastylose verweisen. Die vierte Klasse der Verschmutzungen ist die Kategorie Eisenverfärbung, eine intensiv rötlich gefärbte Oberflächenaufgabe aufgrund der Korrosion enthaltener Eisenelemente.

»Handschweiß« bezeichnet Areale der Marmoroberfläche mit speckigem Charakter und einer deutlichen Farbvertiefung (Taf. 183, 1). Dabei handelt es sich um Rückstände des anthropogenen Ausscheidungsprodukts Schweiß¹²⁹⁵, das mit dem hohen touristischen Aufkommen in den warmen Sommermonaten in Verbindung zu bringen ist. Damit korrespondiert die Lokalisierung der Verfärbungen im Bereich von ca. 100–180 cm Höhe über dem Bodenniveau. Im Hinblick des Schadensausmaßes von Handschweiß konnte mit Ausnahme der auftretenden Farbveränderung der Oberfläche keine weitere Schädigung festgestellt werden. Betroffene Areale konzentrieren sich auf die Postamente der Tetrarchen vor dem Tempel sowie den östlichen Bereich der Vorhalle und der Türlaibung. Insgesamt handelt es sich laut Auswertung der Kartierung um ca. 4 m² Fläche.

Bei einer weiteren Verschmutzungskategorie finden sich ca. 1–2 cm² große, runde, plastische Oberflächenaufgaben mit einer Schichtstärke von bis zu 2 mm (Taf. 183, 2), die als handelsübliche Kaugummis identifiziert werden konnten. Diese bestehen aus Polyvinylester, Polyethylen sowie Zucker und Aromastoffen¹²⁹⁶. Es wurden jedoch relativ wenige Stücke gefunden, und das Schadensausmaß ist vorwiegend von ästhetischer Natur. Hauptaspekt ist die Einwanderung löslicher Bestandteile des Kaugummis in die mineralische Substanz und die daraus resultierende Farbvertiefung.

Die Schadensklasse »Klebe- und Mörtelreste« umfasst sämtliche Verunreinigungen der Oberfläche, welche mit dem Herstellungsprozess der Anastylose in Verbindung stehen. Das Spektrum reicht von Rinnsuren aus Polyesterharz (Taf. 183, 3) über Reste jeglicher zur Anwendung gekommener Mörtelmischungen (Taf. 184, 1) bis hin zum Austritt von Zementleim aus der Schalung von Ortbetonelementen (Taf. 184, 2). Dementsprechend vielschichtig ist das Aussehen dieser Verschmutzungsklasse. Zementleim und Polyester bilden in der Regel dünne homogene Auflagen mit einer Schichtstärke von <1 mm. Mörtelreste sind dagegen häufig weit dicker und treten durch die enthaltenen Zuschläge deutlich körnig in Erscheinung. Eine gravierende Schädigung des Gesteins unterhalb von Klebe- und Mörtelresten konnte nicht festgestellt werden. Sie stellen demnach vor allem ein optisches Problem dar und stören die Ästhetik der antiken Oberflächen.

Die letzte Schadensklasse der Gruppe Verschmutzungen sind sog. Eisenverfärbungen. Kennzeichnend für diesen Schaden ist eine intensiv rostrote Verfärbung betroffener Stellen, die im Extremfall zur Ausbildung von Krusten führt (Taf. 185, 1–3). Dieses Schadenphänomen ist am »Hadrianstempel« nur in insgesamt vier Bereichen ausgebildet, das Schadensausmaß ist dementsprechend gering. Die Ursache lässt sich in allen Fällen auf die Korrosion eines Eisenelements

¹²⁹⁴ s. dazu Kap. II.2.4.3.

¹²⁹⁵ Schweiß ist eine wässrige Absonderung (99,5 % H₂O) mit einer Vielzahl an Salzen und organischen Verbindungen. Nebenbestandteile sind Duftstoffe. Der pH-Wert liegt in der Regel im leicht sauren Bereich. Meyers Großes Taschenlexikon IXX S-Sec (1998) 285 s. v. Schweiß.

¹²⁹⁶ Meyers Großes Taschenlexikon XI Jep-Kno (1998) 194 s. v. Kaugummi.

in der unmittelbaren Umgebung zurückführen. Die dabei entstehenden Korrosionsprodukte, umgangssprachlich als Rost bezeichnet, werden sehr leicht durch Wasser gelöst und transportiert.

II.2.4.1.2 *Marmor (Einzelobjekte und Museumsstücke)*

Das zweite Kapitel der Zustandsbeschreibung von Marmorsubstanz des ›Hadrianstempels‹ umfasst jene Objekte, welche nicht Teil der Anastylose an der Kuretenstraße sind. Es handelt sich, wie in der Bestandsaufnahme beschrieben, um insgesamt 23 Werkblöcke, von denen sich 19 heute als Einzelobjekte am Grabungsgelände von Ephesos finden und der freien Bewitterung ausgesetzt sind, während die vier Blöcke mit den Reliefdarstellungen nach ihrer Ausgrabung in das Ephesos Museum Selçuk überführt wurden¹²⁹⁷, wo sie heute im Rahmen der Dauerausstellung präsentiert sind.

Hauptaugenmerk dieses Abschnitts ist die Untersuchung des Erhaltungszustands von Einzel- und Museumsobjekten im Vergleich zu jenen der Anastylose. Die angewandten Begriffe für vorhandene Schadensbilder, deren Ausprägung und Ursachen decken sich in diesem Zusammenhang mit jenen des Marmors der Anastylose¹²⁹⁸. Die Begutachtung der Einzel- und Museumsobjekte erfolgte ausschließlich in visueller Form, während naturwissenschaftliche Untersuchungen und eine Kartierung unterblieben. In Hinsicht auf Qualität und Quantität des Schadensausmaßes werden allgemeine Tendenzen im Vergleich zur Anastylose formuliert.

Die der freien Bewitterung am Grabungsgelände ausgesetzten Einzelobjekte zeigen ein identisches Spektrum an Schadensbildern, bestehend aus den diversen Abstufungen an Verlusten, Rissen, Krustenbildungen, biogener Besiedlung und Verschmutzungen. Der einzig festzustellende Unterschied zur Marmorsubstanz der Anastylose besteht im Fehlen von Schäden, welche auf restauratorische Eingriffe zurückzuführen sind, wie schadhafte Verklebungen, Verschmutzungen durch Mörtel- oder Klebereste sowie Zerstörungen durch eingebrachte Eisenelemente. Im Hinblick auf das Schadensausmaß der Einzelobjekte ergaben sich folgende Erkenntnisse: Grundsätzlich ist der Erhaltungszustand der Werkblöcke sehr unterschiedlich. Entscheidend für die Schadensintensität ist, neben der vorhandenen historischen Schädigung der Werkblöcke, vor allem die Exposition gegenüber den Verwitterungsfaktoren. Diese steht bei den Einzelobjekten in direkter Verbindung zum Aufstellungsort und wird maßgeblich von den Parametern der direkten Umgebung mitbestimmt. So kann zwischen frei stehenden Objekten und jenen mit direkter Nachbarschaft zu weiteren Blöcken oder aufsteigender Architektur differenziert werden.

Die frei stehenden Objekte sind hierbei am intensivsten der Verwitterung ausgesetzt, denn schädigende Faktoren wie Wind, Regen und Sonneneinstrahlung finden an allen Seiten gute Angriffsmöglichkeiten, sie weisen das höchste Schadensausmaß auf. Ein Beispiel eines derart gelagerten Einzelobjekts befindet sich westlich des ›Hadrianstempels‹ (Taf. 186, 1). Der Block zeigt auf der gesamten exponierten Oberfläche Gefügeschädigung und Verluste in Kombination mit einer intensiven Besiedlung durch Mikroorganismen.

Im Gegensatz dazu sind Einzelobjekte in direkter Nachbarschaft zu weiteren Blöcken oder aufsteigender Architektur besser geschützt, da die schädigenden Verwitterungseinflüsse von der Umgebung abgemildert werden. Bedeutend für Marmorobjekte sind in diesem Zusammenhang vor allem der Schutz vor direkter Sonneneinstrahlung und Beregnung. So liegen die Blöcke **107D** und **108D** (Taf. 186, 3) in der Cella durch die umgebenden Mauern den Großteil des Tages im Schatten, sodass eine Entfestigung der Oberfläche praktisch nicht vorkommt.

Im Vergleich des Schadensausmaßes von Einzelobjekten mit jenen der Anastylose zeigen sich die am Boden gelagerten Einzelobjekte stärker von biogener Besiedlung durch Mikroorganismen betroffen (Taf. 186, 2–3). Die Ursache dafür besteht in der besseren Verfügbarkeit von Wasser, da jedes Einzelobjekt bei Regen eine Durchfeuchtung der Oberseite erfährt und Spritzwasser an

¹²⁹⁷ Miltner 1959d, 8.

¹²⁹⁸ s. dazu Kap. II.2.4.1.

die Seitenflächen gelangt. Des Weiteren kann sich das Wasser in der bodennahen Zone, aufgrund des Wasserspeichervermögens des Bodens und der geringeren Luftbewegung, nach Regenschauern länger halten. Die zweite auszumachende Tendenz besteht in dem verminderten Vorkommen rötlicher Krustenbildungen an Einzelobjekten. Da sich derartige Krusten nur im Regenschattenbereich ausbilden, liegt auch in diesem Fall die Ursache in einer erhöhten Belastung durch Regenwasser. Parallel dazu spielt auch hier die geringere Luftbewegung im bodennahen Bereich eine Rolle, und es kann davon ausgegangen werden, dass eine weit geringere Anzahl an Schwebstoffen an die Oberflächen gelangt.

Die dritte und letzte Tendenz besteht im unterschiedlichen Ausmaß der Schädigung durch Touristen. Im Vergleich zur Anastylose sind die Einzelobjekte stärker gefährdet, da sie mehr Raum für Interaktion bieten. So werden die Werkblöcke immer an den gleichen Stellen angegriffen, wie z. B. an Ecken und Kanten oder plastisch dekorierten Oberflächen. Darüber hinaus werden die am Boden liegenden Steine gern als Sitzgelegenheit oder als Podest zum Überblicken der Ruinenstätte genutzt (Taf. 187, 1). Sichtbare Spuren dieser Interaktion sind eine Vielzahl ›frischer‹ Ausbrüche und Fehlstellen, fettiger Bereiche durch Handschweiß sowie durch mechanische Belastungen abgewetzte Oberflächen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich der allgemeine Erhaltungszustand der Einzelobjekte und der Anastylose bis auf graduelle Unterschiede einzelner Schadensbilder weitestgehend gleicht. In beiden Fällen existieren sowohl gut als auch schlecht erhaltene Werksteine. Gravierende Schäden finden sich diesbezüglich vor allem in Arealen mit einer historischen Vorschädigung und aktiven Verwitterungsfaktoren im Rahmen der heutigen Exposition. Im Fall der Anastylose sind expositionsbedingte Unterschiede vor allem durch die Lage des Steins im Bauverband bestimmt, bei den Einzelobjekten ergeben sich die Unterschiede auf Grundlage des jeweiligen Aufstellungsorts.

Die im Ephesos Museum Selçuk präsentierten vier Friesblöcke der Vorhalle zeigen freilich das geringste Schadensbild. Trotz des geschützten Klimas im Museum umfasst die Palette an Schäden aber sämtliche Varietäten an Verlusten oder Entfestigungen und Rissen sowie diverse Verschmutzungen der Oberfläche und historische Krustenbildungen. Auffallendster Unterschied im Vergleich zu der Anastylose ist das Fehlen von Schäden aktiver, freier Bewitterung. Es fehlt demnach jede Form von biogenem Bewuchs, weder höhere Pflanzen noch diverse Mikroorganismen wie Pilze, Flechten oder Cyanobakterien sind vorhanden. Auch finden sich keine rezenten Krustenbildungen in den Regenschattenseiten. Augenscheinlich ist darüber hinaus das geringe Schadensbild aufgrund restauratorischer Eingriffe. Abgesehen von drei Verklebungen kleinerer Bruchstücke wurden offensichtlich keine weiteren Maßnahmen getroffen (Taf. 187, 2). Dementsprechend existieren auch keine Zerstörungen oder Verfärbungen durch die Korrosion von Eisen, und es finden sich keine Verschmutzungen durch Zementmörtel.

Zugleich bestehen bei den Friesblöcken jedoch spezifische Schadensbilder, bedingt durch das Museumsklima, die bei der Anastylose nicht vorkommen. So zeigen sämtliche Oberflächen eine gräuliche Auflage (Taf. 187, 3), bei der es sich um eine Staub- und Schmutzkruste handelt. Darüber hinaus sind punktuelle Verschmutzungen der Oberfläche mit Mörtelresten und Farbe auszumachen (Taf. 187, 4). Diese sind mit Verputzungs- und Renovierungsarbeiten an angrenzenden Mauern des Museums in Verbindung zu bringen.

Für das Schadensausmaß der Museumsobjekte ergaben sich bei der Untersuchung folgende Erkenntnisse: Die unterschiedliche Ausprägung von Verlust oder Entfestigung, Rissen und Krustenbildungen ist primär auf den Zeitraum vor der Ausgrabung zurückzuführen. Die Aufstellung im Museumsklima schützt die kunsthistorisch wertvollen Objekte wirkungsvoll vor Substanzverlust. Wesentlich für das Schadensausmaß sind demnach die Qualität des Marmorsteins, die Auswirkungen mechanischer Belastungen (z. B. Einsturz, Erdbeben) und die Einwirkung zerstörerischer Umwelteinflüsse vor der Wiederentdeckung 1956.

Das Charakteristikum der Schädigung von Friesblock **713R** mit der Darstellung des Androklos ist ein hohes Ausmaß an Ausbüchen und Fehlstellen (Taf. 307). Die Ursache dafür kann auf

die diversen Einstürze des Tempels zurückgeführt werden. Besonders augenfällig im Vergleich zu den anderen Friesblöcken ist, dass der Block nicht in seiner gesamten Länge vorliegt, sondern ein großes Stück fehlt¹²⁹⁹. Die weiteren Schäden der Entfestigung des Marmorgefüges, Risse und Krustenbildungen sind sehr gering ausgebildet. Dies spricht für die gute Qualität des Blocks und einen geringen Einfluss schädlicher Umwelteinflüsse. Offensichtlich war der Block sowohl im Bauverband als auch im zusammengestürzten Zustand gut vor Verwitterung geschützt.

Anders gewichtet zeigt sich die Schädigung der Friesblöcke **714R** und **715R**. Ausbrüche sind zwar auch hier vorhanden, jedoch handelt es sich ausschließlich um kleinteilige Verluste absteher, fragiler Bereiche. Deutlich ausgebildet sind vor allem Entfestigungserscheinungen des Marmorgefüges und eine Rückwitterung der Oberfläche. Beide Schäden verweisen auf einen relativ langen Zeitraum ungeschützter Exposition mit direkter Sonneneinstrahlung und Beregnung, vermutlich nach dem endgültigen Zusammensturz des Tempels und dem Verlust der schützenden Dachkonstruktion. Die plastischen Darstellungen sind aufgrund dieser Verwitterungserscheinungen in vielen Bereichen entstellt. Ehemals scharfe Konturlinien und Details sind verloren, und erkennbar ist in vielen Fällen nur die Form der Figuren (Taf. 188, 1–2).

Der vierte und letzte Friesblock **716R** zeigt als charakteristisches Schadensbild eine großflächige historische Krustenbildung. Die Kruste ist mehrschichtig und oberflächenverändernd ausgebildet (Taf. 189, 1). Vermutlich handelt es sich um einen Überzug aus sog. Kalksinter, der hier aus abfließendem Wasser ausgeschieden wurde. Einzelne Areale lassen unter der Krustenbildung Reste historischer Farbfassungen erahnen (Taf. 188, 3)¹³⁰⁰. Die historische Oberfläche ist unter dieser Krustenbildung geschützt. Weitere Schadensphänomene umfassen eine Vielzahl von Bereichen mit kleinteiligen Ausbrüchen und Entfestigung des Marmorgefüges. Das Schadensausmaß ist jedoch etwas geringer als jenes der Friesblöcke **714R** und **715R**, die Konturen und Details der plastischen Oberfläche sind an vielen Stellen gut erhalten. Die Entstehung der Schäden erfolgte nach dem endgültigen Zusammensturz des Tempels und dem Verlust der schützenden Dachkonstruktion.

Den Abschluss der Betrachtung des Schadensausmaßes nehmen die museumsspezifischen Schadensphänomene ein. Diese sind bei allen vier Werkblöcken gleich ausgebildet. Sämtliche Oberflächen zeigen eine relativ gleichmäßige Staub- und Schmutzauflage, und es finden sich vergleichbare Verschmutzungen mit Mörtel- und Farbreisen. Eine zerstörerische Wirkung konnte bei beiden Schadensphänomenen nicht erkannt werden, sie stellen rein ästhetische Beeinträchtigungen dar. Problematisch erscheinen im Rahmen der musealen Präsentation jedoch die kontinuierliche Berührung der Objekte durch Touristen und das Handling der Friesblöcke im aktuellen Museumsbetrieb (Taf. 189, 2; 190, 1–2). Beide Schadensphänomene führen zu Ausbrüchen von Gesteinssubstanz. Das Ausmaß derartiger Schädigung lässt sich sehr deutlich anhand der Farbigeit betroffener Areale erkennen. Kennzeichnend ist im konkreten Fall eine helle Bruchfläche (>bruchfrisch<) und das Fehlen oder das geringe Ausmaß der Staub- und Schmutzauflagen. Besonders bedroht sind Bereiche mit vorhandener historischer Schädigung und fragile, absteher Areale des plastischen Dekors.

Zusammenfassend zeigt der Vergleich des Schadensausmaßes der Museumsobjekte mit jenem der Anastylose folgende Ergebnisse: Erstens sind die Schadensbilder Risse, Verluste und Entfestigung sowie mehrschichtige Krustenbildungen in beiden Fällen historisch bedingt. Das heißt, vorhandene Unterschiede der Schadensausbildung einzelner Werkblöcke können im Wesentlichen auf den Zeitraum vor der Ausgrabung 1956 zurückgeführt werden. Zweitens sind in beiden

¹²⁹⁹ Nach heutigem Wissenstand erscheint folgendes Szenario am wahrscheinlichsten: Die maßgebliche Schädigung erfolgte im Zuge des Einsturzes der westlichen Fassade im 4. Jh. Vermutlich brach hierbei ein großes Stück des Steins ab oder wurde stark beschädigt. Im Anschluss daran kam es zum Wiederaufbau des Tempels. Das erhaltene Stück des Friesblocks **713** erfuhr hierbei eine Zweitverwendung, wobei das beschädigte Ende mit dem Spitzstein grob geglättet und der Block gekürzt wurde.

¹³⁰⁰ Eine Bestätigung für diese Vermutungen konnte leider nicht erbracht werden, da einer Entnahme von Probenmaterial nicht zugestimmt wurde.

Fällen die von aktiver Schädigung besonders bedrohten Zonen meist Areale mit historischer Vorschädigung. Drittens besteht jedoch ein deutlicher Unterschied im Hinblick auf die rezente Schadensdynamik. Im Rahmen des Museums ist diese sehr gering und wird ausschließlich durch die Berührung von Touristen und dem Umgang mit den Blöcken im Museumsalltag (Renovierungsarbeiten, Handling) bestimmt. Im Gegensatz dazu ist die Dynamik der Schädigung der Anastylose viel höher. Die Berührung von Touristen ist hier nur ein Randthema, entscheidend sind dagegen die mannigfaltigen externen Verwitterungsfaktoren wie Sonneneinstrahlung, Regen und Wind sowie Schäden eingebrachter moderner Materialien des Wiederaufbaus.

II.2.4.1.3 Bruchsteinmauerwerk

Bei der Zustandsbeschreibung des Bruchsteinmauerwerks gilt es prinzipiell zwischen zwei Aspekten zu unterscheiden: in den individuellen Erhaltungszustand der angewandten Materialien und in den Zustand des Mauerverbands. Hier soll nur der erste Aspekt betrachtet werden, eine Zustandsanalyse des Mauerverbands findet sich im übergreifenden Kapitel zur Statik.

Der allgemeine Erhaltungszustand der historischen Substanz des Bruchsteinmauerwerks kann als relativ gut eingestuft werden. So zeigt sich fast der gesamte Bestand an Bruchsteinen und Ziegeln ohne sichtbare Schädigung. Vereinzelt finden sich Risse, es drohen kleine Schollen auszubrechen, oder das Gefüge zeigt leichte Entfestigung. Eine genauere Betrachtung der einzelnen »Steine« des Mauerwerks wurde aufgrund dieses geringen Schadensausmaßes als nicht notwendig eingestuft. Des Weiteren besteht die Hauptmasse aus dem Gestein Marmor, und es sei bezüglich der Schadensphänomene auf die Zustandsanalyse der Marmorblöcke verwiesen¹³⁰¹.

Nähere Betrachtung finden ausschließlich die antiken Mörtelmassen, der Mauermörtel und der Hinterfüllmörtel. Entscheidend hinsichtlich der Verwitterungsresistenz und der Schadensausbildung sind bei diesen kalkgebundene Mörtelmassen mehrere Aspekte. Erstens die Qualität des Kalkmörtels an sich. Diese wird bestimmt durch die Natur des angewandten Kalks und der Zuschläge sowie deren Verhältnis im Frischmörtel. So existiert das Bindemittel Kalk in mehreren verschiedenen Variationen als trocken gelöschter Kalk ($\text{Ca}[\text{OH}]_2$), Sumpfkalk ($\text{Ca}[\text{OH}]_2$), hydraulischer Kalk oder Kalk mit hydraulischen Zuschlägen. Jede dieser Varianten hat verschiedene Endprodukte zur Folge. Im Rahmen rezenter Untersuchungen wird dieser Umstand mit der kristallografischen Struktur der Kalke in Verbindung gebracht, welche im Zuge der Erhärtung (Karbonatisierung¹³⁰²) sehr unterschiedliche Kalziumkarbonatkristalle liefern¹³⁰³. So hat trocken gelöschter Kalk im Vergleich zu Sumpfkalk die Vorteile einer geringeren Schwundrisbildung, eine damit in Verbindung stehende geringere Porosität, eine bessere Reaktionsfähigkeit mit Hydrolefaktoren und eine bessere Selbstheilung¹³⁰⁴. Des Weiteren weisen Kalkmörtel mit hydraulischen Komponenten eine größere Festigkeit als reine Kalkmörtel auf¹³⁰⁵. Davon abgeleitet eignen sich hydraulische Mörtel besser für die Errichtung statisch belasteter Elemente, wie z. B. Mauern, während sich Sumpfkalk für die Herstellung von Verputz bewährt.

Entscheidende Faktoren der Zuschlagszusammensetzung sind die Kornform, Korngröße und Korngrößenverteilung¹³⁰⁶. Sie beeinflussen den Bindemittel- und Wasserbedarf des Frischmörtels, sie sind entscheidend für ein dichtes Mörtelgefüge und das Abfangen von Schwundrissen.

¹³⁰¹ s. dazu Kap. II.2.4.1.

¹³⁰² Unter Karbonatisierung wird die Reaktion des Kalziumhydroxids ($\text{Ca}[\text{OH}]_2$) mit dem Kohlendioxid der Luft (CO_2) verstanden. Dieser Prozess benötigt Wasser und verläuft wegen des geringen CO_2 -Gehalts der Luft (ca. 0,04 %) sehr langsam. Die Karbonatisierung beginnt an der Oberfläche und setzt sich mit der Zeit in das Innere fort. Benedix 2011, 309 f.

¹³⁰³ s. dazu Liebig – Althaus 2006a, 116–126; Liebig – Althaus 2006b, 29–38; Elert u. a. 2006, 39–55.

¹³⁰⁴ Eiden 2011, 17.

¹³⁰⁵ Domasłowski 2006, 139.

¹³⁰⁶ Die Charakteristika der Zuschläge und ihre Beeinflussung im Rahmen künstlich hergestellter Mörtelmischungen werden in Kap. II.2.4.2.1 näher beschrieben.

Je nach dem Verhältnis von Bindemittel und Zuschlag spricht man von sog. fetten Mörteln (mit einem hohen Bindemittelgehalt) oder ›mageren‹ Mörteln (mit niedrigem Bindemittelgehalt).

Weitere wichtige Aspekte des Erhaltungszustands der Mörtelmassen bestehen in Form ihrer Wechselwirkung mit den vorhandenen Verwitterungsfaktoren. Im Fall des ›Hadrianstempels‹ handelt es sich durchgehend um der freien Bewitterung ausgesetzte Mörtelmassen. Entscheidend bei hochporösen Substanzen, wie sie Kalkmörtel darstellen, ist vor allem die Reaktion mit Wasser. Diese wird maßgeblich über die ausgebildete Porenraumgeometrie gesteuert. Besonders wichtig für die Resistenz von Kalkmörteln sind hierbei sog. Selbstheilungsprozesse und die rasche Trocknung. Tonige Bestandteile im Mörtel machen sich in der Regel durch ihre Quell- und Schrumpfbewegung sowie eine langsame Austrocknung negativ bemerkbar und können Schäden verursachen.

Ein weiterer Verwitterungsfaktor mit großem Schadenspotenzial ist das Auftreten sog. Schadsalze. Diese entstehen vorwiegend aus eingebrachten sauren Schwefel- oder Stickstoffverbindungen, welche mit adäquaten Partnern im Kalkmörtel reagieren (z. B. CaCO_3 , Alkaliminerale mit K und Na, MgCO_3). Die neugebildeten kristallinen Gebilde sind in der Lage, einen hohen Sprengdruck im Inneren auszuüben, und führen zur Auflockerung und Zerstörung des Mörtelgefüges¹³⁰⁷. Der hydrophile Charakter der Salze führt ebenfalls zu intensiven Reaktionen. Die Folgen sind ein z. T. erheblicher Eintrag von Feuchtigkeit aus der Luft sowie die ständige Änderung der Kristallstruktur mancher Salze bei schwankender Luftfeuchtigkeit¹³⁰⁸.

Der antike Mauermörtel des Bruchsteinmauerwerks präsentiert sich an der überwiegenden Mehrheit der zugänglichen Stellen in einem sehr guten Erhaltungszustand. Er ist durchgängig hart, kompakt und ohne nachzuweisende gravierende Schädigung. Dieser Umstand lässt sich vor allem auf die gute Zusammensetzung zurückführen. Die Zuschläge zeigen eine gute Korngrößenverteilung, und der trocken gelöschte Kalk hat mit den Ziegelbruchstücken zur Bildung stabilisierender Hydraulefaktoren geführt. Die Reaktion zwischen Kalk und Hydraulefaktoren konnte im Grenzbereich der Ziegelzuschläge sehr deutlich in Form eines 200 µm dicken Reaktionssaums dokumentiert werden (HTEMP 17).

Einer der wenigen leichteren Schäden besteht in einem gewissen Anteil an Schwundrissen (HTEMP 17). Diese sind mit der Trocknung und Aushärtung des Mörtels in Verbindung zu bringen und typisch für kalkgebundene Systeme. Die Schwundrisse werden sehr gut von den Zuschlägen abgefangen und haben geringe Ausdehnung von unter 1 cm. Das Gefüge ist dementsprechend in gutem Erhaltungszustand und zeigt keine gravierenden Entfestigungserscheinungen. Die exponierte Oberfläche ist von einer dünnen Kruste aus Luftschwebstoffen überzogen oder zeigt geringe Besiedlung mit Mikroorganismen. Sie übt keine erkennbaren negativen Auswirkungen auf den Mörtel aus und stellt eine rein ästhetische Beeinträchtigung dar.

Die einzig nennenswerte Gefahr für den erhaltenen Mörtelbestand existiert im Wachstum höherer Pflanzen. Diese siedeln an vielen kleineren und größeren Vertiefungen und Fehlstellen der Mauer. Die Wurzeln der Organismen dringen in Risse, Hohlräume und entfestigte Bereiche des angrenzenden Mörtels ein (Taf. 177, 2). Es kommt dabei zu einem Druckaufbau sowie einem chemischen Angriff durch saure Ausscheidungsprodukte. Die Folge ist ein kontinuierlicher Substanzverlust in der Umgebung des Wachstumsorts.

Ganz im Gegensatz zum Mauermörtel muss der Erhaltungszustand der vorhandenen Reste des Hinterfüllmörtels als schlecht eingestuft werden. Der Mörtel ist weich, von Rissen durchzogen und deutlich entfestigt. Wie die naturwissenschaftliche Untersuchung zeigt, sind die Ursachen dafür ebenfalls eng mit der Zusammensetzung des Mörtels verknüpft.

Am auffälligsten ist diesbezüglich der große Anteil an Porenraum (HTEMP 18). Dieser besteht in der überwiegenden Mehrheit aus Schwundrissen von bis zu mehreren Zentimetern Länge. Parallel dazu findet sich auch eine erhebliche Anzahl von Luftblasen, welche auf einen sehr

¹³⁰⁷ Wihr 1986, 46.

¹³⁰⁸ Das Thema der Schadsalze wird aufgrund seiner Bedeutung in einem eigenen Abschnitt behandelt.

›flüssigen‹, d. h. mit Wasserüberschuss angemachten Mörtel hinweisen. Der Hinterfüllmörtel hat dementsprechend einen beträchtlichen Anteil an Poren, welche für den Transport von Wasser in Frage kommen. Sichtbare Zeichen dieser Situation sind deutliche Lösungs- und Ausfällungsreaktionen im Mörtelgefüge. Dieser Umstand eines sehr flüssig angemachten Kalkmörtels lässt sich über die Funktion als Hinterfüllmaterial der Wandverkleidung erklären. Er war nie für eine freie Expositur, wie sie heute im Rahmen der Anastylose existiert, konzipiert.

Ein weiteres Merkmal des Hinterfüllmörtels ist das ungünstige Zusammenwirken von Zuschlägen und Bindemittel. So finden sich, obwohl fast der gesamte Zuschlag aus Ziegelbruchstücken besteht, keine ausgebildeten Hydratphasen. Die Ursache könnte sein, dass die hochporösen Ziegel nicht vorgehäst wurden und dadurch dem Bindemittel zu schnell das Wasser entzogen. Möglich ist auch, dass es sich bei dem verwendeten Bindemittel um einen Sumpfkalk handelte, der weit weniger reaktiv ist als ein trocken gelöschter Kalk. Neben den Ziegelbruchstücken existiert auch eine Vielzahl an feinsten tonigen Bestandteilen im Mörtel. Auch hier findet sich keine hydraulische Reaktion mit dem Bindemittel.

Der entscheidende Verwitterungsfaktor des Mörtels besteht in seiner Wechselwirkung mit Wasser. Hierbei scheint der Porenraum des Mörtels das auftreffende Wasser wie ein Schwamm in sich aufzunehmen. Sichtbare Zeichen dieser intensiven Interaktion sind die deutlich ausgebildeten Lösungs- und Ausfällungsreaktionen im Dünnschliff der entnommenen Probe HTEMP 18. Ferner weist der Mörtel über die feuchten Wintermonate hohe Feuchtigkeitswerte auf, was sich am intensiven Moosbewuchs der exponierten Oberflächen zeigt.

Das Ergebnis dieser Schädigung durch Wassereinfluss äußert sich in der starken Entfestigung des Mörtelgefüges. Praktisch in sämtlichen Bereichen ist der Hinterfüllmörtel sehr weich und hat nur geringen Zusammenhalt. Im Rahmen der vorgenommenen Klopffprobe mit dem Meißelkopf klingt der Mörtel durchgehend hohl. Aufgrund der fortgeschrittenen Entfestigung gelang es nicht, ein größeres kompaktes Stück des Hinterfüllmörtels zu bergen.

Ausblühungen von Salzen fanden sich im Untersuchungszeitraum September 2010 an insgesamt drei Stellen (S1, S2, S3) des Bruchsteinmauerwerks (Tab. 7). Für das bessere Verständnis der Salzsituation sind der Tabelle außerdem Ergebnisse weiterer untersuchter Bereiche angefügt. Lokalisierung und Umfang der Ausblühungen sind der Kartierung (Taf. 156. 159–160) zu entnehmen.

Tabelle 7: Schadsalze des ›Hadrianstempels‹

Bezeichnung	Lokalisierung	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻
S1	Vorhalle (Ansicht Portal), Bruchsteinmauerwerk, östlicher Abschnitt, im oberen Eckbereich	>1600	250	0–500
S2	Vorhalle (Ansicht Portal), Bruchsteinmauerwerk, westlicher Abschnitt, im oberen Eckbereich	>1600	500	500–1000
S3	Cella-Südwand, östlicher Abschnitt, im unteren Bereich	>1600	500	2000–3000
S4	Vorhalle (Ansicht Portal), Türsturz unter Polyesterüberzug	>1600	500	0–500
S5	Cella-Südwand, im unteren westlichen Bereich, entfestigter Mörtel	<400	0	0
S6	Cella-Ostwand, im unteren mittleren Bereich	<400	25	0
S7	Cella-Nordwand, im unteren westlichen Bereich, entfestigter Mörtel	<400	25	0

Nach ihrer Zusammensetzung werden die Zonen mit sichtbaren Ausblühungen von Sulfaten und Nitraten dominiert. Chloride kommen nur in dem Bereich S3 in erhöhter Konzentration vor. Die Herkunft des Sulfats sind vor allem die eingebrachten zementgebundenen Werkstoffe der Anastylose. Um die Reaktionszeit der Zementklinker zu verzögern, sind diesen in der Regel

3–5 % Gips als Verzögerer beigegeben worden¹³⁰⁹. Der Gips ist mit 2 g/l gut löslich, er wird mit dem abfließenden Regenwasser ausgewaschen und in das poröse Fugenwerk des darunterliegenden Bruchsteinmauerwerks eingeschwemmt. Demensprechend finden sich sämtliche Zonen mit hohen Sulfatbelastungen unterhalb massiver Betonkörper (S1–S4). Eine zweite mögliche Herkunft des Sulfats besteht aber auch in Form von Schwebstoffen der Luft. Die Menge dieses Anteils wird sehr gut über die vorhandenen Gipskrusten in den Regenschattenzonen der Marmorsteine dokumentiert.

Als Ursprung des Nitrats können organische Verbindungen angesehen werden. Vorstellbar sind hier sowohl Ausscheidungen von Menschen oder Tieren als auch abgestorbene pflanzliche Substanz. Im Gegensatz dazu stammen die vorhandenen Chloride vom nahen Meer und gelangen über Windverfrachtung an die Oberflächen der Bausubstanz. Chloridionen sind nach Sauerstoff und Wasserstoff mit durchschnittlich 19,4 g/l¹³¹⁰ das dritthäufigste Element des Meerwassers. Beide Anionen, Nitrat und Chlorid, sind gut wasserlöslich und werden wie der Gips vom abfließenden Regenwasser in die porösen Fugen des Mauerwerks eingetragen.

Bezüglich des Schadensausmaßes der Schadsalze kann die vorgefundene Situation als lokal begrenzt und von geringem Ausmaß eingestuft werden (Taf. 190, 3–4). Die betroffenen Flächen belaufen sich insgesamt auf ca. 1 m², was in etwa 0,75 % der Oberfläche des Bruchsteinmauerwerks entspricht. Zudem sind aktuell nur rekonstruierte Bereiche betroffen, eine Schädigung der historischen Substanz konnte nicht gefunden werden.

Ausdrücklich sei jedoch an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass Salze im Jahreszyklus Veränderungen und Bewegungen unterworfen sind, die nicht näher untersucht wurden. Die Schädigung des historischen Mörtels kann deshalb nicht vollständig ausgeschlossen werden. Ebenso ist eine zukünftige Schadensausbildung durch ein Übergreifen auf die historische Substanz angesichts der kontinuierlichen Erhöhung des Salzgehalts und der zunehmenden Zerstörung des Mauermörtels der Anastylose nicht auszuschließen.

II.2.4.2 MODERNE MATERIALIEN

II.2.4.2.1 Beton

Die Einteilung der Schädigung von Beton erfolgt in zwei Kategorien¹³¹¹: Die erste besteht aus den sog. Betonmängeln oder arteigenen Fehlern. Sie umfasst die bei der Herstellung entstandenen negativen Aspekte wie die Art der gewählten Ausgangsstoffe (Zement, Zuschlag), das Mischen und die Verarbeitung des Frischbetons sowie die Nachbehandlung des erstarrten Betons. Die zweite Kategorie umfasst die sog. Betonschäden oder artfremden Fehler. Es handelt sich hierbei um die eigentliche Schädigung des Baustoffs als Reaktion auf die natürlichen Verwitterungsfaktoren. Der Werkstoff Beton besitzt diesbezüglich einige materialspezifische Schadensphänomene mit z. T. erheblichem Zerstörungspotenzial wie das sog. Ettringittreiben¹³¹² oder die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR)¹³¹³, die jedoch am ›Hadrianstempel‹ nicht vorkommen. Aufgrund der Korrosion der Bewehrungen gibt es hingegen Risse, Abplatzungen und Hohlstellen.

Neben diesen gravierenden Betonschäden finden sich noch weitere rein oberflächliche Verwitterungserscheinungen. Diese stellen keine ernsthafte Gefahr für die Betonsubstanz dar, sie haben aber häufig ausgesprochen negative ästhetische Veränderungen zur Folge. Derartige Scha-

¹³⁰⁹ Benedix 2011, 314.

¹³¹⁰ Meyers Großes Taschenlexikon XIV Mah-Mold (1998) 160 s. v. Meerwasser.

¹³¹¹ Schröder u. a. 2009, 179.

¹³¹² Das Mineral Ettringit ist ein Verwitterungsprodukt der Betonbestandteile Tricalciumaluminat und Calciumaluminatnathydrat. Es entsteht unter der Einwirkung von sulfathaltigem Wasser. Das Volumen von Ettringit ist achtmal so groß als jenes der Ausgangsstoffe. Benedix 2011, 372 f.

¹³¹³ Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion beruht auf einer Wechselwirkung der Gesteinskörnung und Alkalimetallhydroxiden der Porenlösung des Betons. Die Zerstörung ist die Folge einer Quellung der gebildeten Alkalimetallsilicate bei Wasserzutritt. Benedix 2011, 376 f.

densbilder sind beispielsweise Krustenbildungen in den Regenschattenzonen, der Verlust der Zementhaut durch Lösungsprozesse und die mikrobielle Besiedlung der Betonoberfläche.

Die anschließende Aufzählung der vorgefundenen Schadensbilder des Betons am »Hadriantempel« folgt der Differenzierung von Baumängeln und Bauschäden. Behandelt werden nur die für den Tempel relevanten Aspekte:

Der Nachweis und die Untersuchung der Baumängel wurden mittels naturwissenschaftlicher Analyse durchgeführt. Hauptuntersuchungsmethoden waren die mikroskopische Betrachtung von entnommenem Probenmaterial und ergänzende physikalischen Prüfmethoden an Bohrkernen. Aufgrund der ausschließlich punktuellen Aussagekraft dieser Untersuchungen wird versucht, hier allgemeine Tendenzen detektierter Mängel aufzuzeigen. Eine Quantifizierung der Mängel am Bauwerk wurde nicht durchgeführt.

Der Wasserzementwert, auch w/z-Wert, von Beton beschreibt das Masseverhältnis von Wasser zu Zement beim Anmachen des Frischbetons¹³¹⁴. Für die vollständige Reaktion benötigt Portlandzement ca. 40 % M Wasser (0,4 w/z-Wert). Davon wird 25 % in Form der Hydratation chemisch gebunden und 15 % verbleiben physikalisch gebunden in den sog. Gelporen¹³¹⁵. Das über den w/z-Wert von 0,4 hinausgehende Wasser wird als Überschusswasser bezeichnet und führt zur Bildung von Kapillarporen im Betongefüge¹³¹⁶. Demnach gilt, je höher der w/z-Wert, desto höher der Anteil an Porenraum im erstarrten Betongefüge. Übertragen auf die Qualität und die Verwitterungsresistenz bedeutet ein hoher Porenraumanteil oder w/z-Wert eine deutliche Verschlechterung des erstarrten Betons. Negative Aspekte sind etwa die Abnahme der Festigkeit, die rasche Kapillarwasseraufnahme, eine schnelle Austrocknung und eine Beschleunigung der Karbonatisierung¹³¹⁷.

Im Falle des »Hadriantempels« sollte der Wasserzementwert 0,6 nicht überschreiten¹³¹⁸. Wie die naturwissenschaftliche Untersuchung zeigte, dürfte dieser in den meisten Betonelementen eingehalten worden sein. Die einzige gravierende Ausnahme von dieser Tendenz besteht im Bereich der *in situ* gegossenen Türrahmung (**168Te. 172Te. 173Te**), wo der Grenzwert mit geschätzten 0,7–0,8 deutlich überschritten wurde. Kennzeichen dafür sind der hohe Anteil an Porenraum, die rasche Kapillarwasseraufnahme und Wasserabgabe, die geringe Spaltzugfestigkeit sowie die große Tiefe der Karbonatisierung (HTEMP K1–K3). Die Ursache dieses hohen w/z-Werts liegt in der ungünstigen Zuschlagszusammensetzung der Betonmischung und in der speziellen Gussform dieser Elemente. Am Übergang von Betonguss zum originalen Marmor finden sich nämlich kleine hinterschnittene Zonen, die nur mit einer sehr fließfähigen Mörtelmischung erreicht werden können.

Die Betonelemente des »Hadriantempels« können nach ihrer Zuschlagszusammensetzung in drei Gruppen von schlechter, mittelmäßiger und guter Qualität eingeteilt werden. Die schlechteste Gruppe umfasst die Elemente der Türrahmung (**168Te. 172Te. 173Te** – HTEMP K1–K3). Problematisch ist einerseits die längliche und splittrige Kornform des ausschließlich aus Marmor bestehenden Zuschlags¹³¹⁹. Dieser erschwerte die Verarbeitung, die Verdichtung und hat einen

¹³¹⁴ Weber 2010, 44–48.

¹³¹⁵ Schröder u. a. 2009, 75.

¹³¹⁶ Kapillarporen haben einen Durchmesser von 1–10 µm. Sie sind in sämtlichen Betonen vorhanden, da in der Praxis aus Gründen der Verarbeitung w/z-Werte zwischen 0,5 und 0,6 üblich sind. Schröder u. a. 2009, 75. 147.

¹³¹⁷ Weber 2010, 45.

¹³¹⁸ Die Grenzwerte der Betonzusammensetzung ergeben sich aus den zu erwartenden Einwirkungen auf den Baustoff im jeweiligen Bauverband. Der »Hadriantempel« entspricht in dieser Einteilung einem Bauwerk der Expositions-klasse XC4. Das heißt, es handelt sich um Außenbauteile mit direkter Beregnung und davon abgeleiteten wechselnd nassen und trockenen Bedingungen. Die Ursache einer Korrosion der Bewehrung ist die fortschreitende Karbonatisierung des Betons. Die Anforderungen an die Zusammensetzung sind: höchstzulässiger w/z-Wert 0,6; Mindestzementgehalt 280 kg/m³; Mindestfestigkeitsklasse C25/30; s. Weber 2010, 64.

¹³¹⁹ Die Eigenschaften der Gesteinskörnung haben Einfluss auf die Verarbeitung des Frischmörtels. Dabei ist die Kornform entscheidend – kugelige, gedrungene Formen haben im Vergleich zu länglichen, splittrigen Formen eine kleinere Oberfläche und damit einen niedrigeren Wasser- und Zementbedarf. Weiters ist die Zusammensetzung an unterschiedlichen Korngrößen so zu wählen, dass der Hohlraumgehalt, den der Zementleim ausfüllen muss, mög-

hohen Wasser/Zement-Bedarf zur Folge. Andererseits zeigt die Betonmischung auch eine ungünstige Korngrößenverteilung. Sie hat bimodalen Charakter, mit einem Grobkorn von 1–1,5 cm und einem Feinkorn von <2,5 mm. Die großen Zwischenräume der Grobkörner können hierbei durch das Zementleimgemisch aus feinsten Zuschlägen und Zement nicht ausreichend überbrückt werden. Es ist ein deutliches Schwundrissnetz zu beobachten und ein großer Anteil an Porenraum vorhanden. Zumindest eine weitere Kornfraktion wäre hier nötig gewesen. Kennzeichnend für die schlechte Qualität des Betons sind ebenfalls sog. Kiesnester und eine starke Lunkerbildung in den obersten 3–4 cm. Lunker sind abgeschlossene, runde Poren, die Durchmesser von mehreren Millimetern erreichen können. Sie entstehen durch Einschlüsse von Luft oder Wasser im Frischmörtel an der Oberfläche von Schalungsbeton und lassen sich beim Guss nur schwer vermeiden. Kiesnester sind offenporige Zonen mit einem geringen Anteil an Bindemittel und einem dementsprechend schwachen Zusammenhalt des Gefüges. Sie sind eine Folge des hohen w/z-Werts der Betonmischung, welcher zum Ausfließen des Zementleims während des Gusses geführt hat.

Die mittelmäßige Gruppe besteht ebenfalls ausschließlich aus splittigen Marmorkörnern (HTEMP 14). Im Gegensatz zur ersten Gruppe sind die Zuschläge jedoch nicht bimodal verteilt, sondern es existiert nur eine Größenfraktion von 0,7–1,2 cm. Ein feiner Zuschlag konnte nicht nachgewiesen werden, jedoch erscheint die Zugabe von Kalk erfolgt zu sein. Ähnlich wie bei Gruppe 1 gestaltet sich auch das Schadensbild: Es existieren eine Vielzahl von Rissen und ein erheblicher Porenraum. Auch hier konnte demnach der Zementleim die Zwischenräume nicht ideal überbrücken. Das Schadensausmaß ist aufgrund der kleineren Kornform der Zuschläge und einer besseren Verdichtung dieses Betons jedoch erheblich kleiner. Derartige Betongusselemente umfassen sämtliche Kopien antiker Originale (**085Re–088Re. 078Te–080Te. 124Te**) und die rekonstruierten Orthostaten (**060Oe–62Oe. 066Oe. 068Oe–069Oe**).

Zu der Gruppe guter Qualität gehören jene Betonelemente, welche neben Marmor auch Zuschläge anderer Herkunft aufweisen (HTEMP 12. 16. 23. K4. K5). Diese Zuschläge haben in der Regel dunklere Farbigkeit und zeigen im Vergleich zu den Marmorkörnern einen besseren Rundungsgrad. Maximale Korngrößen der dunklen Zuschläge erreichen bis zu 3 cm und zeigen breite Korngrößenverteilung. Ein hoher Anteil besteht aus feinen Zuschlägen unter 0,6 mm. Diese bessere Größenverteilung der Zuschläge führte zu einem geringeren Ausmaß an Rissen, Porenraum und Wasser-/Zementbedarf. Schwerpunkte der Anwendung am Tempel sind statisch bedeutende Elemente, wie die Säulen (**017Se. 020Se**), der östliche Pfeiler (**024Se**), die gegossenen Elemente des Gebälks (**029Ae. 037AF**) und die Binderebenen im Bereich des Bruchsteinmauerwerks (**071Me. 074Me–075Me. 165Me–167Me. 169Me. 174Me**).

Für die Erfassung der einzelnen Bauschäden des Betons wurde jedes Schadensphänomen optisch klassifiziert und charakterisiert: Das Schadensbild der Karbonatisierung bezeichnet die Reaktion von im erstarrten Beton enthaltenem Kalziumhydroxid (CaOH) mit sauren Bestandteilen der Luft (CO_2 , SO_2)¹³²⁰. Es handelt sich hierbei um einen natürlichen Prozess, welcher an der exponierten Oberfläche beginnt und mit der Zeit immer tiefer in das Innere fortschreitet. Das im Beton entstehende Kalziumkarbonat (CaCO_3) führt zu einer Verdichtung und Verfestigung, was eine Veränderung des pH-Werts der Porenlösung des Betons nach sich zieht. So haben nichtkarbonatisierte Bereiche einen pH von >12,5 und sind demnach ausgesprochen alkalisch, während in karbonatisierten Arealen der pH auf <9 sinkt¹³²¹. Diese Veränderung hat gravierende Auswirkungen auf die Anfälligkeit der enthaltenen Bewehrungseisen gegenüber Korrosion. Im alkalischen Milieu sind die Eisenelemente nämlich durch eine 1–100 µm dicke Passivschicht

lichst gering ist. Dazu wird je nach Dimension des Größtkorns ein bestimmter Anteil an feineren Bestandteilen benötigt; dazu Pickhardt – Bose – Schäfer. 2012, 27 f.; Weber 2010, 48–51; Schröder u. a. 2009, 67.

¹³²⁰ Portlandzement spaltet bei der vollständigen Hydratation ca. 25 % der Zementmasse als Kalkhydrat ab. Hartl 1999, 18.

¹³²¹ Ban 2011, 121.

vor Korrosion geschützt¹³²². Sinkt der pH-Wert jedoch unter 11, so wird diese Schicht aufgelöst und Korrosion kann einsetzen. Dabei hängt die Tiefe der Karbonatisierung stark von den Eigenschaften des Betongemischs und den Umweltparametern ab. So reagiert ein Gemisch mit einem hohen Anteil an Porenraum rascher, weil die CO₂-Moleküle gut eindringen können¹³²³. Die Karbonatisierungsgeschwindigkeit wird im Laufe der Zeit immer langsamer und kommt schließlich vollkommen zum Erliegen¹³²⁴. Offensichtlich wird es mit zunehmender Dicke der karbonatisierten Schicht für die sauren Bestandteile der Luft immer schwieriger, die nichtkarbonatisierten Areale im Inneren zu erreichen.

Der entscheidende Umweltfaktor für die Karbonatisierung des Betons ist die Sättigung mit Wasser. Intensive Reaktionen finden bei Werten der Luftfeuchtigkeit zwischen 50–70 % statt¹³²⁵. So gut wie keine Karbonatisierung existiert in sehr trockenen Bedingungen (<30 % RH), weil nicht genügend Wasser für die Vermittlung des Karbonatisierungsprozesses zur Verfügung steht. Gleiches gilt für das andere Extrem, dem wassersatten Zustand. Dort steht zwar reichlich Wasser zur Verfügung, jedoch ist die Diffusion der CO₂-Moleküle stark eingeschränkt und der Karbonatisierung fehlt ein Reaktionspartner. Laut vorliegenden Klimadaten aus der Region Ephesos¹³²⁶ herrschen über den Großteil des Jahres gute Bedingungen für die Karbonatisierung vor. Zwischen September und April liegen die durchschnittlichen Werte der Luftfeuchtigkeit zwischen 50 und 62 %. In den trockenen Sommermonaten Mai bis August sind die Werte mit 41–49 % geringfügig niedriger (Taf. 191, 1). Wie die Untersuchungen mit dem Bewehrungssuchgerät zeigten, liegt die Bewehrung des ›Hadrianstempels‹ in der Regel oberhalb des geforderten Richtmaßes von 25 mm Mindestabdeckung¹³²⁷. Die starken Schwankungen der gemessenen Bewehrungstiefe und die vielen frei liegenden Eisen an der Oberfläche des Betons legen nahe, dass bei der Herstellung keine Abstandhalter zum Einsatz kamen.

Der Nachweis vorhandener Karbonatisierungstiefen am ›Hadrianstempel‹ erfolgte mithilfe einer 0,1 %-Lösung von Phenolphthalein, die ab einem pH-Wert von 8,5 deutlich rot (Magenta) in Erscheinung tritt. Diese wurde an den gezogenen Bohrkernen, HTEMP K1–K5, sofort nach deren Gewinnung und einer gründlichen Waschung aufgesprüht. Es zeigte sich ein deutlicher Zusammenhang je nach vorhandenem Porenraum. Die porösen Betonelemente der Türrahmung, mit ihrer ungünstigen Zuschlagszusammensetzung und hohem w/z-Wert von 0,7–0,8, weisen den größten Fortschritt der Karbonatisierung auf. Des Weiteren zeigt das Gefüge eine erhebliche Anzahl von Lunkern, und ein deutliches Rissnetz ist ausgebildet. Die Karbonatisierungsfront liegt in dieser Gruppe zwischen 4,5–8,5 cm unter der Oberfläche (HTEMP K1–K3). Diese Tiefe ist als sehr hoch einzustufen, und die Bewehrungseisen in Betonelementen dieser Zusammensetzung sind in allen Fällen akut von Korrosion bedroht.

Im Vergleich dazu zeigen die anderen zwei Bohrkern Beton von besserer Qualität, d. h. mit dichterem Gefüge und geringerem Porenraum, weit weniger starker Karbonatisierung. Ihre Zuschläge bestehen aus Marmor und diversen anderen Zuschlagskomponenten. Der w/z-Wert des Frischmörtels betrug etwa 0,45–0,5, das Bindemittel ist Portlandzement. Die Tiefe der Front befindet sich dort zwischen 2,0 und 2,5 cm unter der Oberfläche (HTEMP K4, K5). Die Kom-

¹³²² Diese Passivschicht besteht zum überwiegenden Teil aus Eisenoxiden (Fe₃O₄ – γ – Fe₂O₃ Spinell) mit eingelager-tem Kalziumhydroxid. Schwarz 1999, 5.

¹³²³ Diesbezügliche Versuche haben gezeigt, dass die Dicke der karbonatisierten Randzone mit dem w/z-Wert ungefähr linear zunimmt. Hartl 1999, 18.

¹³²⁴ Im Falle eines ideal hergestellten Betons der Festigkeitsklasse C40/50 beträgt die Karbonatisierungstiefe nach 5 Jahren ca. 2 mm. In den folgenden 15 Jahren steigt diese sehr langsam auf einen Wert von ca. 3 mm weiter an. Das Erreichen einer Tiefe von 5 mm scheint auch nach langer Expositions-dauer nicht realistisch. Schröder u. a. 2009, 233.

¹³²⁵ Hartl 1999, 18–21.

¹³²⁶ Pillinger 2008, 109; Klimamesswerte der Selçuk Meteoroloji İstasyon des Zeitraums von 01/2000 bis 05/2006, Monatsdatenblätter.

¹³²⁷ Auswertung der Ferrosan-Daten s. Kap. II.2.2.2.6 und Kap. II.2.3.2.3.

bination von detektierter Karbonatisierungstiefe und gemessener Bewehrungstiefe ergibt eine potenzielle Gefahr von Stahlkorrosion an sämtlichen Betonelementen des ›Hadrianstempel‹.

Die Korrosion¹³²⁸ der Bewehrung ist im Rahmen der Verwitterung von Stahlbeton einer der Hauptschadensfaktoren¹³²⁹. Sie ist häufig verantwortlich für vorhandene Risse, für Abplatzungen der Betonüberdeckung und birgt auf längere Sicht eine Gefahr für die Tragfähigkeit. Wie im vorherigen Abschnitt besprochen, ist der Bewehrungsstahl im frischen Beton durch eine sog. Passivierungsschicht vor Korrosion geschützt. Mit fortschreitender Karbonatisierung wird diese jedoch aufgelöst und die Korrosion des Bewehrungsstahls wird möglich¹³³⁰. Davon abgeleitet ergibt sich eine potenzielle Gefahr der Bewehrungskorrosion, wenn sich die Bewehrung innerhalb des karbonatisierten Bereichs befindet. Am ›Hadrianstempel‹ schwankt diese Tiefe der Karbonatisierung je nach Betonmischung zwischen 2,0–8,5 cm Tiefe. Vergleicht man diese Daten mit den gemessenen Bewehrungstiefen ausgewählter Bereiche¹³³¹, zeigt sich folgendes Bild: In 35 % der Fälle liegt die Bewehrung oberhalb der minimalen Karbonatisierungstiefe von 2 cm. Diese Elemente sind unabhängig von ihrer Zusammensetzung korrosionsgefährdet.

Höhere Karbonatisierungstiefen von bis zu 8,5 cm sind vor allem in Betonelementen mit großem Porenanteil zu erwarten. Es handelt sich hierbei um die Elemente des Cellaportals (**168Te**, **172Te**, **173Te**) sowie in abgestufter Form um sämtliche Abformungen (**078Te–080Te**, **085Re–88Re**, **124Te**) und die Orthostaten (**060Oe–062Oe**, **066Oe**, **068Oe**, **069Oe**). Die gemessene Maximaltiefe der Bewehrung liegt bei diesen Teilen in 4,6 cm Tiefe, was knapp über 50 % der maximalen Karbonatisierungstiefe entspricht. Dementsprechend sind sämtliche aufgezählten Betonelemente von Korrosion bedroht.

Positiv fielen im Rahmen der Tiefenuntersuchung der Bewehrungseisen vor allem die Betonstützen der Fassade (**017Se**, **024Se**) und der ergänzte Architrav (**029A**) auf. Die Karbonatisierung ist im Fall dieser dichten Betonelemente mit ca. 2 cm anzusetzen. Bei einer Überdeckung von mindestens 4 cm ergibt sich daraus keine Korrosionsgefahr für Eisenelemente.

Ein auffallender Aspekt der Bewehrung sind die großen Schwankungen der Betonüberdeckung. Dieser Umstand lässt sich mit der Herstellung der Betonelemente in Verbindung bringen und deutet ein Verrutschen der Bewehrung während des Gussvorgangs an. Es wurden keine sog. Abstandhalter zwischen Bewehrung und Schalung eingesetzt. Für das Gefahrenpotenzial der Bewehrungskorrosion ergibt sich daraus eine Erhöhung, da davon ausgegangen werden muss, dass bei vielen Betonelementen einzelne Eisen näher an die Oberfläche heranreichen.

Das Schadensausmaß der Bewehrungskorrosion am ›Hadrianstempel‹ ist trotz dieses hohen Gefahrenpotenzials bislang nur sehr gering ausgebildet. Diesbezügliche Zerstörungen zeigen nur zwei Orthostaten (**062Oe**, **068Oe** Taf. 169, 3; 191, 2) sowie die Elemente des Cellaportals (**168Te**, **172Te**, **173Te** Taf. 177, 2). Die Ursache dafür ist das relativ trockene semiaride Klima von Ephesos mit seinen geringen Niederschlagsmengen. Das für den Korrosionsprozess so bedeutende Wasser ist Mangelware und dringt in der Regel nicht tief genug in die Betonsubstanz ein, um die Bewehrung zu erreichen. Diese Areale mit Korrosionsschäden zeichnen sich dadurch aus, dass hier jedoch die Wassermenge ausreicht, um zur Bewehrung im Inneren des Betons vorzudringen. Die Ursache im Fall der beiden Orthostaten ist die geringe Dicke der Betonüberdeckung mit unter 1 mm. Es handelt sich um einen Baumangel des Herstellungsprozesses. Im Falle des Cellaportals sind jene Areale betroffen, die eine erhöhte Belastung durch abfließendes Niederschlagswasser aufweisen. Es sind dies die bodennahe Spritzwasserzone und ein Bereich des Türsturzes. Entscheidend ist neben der erhöhten Wasserbelastung auch die rasche Kapillar-

¹³²⁸ Bezüglich der Beschreibung und näheren Erläuterung des Korrosionsprozesses von Eisen s. Kap. II.2.4.2.3.

¹³²⁹ Schwarz 1999, 4.

¹³³⁰ Um sicherzustellen, dass die Karbonatisierung die Tiefe der Bewehrung nicht erreicht, existieren heute Normen für Mindestmaße der Betonüberdeckung. Diese sind auf die Expositionsklassen abgestimmt und die geforderte Mindestbetonüberdeckung im Fall frei exponierter Bauteile beträgt z. B. 25 mm. s. dazu Pickhardt – Bose – Schäfer 2012, 67; Schröder u. a. 2009, 79.

¹³³¹ s. dazu Kap. II.2.2.2.6.

wasseraufnahme dieser Betonelemente. Diese ist die Folge des ausgebildeten Porenraums und ein Zeichen für die ungünstige Zusammensetzung des Betons in diesem Bereich¹³³².

Ein weiteres Schadensbild zeigt sich in Form von Auswaschungen der Betonoberflächen. Dieser geringe oberflächliche Verlust der Zementmatrix ist vor allem bei jenen Elementen ohne nachträgliche Oberflächenbearbeitung sichtbar. Durch den Verlust der sog. Zementhaut treten die Zuschläge des Betons stärker in den Vordergrund (Taf. 192, 1–2). Die Folge dieser Rückwitterung ist eine sog. Öffnung des Betongefüges, wodurch die entstandene raue Oberfläche durchlässiger für Wasser ist und eine größere Angriffsfläche für vorhandene Verwitterungsfaktoren bietet. Die Gefahr der Korrosion von Bewehrungsseisen erhöht sich durch den potenziell tieferen Wassereintrag ins Gefüge. Die Schadensursache ist vor allem abfließendes Regenwasser. Einen deutlichen Hinweis darauf gibt die ausgeprägte biogene Besiedlung dieser Bereiche. Offensichtlich finden die Organismen in den aufgerauten Oberflächen gute Standorte mit genügend Wasser für ihren Stoffwechsel vor. Das Schadensausmaß der Auswaschung betrifft insgesamt ca. 31 % der Betonoberflächen. Besonders hoch ist es im Bereich der Mauerkrone, die von Niederschlägen vollflächig getroffen wird, mit 95 % der Fläche. Die Schädigung der Auswaschung beschränkt sich ausschließlich auf den oberflächennahen Bereich, eine tief greifende Schädigung des Betons konnte in keinem Fall nachgewiesen werden. Demensprechend stellen die rauen, von biogenen Auflagen und Zuschlägen geprägten Oberflächen ausschließlich einen ästhetischen Faktor dar. In der Regel besteht hierbei ein starker Kontrast zu den von Auswaschung nicht betroffenen Zonen (Taf. 192, 2).

Fehlstellen oder Abplatzungen sind Verluste kompakter Bruchstücken des Betons. Ein markantes Kennzeichen dieses Schadens ist eine charakteristische Bruchfläche, von welcher sich das Material gelöst hat. Die Ursache dieses Schadensbildes kann fast ausschließlich auf zu nahe an der Oberfläche liegende Bewehrungsseisen zurückgeführt werden, welche in der Regel exponiert im Zentrum betroffener Areale anzutreffen sind (Taf. 192, 3). Entsprechende Schäden konzentrieren sich vor allem auf die Betonoberflächen der Cella-Südwand. Mit hoher Wahrscheinlichkeit sind die dortigen Ausbrüche jedoch bereits während der Bauzeit der Anastylose entstanden, offensichtlich aufgrund der nachträglichen Abarbeitung der Oberfläche der Betongusselemente. Zu nahe an der Oberfläche liegenden Teile der Bewehrung wurden hierbei freigelegt. Weitaus seltener finden sich Abplatzungen aufgrund aktiver Korrosion der Bewehrung. Betroffen sind hiervon nur zwei Orthostaten (**062Oe. 068Oe** Taf. 169, 3; 191, 2) sowie ausgewählte Bereiche des Cellaportals (**168Te. 172Te. 173Te**). Das Schadenspotenzial der Ausbrüche besteht vor allem in der Freilegung der Bewehrungsseisen des Betons. Diese sind in der Folge direkt der Bewitterung ausgesetzt, und es ist von einer Beschleunigung der Korrosion auszugehen.

Der mineralische Werkstoff Beton wird, ähnlich wie die historische Marmoroberfläche, von einer Reihe von Mikroorganismen besiedelt. Das Spektrum reicht von diversen Bakterien, Pilzen, Algen, Flechten bis hin zu Moosen¹³³³. Diese bilden je nach vorhandenen Umweltparametern wie Temperatur, Licht oder Feuchtigkeit typische Gesellschaften von Organismen aus. Das ursprünglich stark alkalische Milieu des Werkstoffs Betons ist für viele Organismen tödlich, was eine Besiedlung vorerst verhindert. Der Beginn eines Bewuchses findet erst nach der erfolgten Karbonatisierung der Oberfläche statt¹³³⁴. Die naturwissenschaftliche Untersuchung des Flechtenbewuchses erfolgte aus finanziellen Gründen und aufgrund der Schwerpunktsetzung auf den historischen Materialbestand ausschließlich mit dem Stereomikroskop an nur einer Probe (HTEMP 15). Markant sticht dort vor allem ein Flechtenbewuchs ins Auge. Es handelt sich vermutlich um mindestens zwei Flechtentypen, welche epilithisch sind und Krusten ausbilden. Die Farbigkeit der Flechten ist in einem Fall schwarz/blau, im anderen bräunlich. Ihr Wachstum erfolgt ganz gezielt in jenen von Bindemittel und feinem Zuschlag dominierten Arealen (>Mat-

¹³³² s. dazu o.

¹³³³ Caneva – Nugari – Salvadori 1991, 3 f.

¹³³⁴ Ban 2011, 114.

rix»), während die silikatischen Zuschläge nicht so stark befallen sind. Neben den detektierten Flechten ist ebenfalls von einem Wachstum weiterer Organismen, wie den allgegenwärtigen sog. Mikrokolonie bildenden Pilzen auszugehen. Ein Bewuchs von Algen in größeren Rissen konnte bei der Untersuchung vor Ort nicht festgestellt werden. Im Gegensatz zu dem Marmor ist Beton nämlich nicht durchlässig für Licht, sodass das Wachstum dieser phototrophen Organismen unter der Oberfläche nur sehr eingeschränkt möglich ist. Bezüglich des Schadensausmaßes der mikrobiellen Besiedlung zeigt sich eine deutliche Verbindung zur Verfügbarkeit von Niederschlagswasser. Gezielt werden von den Organismen einerseits horizontale Flächen besiedelt, auf denen das Regenwasser auftritt oder Pfützen entstehen, und andererseits vertikale Zonen, an denen es zum Abfließen des Wassers kommt (K24–K31). Insgesamt sind ca. 7 % der gesamten Betonoberflächen von Organismen überzogen. Eine gravierende Zerstörung durch das Wachstum von Mikroorganismen konnte nicht festgestellt werden. Die Lebewesen besiedeln ausschließlich die Oberfläche und dringen nicht tief in das Gefüge ein. Dementsprechend stellt der biogene Bewuchs hauptsächlich einen ästhetischen Faktor dar, denn die betroffenen Areale zeigen eine dunklere Farbigekeit als ihre Umgebung.

Krustenbildungen an den Betonoberflächen des »Hadrianstempels« finden sich vorwiegend an den von ablaufendem Regenwasser geschützten Bereichen. Sie sind die Folge einer Ablagerung von Staub- und Schmutzpartikeln der Luft¹³³⁵ und in ihrer optischen Erscheinung mit jenen der Regenschattenzonen auf den Marmorsteinen zu vergleichen. Betroffen sind hiervon vor allem die Untersichten und plastisch gestalteten Oberflächen mit ihren Vor- und Rücksprüngen (Taf. 178, 1). Die Farbigekeit dieser Krusten ist rötlich. Analog der vorherigen Schadensklasse der biogenen Besiedlung erfolgte auch hier keine nähere Untersuchung im Labor. Unter Berücksichtigung der Analyse vergleichbarer Krusten an den Marmoroberflächen dürfte es sich jedoch um ca. 100–150 µm starke Auflagen vorwiegend aus Gips handeln (HTEMP 25). Parallel zu diesen dominierenden rötlichen Krustenbildungen zeigen sich an wenigen Stellen auch dünne weißliche Auflagen. Diese befinden sich in der Regel am Rande von Zonen mit starkem Abfluss von Niederschlagswasser. Mit großer Wahrscheinlichkeit handelt es sich hierbei um sog. Sinterkrusten. Diese entstehen durch das Auswaschen von Kalziumhydroxid aus dem Beton, welches an der Oberfläche mit dem Kohlendioxid der Luft zu Kalziumkarbonat reagiert. Die geringe Ausprägung dieses für Betonwerkstoffe typischen Krustentyps am »Hadrianstempel« ist ein Zeichen der relativ geringen Niederschläge im Raum Ephesos¹³³⁶. Deutlich sichtbar sind sie eigentlich nur an der Unterseite des Architravs **029A** (Taf. 193, 1).

Das Schadenspotenzial beider Typen von Krusten besteht in Form von Spannungen zwischen Kruste und Untergrund und einer Veränderung der Wasseraufnahme und -abgabe. Krusten stellen in der Regel eine Verdichtung der Oberfläche dar und verlangsamen die Wasseraufnahme sowie die Austrocknung des Betons. Im konkreten Fall ließ sich optisch keine zerstörende Wirkung der Krusten feststellen. Der Betonuntergrund scheint in gutem Zustand und der einzig negative Aspekt besteht in Form der Verfärbung von betroffenen Oberflächen.

Der nächste Schadenstyp umfasst die verschiedenen Arten von ausgebildeten Rissstrukturen des Betons. In diesem Zusammenhang muss erwähnt werden, dass diese aufgrund der Eigenschaften des Bindemittels Zement und der Wechselwirkung mit der integrierten Bewehrung nicht zu vermeiden und sogar ausschlaggebend für das Tragverhalten von Stahlbeton sind. Denn erst nach der Rissbildung übernimmt die vorhandene Bewehrung einen Großteil der aufzunehmenden Zugkräfte¹³³⁷. Rissbildungen in Beton sind demnach »normale« und charakteristische Erscheinungen dieses Werkstoffs.

¹³³⁵ Künzel 1988, 65.

¹³³⁶ In gemäßigten Klimazonen mit höheren Niederschlagswerten sind sog. Sinterkrusten auf Beton dominierend. Sie erreichen dort oft beträchtliche Schichtdicken von mehreren Millimeter Stärke, oder es kommt zur Bildung von Tropfsteinen an Punkten, an denen das mit Kalziumkarbonat gesättigte Wasser abtropft. Ban 2011, 109, 113.

¹³³⁷ Müller – Haist 2010, 1.

Ursachen von Rissen in Stahlbeton sind beispielsweise¹³³⁸:

- Volumenverringerung durch die Hydratation des Zements (›Schrumpfen‹ oder ›chemisches Schwinden‹)¹³³⁹
- Volumenverringerung durch den Verlust überschüssigen Anmachwassers des Frischbetons (›Trocknungsschwinden‹)
- Wärmeentwicklung beim Erstarren des Betons und die damit in Verbindung stehenden Temperaturunterschiede im Frischbeton
- Dehnungs- und Schrumpfbewegungen des erstarrten Betons durch Änderungen des Wassergehalts oder der Temperatur
- Änderungen der Auflagebedingungen, z. B. infolge von Setzungen
- nicht ausreichendes Trageverhalten des Betons oder ein zu hoher Lasteneintrag
- Sprengwirkung von Bewehrungskorrosion im Inneren des Betonkörpers
- Sprengwirkung der Alkali-Kieselsäure-Reaktion (s. Anm. 1313)
- Sprengwirkung durch Frostsprengung
- Arbeitsfugen des Herstellungsprozesses

Mögliche negative Auswirkungen von Rissstrukturen resultieren in mehreren Faktoren, welche großen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit des Bauteils bzw. des Bauwerks haben können. Einerseits bedingen sie zumeist eine Erhöhung der Wasserwegigkeit im Beton und dadurch implizierte Schadensmechanismen (z. B. Korrosion der Bewehrung). Andererseits stellen sie einen Festigkeitsverlust dar, welcher mit der fortschreitenden Ausbreitung in das Innere bis zu Materialversagen führen kann. Folgen sind das Abfallen von Bruchstücken unterschiedlicher Dimension oder im Extremfall der Einsturz des Bauwerks.

Im Falle des ›Hadrianstempels‹ finden sich als Schäden einzustufende Risse ausschließlich in den durch Korrosion der Bewehrung betroffenen Arealen¹³⁴⁰; es sind dies vor allem die Elemente des Cellaportals (**168Te**, **172Te**, **173Te** Taf. 193, 2) und untergeordnet zwei Orthostatenplatten (**062Oe**, **068Oe**). Abgesehen von diesen sind alle anderen Risse aufgrund ihrer geringen Breite unter 0,3 mm als unbedenklich einzustufen. Dies gilt ebenfalls für die vorhandenen Trennrisse zwischen den in mehreren Etappen hergestellten Bauteilen wie dem Cellaportal, dem Mauerabschluss der Portalwand und der Anten sowie dem östlichen Pfeiler (**024Se**).

II.2.4.2.2 Mörtel

Die Schädigung der vorhandenen Mörtelmassen der Anastylose ist die Folge sowohl ihrer Zusammensetzung als auch der vorherrschenden Umweltfaktoren. Die zentralen Schadensfaktoren entsprechen denen der historischen Mörtelmassen¹³⁴¹:

Der Erhaltungszustand des Mörtels im Bereich des Bruchsteinmauerwerks muss durchgängig als stark geschädigt eingestuft werden. Er ist sehr weich und von einer Vielzahl von Rissen durchzogen (Taf. 169, 1), sodass bei der Probenentnahme kein größeres kompaktes Stück des Mörtels geborgen werden konnte. Wie die naturwissenschaftliche Untersuchung zeigte, sind die Ursachen dafür eng mit der Zusammensetzung des Mörtels verknüpft. Hauptproblem ist der niedrige Anteil von Bindemittel im Vergleich zur Menge des Zuschlags. Der Mörtel wurde hierbei so stark abgemagert, dass der Kalk nicht jedes Zuschlagskorn umhüllt, sondern diese nur

¹³³⁸ Schröder u. a. 2009, 307.

¹³³⁹ Die Hydratverbindung hat ein um 6 % geringeres Volumen als die Summe von Wasser und Zement. Schröder u. a. 2009, 148.

¹³⁴⁰ In den einschlägigen Regelwerken zur Einschätzung eines Gefahrenpotenzials von Rissen in Stahlbeton werden Rissbreiten frei exponierter Elemente bis zu 0,3 mm als unbedenklich eingestuft. Gefahr herrscht demnach bei Rissen größerer Breite. Ein sicheres Indiz für aktive Schädigung ist die Zunahme der Breiten vorhandener Risse oder die Bildung neuer Risse. ÖNORM EN 1992-1-1, ÖNORM B EN 1992-1-1. Fingerloos 2010, 69–72.

¹³⁴¹ Bei den zementgebundenen Restaurierungsmassen gilt es, in der Zustandsbeschreibung des Betons nachzulesen.

punktuell miteinander verkittet (HTEMP 19 und 20). Folgen sind geringe Festigkeitswerte und ein hoher Anteil an Porenraum von ungefähr 30 V%.

Im Zuge der vorhandenen freien Bewitterung des ›Hadrianstempel‹ kommt es schließlich zu einer intensiven Wechselwirkung mit Wasser. Das Wasser wird über den vorhandenen Porenraum rasch aufgenommen und wieder abgegeben. Die Folgen für den Mauermörtel sind eine Auswaschung oder Umlagerung des Kalks, was in diesem Fall mit einer Schwächung des Gefüges einhergeht. An einzelnen Bereichen werden vom ablaufenden Wasser ebenfalls Salze mittransportiert. Diese dringen gemeinsam mit dem Wasser in den Mörtel ein und kristallisieren nach der Verdunstung des Lösungsmittels an der Oberfläche oder im Porenraum aus. Abgeleitet von diesen Faktoren ist der Mauermörtel in den Bereichen mit hoher Belastung durch Regenwasser stark entfestigt und von Verlusten geprägt. Als besonders schwerwiegendes Beispiel sei auf die Mauerkrone des Bruchsteinmauerwerks verwiesen. Dort ist eine Vielzahl der Steine locker und der ehemalige Mörtel liegt als abgebauter Schutt in den Fugen. Ebenfalls mit einer erhöhten Verlustrate zeigen sich die Zonen mit hohen Konzentrationen an Schadsalzen. Die Zerstörung ist hier die Folge der Sprengwirkung der Salze. Eine weitere Schädigung des Mauermörtels entsteht schließlich durch das Wachstum höherer Pflanzen, die in den durch Entfestigung und Verlust geprägten Arealen eine Vielzahl von guten Siedlungsbedingungen vorfinden. Es ist ein Leichtes für jede Pflanzenart, mit ihren Wurzeln in den weichen Mörtel einzudringen und diesen zu zerstören. Der vorhandene Mauermörtel muss als nicht geeignet für die freie Expositur eingestuft werden.

Im Gegensatz zum kalkgebundenen Mauermörtel ist der zementgebundene Restauriermörtel für die Ergänzung und Verfügung des Marmormauerwerks eine harte, kompakte Masse. Bei der vergrößerten Betrachtung unter dem Mikroskop ließ der Mörtel keine Schwachstellen erkennen. Es ist in der Regel eine gute Korngrößenverteilung, eine geringe Anzahl von Rissen und ein dichtes Gefüge mit wenig Porenraum zu beobachten (HTEMP 23). Dementsprechend sind viele Ergänzungen des ›Hadrianstempels‹ in gutem Erhaltungszustand und weisen keine Schäden auf.

Als eine Zone mit ausgeprägter Schädigung auf makroskopischer Ebene ist jedoch die Anwendung als Fugenmasse auszumachen. Der Restauriermörtel zeigt sich dort mit einem deutlichen Rissnetz, bestehend aus Flankenabrissen hin zum Marmorstein als auch Rissen innerhalb des Mörtels (HTEMP 24 Taf. 194, 1). Die Ursache für diesen Schaden liegt in der ungünstigen Zuschlagszusammensetzung einzelner Mörtelmischungen. Dies betrifft vor allem zu fein gewählte Zuschläge, welche auftretende Spannungen der Zementhärtung nicht ausreichend abbauen können. Hinzu kommen Bewegungen innerhalb des Werkstoffverbunds Marmormauerwerk durch Erdbeben, Spannungen aufgrund von Unterschieden der thermischen Dilatation von Marmor und Restauriermörtel sowie die Expansion von rostenden Abstandhaltern aus Eisen im Inneren der Fuge. Das Fugenmaterial muss aufgrund dieses Schadens als desolat eingestuft werden. Es kann seine Funktion nicht mehr erfüllen und erlaubt das ungestörte Eindringen von Regenwasser in das Innere der Mauerkonstruktion. Ein rasches Austrocknen der Fuge ist aufgrund der sonst sehr kompakten Struktur der Fugenmasse nur langsam möglich.

Kritisch anzumerken ist zum Abschluss der Betrachtung ebenfalls die anzunehmende hohe Festigkeit sämtlicher zementgebundener Restauriermörtel. Diese liegt mit Sicherheit über den Werten der gealterten Marmorsubstanz. Auftretende Spannungen im Verband führen deshalb nicht zu einer Schädigung der Zementmasse, sondern zu einer Zerstörung des antiken Originals. Dieser Zustand ist nach heutigem Wissenstand nicht akzeptabel, und die harte, zementgebundene Masse sollte durch einen weicheren, hydraulischen Kalk ersetzt werden.

II.2.4.2.3 *Metalle*

Wie in der Bestandsaufnahme definiert, handelt es sich bei allen eingebrachten metallischen Elementen der Anastylose um Eisenverbindungen. Eisen ist unter natürlichen Bedingungen nicht stabil und einem sog. Korrosionsprozess unterworfen. Darunter versteht man im All-

gemeinen einen elektrochemischen Prozess, in welchem das Metall durch Oxidation in einen anderen Stoff (= Korrosionsprodukt) überführt wird. Dieser Vorgang läuft grundsätzlich über ein lokal ausgebildetes galvanisches Element ab¹³⁴². Voraussetzung dafür sind elektrische Potenzialunterschiede auf der Metalloberfläche (Anode, Kathode) sowie das Vorhandensein eines Elektrolyten. Die Einzelvorgänge im galvanischen Element sind die Lösung von Metallionen an der Anode (Oxidation), die Entstehung eines elektrischen Stroms im Inneren des Metalls, ein Ionentransport im Elektrolyt und die Sauerstoffreduktion an der Kathode¹³⁴³. Das Endprodukt und Kennzeichen aktiver Korrosion von Eisen wird umgangssprachlich als Rost bezeichnet. Es handelt sich um ein komplexes Gemisch aus verschiedensten Eisenoxiden und -hydroxiden mit charakteristischer gelbroter bis brauner Färbung. Im Gegensatz zum Eisen ist Rost porös, er besitzt geringe Festigkeit, eine höhere Masse und ein größeres Volumen. Bedeutend ist im Bauverband vor allem die Volumenausdehnung, welche große Sprengkraft entwickelt. Die Folgen sind Risse und Abplatzungen bis hin zum vollständigen Versagen der konstruktiven Verbindung.

Die sichtbaren Klammern und Armierungen des ›Hadrianstempels‹ zeigen an sämtlichen Oberflächen Korrosionsprodukte, zumal eine Oberflächenbehandlung, etwa in Form eines Schutzanstrichs, unterlassen wurde. Bezüglich des Schadensausmaßes der Korrosion lässt sich eine klare Unterscheidung je nach Expositur und individuellen Bedingungen ausmachen: besonders stark betroffen sind jene Eisenelemente, welche sich nicht sichtbar im Inneren von Lagerfugen befinden. Offensichtlich kommt es dort immer wieder zu längeren Phasen hoher Feuchtigkeit, die durch offene Risse und das nur partiell geschlossene Fugennetz eindringt. Bei einzelnen Exemplaren ist die Korrosion bereits so weit fortgeschritten, dass diese als vollständig zerstört eingestuft werden müssen (Taf. 194, 2). Davon abgeleitet ergibt sich aufgrund der wichtigen Funktion der Eisen im Mauerverband eine deutliche Schwächung der Konstruktion, und es besteht ein latentes statisches Risiko.

Eine weitere Zone mit ausgeprägter Schädigung durch Korrosion sind die Eisenträger von Architrav **40A**. Probleme bereitet in diesem Fall aber nicht die Zerstörung des Eisens an sich, denn die verwendeten Eisenbahnschienen sind sehr dick und werden in ihrer Substanz nur unwesentlich reduziert, sondern vielmehr die damit einhergehende Volumenvergrößerung. Die auftretenden Kräfte sind so groß, dass sich in der angrenzenden Steinsubstanz Risse ausgebildet haben und große Stücke abzufallen drohen. Dieses Schadensbild findet sich am ›Hadrianstempel‹ nur ein weiteres Mal, und zwar in Form einer Klammer zwischen den Blöcken **095L** und **098D**. Auch hier droht aufgrund der Expansion eines Eisens ein größeres Stück abzufallen¹³⁴⁴.

Im Gegensatz dazu zeigen die frei exponierten Eisenelemente nur gering ausgebildete Korrosionsschichten. Diese zeichnen die Oberfläche nach und sind vermutlich nur wenige Mikrometer dick. Das Schadensausmaß ist dementsprechend vernachlässigbar. Die Ursache des guten Erhaltungszustands dieser Elemente ist das zumeist trockene, semiaride Klima von Ephesos. Eine Schwachstelle frei exponierten Eisens ist in Einzelfällen die Verankerung im Naturstein. Der für die Verklebung der Klammern angewandte Kunststoff zeigt sich hier oft gerissen und bietet Möglichkeiten für das Eindringen von Wasser. Nicht auszuschließen ist ebenfalls eine korrosionsfördernde Wirkung des Kunststoffs selbst (Taf. 195, 1).

Der Zustand der eisernen Abstandhalter in den Lagerfugen ist ähnlich schlecht wie jener der dortigen Klammern. Der überwiegende Teil ist aufgrund der streckenweise hohen Feuchtigkeit im Inneren der Fuge stark von Korrosion betroffen (Taf. 195, 2). Probleme ergeben sich hierbei weniger für die Eisen selbst, denn diese erfüllen keine erkennbare Funktion im Rahmen der Natursteinkonstruktion. Es besteht vielmehr eine schädigende Wirkung in Folge der Volumenausdehnung und der Zerstörung angrenzender mineralischer Substanz, bei der es sich meist um

¹³⁴² Schwarz 1999, 4.

¹³⁴³ Schröder u. a. 2009, 228.

¹³⁴⁴ s. dazu Kap. II.2.4.3.

Fugenmasse handelt. Ein erheblicher Anteil von Rissen in diesem Bereich dürfte auf die Korrosion von Eisen zurückzuführen sein. Die Risse wiederum ermöglichen ein besseres Eindringen abfließenden Niederschlagswassers und begünstigen die weitere Korrosion.

II.2.4.2.4 *Kunststoff*

Die abschließende Stoffgruppe der Zustandsbeurteilung umfasst den angetroffenen Kunststoff. Wie die IR-Spektroskopie ergab, handelt es sich ausschließlich um ungesättigtes Polyesterharz, dem je nach Anwendungsgebiet als Klebstoff oder Ausgleichsmasse zum Schließen von Rissen ein gewisser Prozentsatz an Füllstoffen beigegeben worden war. Die entscheidenden Faktoren der Alterung von Kunststoffen sind Wärme, UV-Strahlung, Sauerstoff (O₂), Ozon (O₃), Feuchtigkeit, Schadgase und Mikroorganismen¹³⁴⁵. Im angegriffenen Kunststoff kommt es dadurch entweder zu einem Auseinanderbrechen der Polymerketten, der sog. Depolymerisation, oder zu einer Quervernetzung der Polymere und einer sog. Versprödung. Da diese Faktoren im Zuge der freien Bewitterung immer gekoppelt auftreten, ist eine Rückführung der Schadensausbildung auf einzelne Einflüsse nur schwer möglich.

Das vorhandene Schadensbild der Polyesterharze am »Hadrianstempel«, mit seinen deutlich sichtbaren Rissen und einem Kontaktverlust zum Untergrund (HTEMP 10. 11), lässt hier folgende entscheidenden Faktoren vermuten: eine Schrumpfung oder Versprödung des Kunststoffs infolge der Oxidation, d. h. der Einwirkung von Sauerstoff und Ozon. Hinzu kommen Spannungen im Kunststoffgefüge, die vor allem bei Polyesterharz im Zuge seiner Erhärtung durch Schrumpfung von ca. 7–8 V% entstehen, welche es durch beigeetzte Füllstoffe abzufangen gilt. Da dies jedoch nicht zur Gänze möglich ist, hat großflächig und dick aufgetragenes Polyesterharz meist angelegte Rissstrukturen und eine verminderte Haftung zum Untergrund.

Eine weitere Ursache von Spannungsrissen sind die vorhandenen mechanischen Belastungen, wie sie beispielsweise an Klebeflächen auftreten. »Zu einer Rissbildung kommt es insbesondere dann, wenn der unter Einwirkung mechanischer Spannungen stehende Kunststoff in Kontakt mit [...] wässrigen Lösungen [...] gerät«¹³⁴⁶. Laut Auskunft des Produzenten des verwendeten Polyesterharzes am »Hadrianstempel« hat diese Kombination mechanischer Belastung mit Wassereinwirkung in gemäßigten Breiten mit höheren Feuchtigkeitswerten zu einem häufigen Versagen von Klebungen geführt. Dementsprechend wird heute von der Verwendung dieser Produkte im Freien abgeraten. Der Erhaltungszustand des Polyesterharzes muss als schlecht eingestuft werden. Es ist aufgrund der deutlich ausgebildeten Rissstrukturen nicht mehr in der Lage, seine Funktion als Klebstoff oder als Abdichtungsmasse zur Verminderung des Wassereintrags zu erfüllen.

II.2.4.3 AKUTE SCHÄDEN MIT ERHEBLICHER GEFAHR

Im Rahmen der Zustandserfassung konnten mehrere Areale und Werkblöcke lokalisiert werden, an welchen das Schadensausmaß bedrohliche Ausmaße erreicht hat. Diese Bereiche stellen aufgrund der Gefahr durch herabfallende Teile eine ernstzunehmende Bedrohung dar. Für Ephesos, das jährlich von mehreren Millionen Touristen besucht wird, hat dieser Aspekt besondere Bedeutung, zumal hier die Gefahr von Personenschäden durch herabfallende Bruchstücke besteht. Die fünf Gefahrenzonen konzentrieren sich im Bereich des Türsturzes des Cellaportals und des östlichen Fassadengebälks:

Der Werkblock **053G** ist der oberste Stein der Nordostecke und bildet das östliche Ende des Giebels (Taf. 196, 1). Der ursprünglich monolithische Block zeigt sich heute infolge der mehrmaligen Zusammenstürze und durch mechanische Belastungen in vier Teile gebrochen. Für die Wiederverwendung im Rahmen der Anastylose 1957/1958 wurde der Block mit Polyester

¹³⁴⁵ Benedix 2011, 463.

¹³⁴⁶ Benedix 2011, 465–466.

verklebt. Interessanterweise erfolgte diese Klebung nicht vollständig, denn es wurden nur drei Teile verbunden, während der oberste Teil einfach aufgelegt wurde.

Akute Gefahr geht vor allem von zwei größeren Schollenbildungen mit mehreren Kilogramm Gewicht im Bereich der Traufleiste (Sima) aus. Die Schollen sind von deutlichen Rissstrukturen umgeben. Anhand der Ultraschalluntersuchung und der akustischen Überprüfung konnte die Loslösung der Stücke vom Untergrund dokumentiert werden.

Eine weitere Schwachstelle stellt die historische Verklebung der Anastylose des Horizontalgeisons dar. Laut den niedrigen Werten der Ultraschallgeschwindigkeit ist auch hier der Kontakt zum Untergrund so gut wie nicht vorhanden. Des Weiteren sind die sichtbaren Eisenverbindungen als nicht funktionsfähig einzustufen. Die Klammer der Oberseite stellt keinen Schutz für ein vertikales Abrutschen der Verklebung dar, und die zweite Verbindung im Stoßfugenbereich zu dem angrenzenden Werkblock **052G** ist nur noch zur Hälfte vorhanden. Der vordere Bereich dürfte, gemeinsam mit einem Steinstück, schon vor etlichen Jahren von dort ausgebrochen sein.

Der Architrav **040A** befindet sich ebenfalls im östlichen Teil des Fassadengebälks (Taf. 196, 2) und überspannt dort die Distanz zwischen dem östlichen Eckpfeiler und der östlichen Säule, wo er vollflächig auf dem Kapitell aufliegt und an dem Pfeiler eine Eckverbindung mit dem anschließenden Architrav **089A** einght. Im Zusammenhang des konstruktiven Aufbaus erfüllt der Architrav eine Schlüsselposition und überträgt das gesamte Gewicht des östlichen Gebälks inklusive des halben Bogengewichts in die Kapitelle der zwei Stützen. Der Werkblock ist folglich erhöhter statischer Belastung ausgesetzt, und wie das vorhandene Schadensbild zeigt, kam es bereits einmal zu einem Bruch des Steins. Dieser Schaden musste für die Zweitverwendung des Architravs in der Anastylose behoben werden. Die österreichischen Restauratoren arbeiteten für die Verklebung der Gesteinsbruchstücke mit dem Steinkleber Akemie Universal + HS Paste¹³⁴⁷. Größere Fehlstellen wurden mit zementgebundener Steinerfüllungsmasse geschlossen. Zur statischen Stabilisierung wurden zusätzlich zwei Eisenträger eingebracht. Diese finden sich auf der Unterseite des Architravs in zwei schlituartigen Ausnehmungen, direkt anschließend an das Dekorfeld. Ihre Enden verschwinden unter der Auflagefläche der anschließenden Kapitelle von Säule und Pfeiler. Geschätzt, dürfte sich die Länge der Träger leicht über die Hälfte der jeweiligen Auflagefläche erstrecken. Die Existenz vertikaler Verbindungselemente wird vermutet, konnte jedoch nicht nachgewiesen werden.

Hauptschadensfaktor ist die Korrosion der Eisenträger. Ein wesentlicher Beschleunigungsfaktor der Korrosion besteht in Form von eindringendem Regenwasser über die vorhandenen Rissysteme. Es sind vor allem die in der Anastylose verklebten und gekitteten Risse, die sich als mangelhaft erwiesen. Die Expansion der Eisenelemente vollzog sich im Anschluss daran quer zum Verlauf der Träger. Zum aktuellen Zeitpunkt hat sich sowohl an der Innen- als auch an der Außenseite ein davon abgeleitetes Rissystem gebildet, und es drohen große Stücke der Unterkanten abzufallen (Taf. 196, 2).

Der dritte Bereich mit absturzgefährdeten Gesteinsbruchstücken findet sich an Werkblock **095L** des Tympanonreliefs. Der Schaden ist an der Hinterseite ausgebildet, und die Ursache der vorhandenen Schollenbildung kann auf die Korrosion einer Eisenklammer zwischen den Blöcken **095L** und **098D** zurückgeführt werden (Taf. 197, 1–2). Der vorhandene Riss zeigt Weiten von bis zu 2 mm, und das Bruchstück hat sich deutlich vom Untergrund gelöst.

Der schadhafte Werkblock **099D** findet sich ebenfalls im Bereich des Tympanonreliefs (Taf. 197, 3–4). Es handelt sich um den östlich an das Relief anschließenden Stein, welcher an der Vorderseite den Ansatz eines Gurtbogens der Vorhallenüberdachung trägt. Der Werkblock besteht aus zwei Teilen, die für den Wiederaufbau mit Polyesterharz verklebt wurden. Das vorhandene Schadensbild besteht aus einem komplexen Rissbild an der Hinterseite des Blocks (Taf. 197, 3). Die Ausbildung desselben deutet auf die Folgen eines historischen Einsturzes hin.

¹³⁴⁷ Miltner 1959a, 2.

Im Zuge der freien Verwitterung der letzten 50 Jahre im Rahmen der Anastylose haben sich die Risse kontinuierlich vergrößert. Zwei Bruchstücke sind dementsprechend bereits abgefallen und wurden auf der Mauerkrone liegend aufgefunden. Der Absturz weiterer Gesteinsfragmente ist eine Frage der Zeit.

Der letzte Bereich mit akut absturzgefährdeten Teilen stellt der aus Beton bestehende Türsturz **168Te** des Cellaportals dar (Taf. 193, 2). Die schadhafte Stelle befindet sich im östlichen Abschnitt an der Unterseite des Ortbetonkörpers. Die Ursache des Schadens ist eine Korrosion der Eisenbewehrung im Inneren des Betons. An der Oberfläche zeichnet sich ein deutliches Rissnetz ab, und es haben sich bereits mehrere Teile vom Untergrund gelöst. Ein Absturz ist jederzeit zu befürchten.

II.2.4.4 WASSERHAUSHALT

Die gesonderte Behandlung des Wasserhaushalts im Falle des ›Hadrianstempels‹ liegt in zwei Punkten begründet. Erstens fehlt dem erhaltenen Rest des Bauwerks in Form der heutigen Anastylose die wichtigste bauliche Konstruktion zur Kontrolle des Wassers: das Dach. Dieser Umstand ist bei Ruinen oder freigelegter Bausubstanz an archäologischen Grabungen die Regel¹³⁴⁸. Zweitens spielt das Element Wasser eine erhebliche Rolle im Rahmen vieler Verwitterungsprozesse und ist eine der wesentlichsten Ursachen für auftretende Schäden an Bauwerken und Baustoffen¹³⁴⁹. So hat Wasser eine ausgeprägte Polarität und ist ein sehr gutes Lösungs- und Transportmedium für ionische Bindungen¹³⁵⁰. Mineralischen Baustoffe¹³⁵¹ werden dadurch selbst angegriffen und gelöst oder mitgeführte Stoffe in den Baustoff eingebracht (Salze).

Zur Veranschaulichung des Faktors Wasser und der damit in Verbindung stehenden Schadensprozesse am Tempel wird zuerst die klimatische Situation im Raum Ephesos kurz definiert. Im Anschluss erfolgt die Nachzeichnung des Weges des Niederschlagswassers als einer der gravierendsten Schadensfaktoren. Vervollständigt wird das Thema mit einer näheren Betrachtung des Verhaltens der wesentlichen Baustoffe Marmor und Beton. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf den Messungen mit dem ›Karsten'schen Prüfröhrchen‹ und im Labor.

II.2.4.4.1 Klima von Ephesos

Die Region der Westtürkei liegt in der Zone des sog. Mittelmeerklimas¹³⁵². Kennzeichnend für dieses sind trockene und warme Sommermonate ohne nennenswerte Niederschläge und feuchte, mäßig kalte und niederschlagsreiche Wintermonate (arides Klima). Laut den vorhandenen Klimamessdaten mehrerer Jahre¹³⁵³ (Tab. 8 Taf. 191, 1; 198, 1) gestaltet sich ein typischer Jahresverlauf in der Region Ephesos wie folgt:

Die Sommermonate Juni, Juli und August sind fast ohne Niederschläge (0,3–2,2 mm) und mit mittleren Temperaturen von bis zu 27,7°C sehr heiß. Durch die starke Sonneneinstrahlung ist die Luftfeuchtigkeit am Tag niedrig und die Verdunstungsrate hoch. In der Nacht steigt die Luftfeuchtigkeit aber durch die Nähe zum Meer und den Temperaturrückgang auf über 80 % an. Die Monate September und Oktober sind die Übergangszeit hin zur feuchten und kalten Jahreszeit. Sie sind gekennzeichnet durch einen Rückgang der Temperatur um ca. 5–10°C, bei gleichzeitigem Anstieg der mittleren Luftfeuchtigkeit um etwa 5–10 %. Niederschläge sind selten und liegen zwischen 31,4 und 53,7 mm.

¹³⁴⁸ How 2007, 10.

¹³⁴⁹ How 2007, 12 f.

¹³⁵⁰ Benedix 2011, 151 f.; Snethlage 1985, 20–22.

¹³⁵¹ Bei Mineralien herrscht die Ionenbindung oder Salzbindung (elektrostatische Kräfte zwischen Anion und Kation) vor. Etwa 90 % der Mineralien weisen Ionenbindungen in ihrer Kristallstruktur auf, die von Wasser angegriffen werden kann. s. dazu Grotzinger – Press – Siever 2008, 57–61.

¹³⁵² Tuttahs 2007, 14.

¹³⁵³ Die angegebenen Daten stammen von der Wetterstation der Stadt Selçuk der Jahre 2000–2006.

Tabelle 8: Klimadaten von Selçuk der Jahre 2000–2006

Parameter	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
Temperatur (°C)	8,4	8,6	11,7	15,4	20,0	25,0	27,7	27,3	22,4	17,6	12,8	9,3
Maximaltemperatur	13,4	14,3	18,2	21,7	27,0	32,3	35,4	35,1	30,5	25,7	19,7	14,2
Minimaltemperatur	4,3	4,1	6,7	10,0	13,3	17,4	19,9	20,1	15,7	11,7	7,9	5,4
Luftfeuchtigkeit (RH)	59,9	56,9	54,6	54,5	48,9	41,2	43,3	47,9	51,3	56,1	61,6	61,6
Niederschlagsmenge (mm)	124,6	112,2	54,7	46,9	20,3	2,2	0,3	0,5	31,4	53,7	153,5	106,3

Die kalten Monate November, Dezember, Januar und Februar sind die niederschlagsreichste Zeitspanne im Jahreszyklus mit monatlichen Niederschlagsmengen von über 106,3 mm. In der Regel fällt hierbei der Regen nicht gleichmäßig verteilt, sondern es gibt eine relativ große Schwankungsbreite zwischen den Monaten (Taf. 198, 1). Gemessene Spitzenwerte liegen über 300 mm neben niederschlagsarmen Monaten von 40 mm. Die mittleren Temperaturen sinken in dieser Zeit auf die niedrigsten Werte mit einem Tagesmittelwert von 8,4–12,8°C. Im Gegensatz dazu erreicht die Luftfeuchtigkeit ihre höchsten Werte im Jahreszyklus. In der Nacht wird regelmäßig die 90 %-Marke überschritten, und es kommt zu Kondenswasserbildung an exponierten Oberflächen. Am Tag führt die Sonneneinstrahlung zu einem Rückgang der Luftfeuchtigkeit und feuchte Flächen trocknen auf. Dieser Prozess ist jedoch durch die geringe Kraft der Sonne, die kühlen Temperaturen und die niederschlagsreichen Wolken verlangsamt und zieht sich über Stunden. Frost ist äußerst selten und kommt, wenn überhaupt, nur in einzelnen Nächten vor.

Ab März wird das Wetter wieder freundlicher. Die Regenwahrscheinlichkeit sinkt, die Temperaturen steigen von 11,7 auf 20°C, die Luftfeuchtigkeit geht zurück. Dieser Trend zieht sich über den gesamten April und Mai hinweg bis zum Erreichen der trockenen, heißen Sommermonate.

II.2.4.4.2 Der Einfluss des Niederschlags

Eine Vielzahl der vorgefundenen Schadensbilder am ›Hadrianstempel‹ ist in Verbindung mit Wassereintrag durch Niederschläge zu interpretieren. Die durchschnittliche Regenmenge pro Jahr beläuft sich auf ca. 700 mm, mit den größten Mengen in den kühlen Wintermonaten. Die Niederschläge treffen aufgrund des fehlenden Dachs direkt auf sämtliche exponierten Flächen der erhaltenen Substanz auf. Es sind dies die Mauerkronen, vertikale Mauerflächen und der Boden.

Dem Weg des Niederschlagwassers folgend, werden zuerst die Mauerkronen näher betrachtet. Im Bereich der Cella (Ost-, Nord-, Südwand) bestehen diese vorwiegend aus Bruchsteinmauerwerk. Deren Substanz aus Gesteinsbruchstücken und Mörtel zeigt an vielen Stellen Probleme. Geschädigt ist hierbei vor allem der Mörtel, welcher stellenweise bereits komplett in seine Bestandteile zerfallen ist¹³⁵⁴. Die Konsequenz sind eine hohe Zahl lockerer Steine und ein intensives Wachstum von Pflanzen im degradierten Mörtel (Taf. 198, 2). Auftreffendes Niederschlagswasser reagiert in diesem System auf mehrere Weisen. Zum einen wird es von dem degradierten Mörtel gut aufgenommen und gelangt über Löcher und Hohlräume in das Innere der Wand. Das eindringende Wasser führt gelöste Stoffe (Salze) sowie Erde und Sand mit sich und reichert diese im Mauerwerk an. Gleichzeitig greift es hierbei auch das Kalkbindemittel des Mörtels chemisch an und dient als lebenswichtige Grundvoraussetzung für die im Fugenbereich wachsenden Pflanzen.

Die Mauerkrone der Vorhalle besteht im Anschluss daran vorwiegend aus großen, marmornen Quaderblöcken, welche die gesamte Tiefe der Mauer einnehmen. In regelmäßigen Abständen finden sich Stoßfugen quer zum Wandverlauf. Diese sind nur in einzelnen Fällen mit Mörtel aufgefüllt und stehen in der Regel offen. Ungefähr die Hälfte der Steine ist an ihren Oberseiten

¹³⁵⁴ s. dazu Kap. II.2.4.1.3.

mit Eisenklammern untereinander verbunden. Die Klammern und einzelne Risse wurden bei dem Wiederaufbau 1957/1958 mit einem Kunststoff ausgegossen. Im Falle von Niederschlägen kommt es zu Wasseransammlungen auf der Oberfläche der Marmorblöcke, da dieses Gestein prinzipiell keinen Porenraum aufweist und Wasser nicht kapillar transportiert. Vorhandene Vertiefungen, wie Bearbeitungsspuren mit dem Spitz Eisen oder Ausarbeitung für Klammern und Hebevorrichtungen (z. B. Wolfsloch), füllen sich mit Wasser. Bei stärkeren Regenfällen läuft das Wasser schließlich über und rinnt, je nach Relief der Oberfläche, über mehrere Seitenflächen ab. Die offenen Stoßfugen ermöglichen hierbei das Eindringen von Wasser in das Innere des Mauerwerks. Ähnliches geschieht ebenfalls bei vielen mit Polyester verklebten Rissen, die sich nach 60 Jahren Wassereinwirkung vom Untergrund gelöst haben. Der problematische Aspekt dieser Situation besteht vor allem im Eindringen des Wassers in das Innere der Mauer. Dieses staut sich in den unterhalb der Mauerkrone verlaufenden horizontalen Lagerfugen für lange Zeit und führt zu einer intensiven Korrosion sich dort befindender Eisenklammern (Taf. 197, 2)¹³⁵⁵. Daraus ergibt sich eine deutliche Schwächung der Konstruktion, sodass ein latentes statisches Risiko besteht.

Die letzte Zone der Mauerkrone bildet die Portalwand in die Cella mit ihrem Wandabschluss aus einer durchgängigen Lage Beton. Dieser Werkstoff nimmt Wasser, ähnlich wie Marmor, nur in sehr geringem Maße auf, wodurch es bei Niederschlägen zu einer raschen Wasseransammlung an der Oberfläche kommt. Da der Betonkörper keine Risse oder Fugen aufweist und weitestgehend eben ist, fließt das Wasser beim Überlaufen nicht in das Innere der Wandkonstruktion, sondern sucht sich seinen Weg über angrenzende vertikale Wandflächen.

Diese vertikalen Wandflächen sind schließlich auch die nächste Etappe des abfließenden Niederschlagswassers. Wie stark eine vertikale Fläche durch Wasser belastet, ist hängt von der Saugfähigkeit der Mauerkrone und der verwendeten Materialien, dem Relief der Mauerkrone sowie der Windrichtung ab. Bezüglich des ersten Aspekts, der Saugfähigkeit, ergibt sich eine geringere Abflussrate im Bereich der Bruchsteinmauer. Dort wird der Großteil des Wassers vom (degradierten) Mörtel in die Substanz der Mauer aufgenommen, und nur bei sehr heftigen Regenfällen kommt es zu einem Flüssigkeitsstrom über die Oberfläche. Das in die Bruchsteinmauer aufgenommene Wasser zeigt sich in trockenen Perioden anhand feuchter Stellen, die nur langsam austrocknen. Die Mauer bildet hierbei in diesen vertikalen Flächen sehr gute Wachstumsbedingungen für Pflanzen. Des Weiteren kommt es bei der Austrocknung zur Ausscheidung mitgeführter Salze des eingedrungenen Wassers. Derartige Schäden finden sich am ›Hadriantempel‹ jedoch nur sehr gering und auch nur lokal begrenzt¹³⁵⁶.

Marmor und Beton sind im Gegensatz dazu sehr dichte Baustoffe mit geringer Saugfähigkeit und Wasseraufnahme. Der größte Anteil des Wassers fließt demnach über die Oberfläche ab. Man sieht diese Wasserwege relativ deutlich anhand von Schadensbildern, in welchen Wasser eine entscheidende Rolle spielt. Dies sind Lösungsvorgänge der Bausubstanz selbst, das Wachstum von Mikrobiologie in den durch die Lösung aufgerauten Oberflächen sowie Krustenbildungen in Verdunstungszonen oder an Abtropfkanten. Markant fällt hierbei vor allem der Zusammenhang Wasserweg und Oberflächenrelief ins Auge. Das Wasser fließt nämlich nicht gleichmäßig ab, sondern wird an einzelne Stellen konzentriert. Bevorzugte Wege sind beispielsweise Fehlstellen und Ausbrüche, vorhandene Rissstrukturen, offene Fugen und definierte Kanäle an plastisch ausgearbeiteten Oberflächen. Am deutlichsten sieht man diese Zusammenhänge im Bereich der Südansicht der Fassade (Taf. 199, 1). Ein längeres Rückhalten des Wassers erfolgt ausschließlich in Rissen und offenen Fugen, während exponierte Marmor- und Betonoberflächen relativ rasch wieder austrocknen.

Die Hauptwindrichtung in der Region Ephesos während der niederschlagsreichen Wintermonate ist Südwest bis Südost. In diese Himmelsrichtungen exponierte vertikale Wandflächen werden demnach direkt beregnet. Nach dem vorliegenden Datenmaterial der Kartierung (biogene

¹³⁵⁵ s. dazu Kap. II.2.4.2.3.

¹³⁵⁶ s. dazu Kap. II.2.4.1.3.

Besiedlung, Auswaschung Beton Taf. 136–144. 153–160) ergibt sich daraus kein erheblicher Unterschied für die jeweiligen Wandflächen. Dieser Umstand liegt darin begründet, dass die betreffenden Flächen von dem vorhandenen Relief der Mauerkrone überlagert werden, d. h., der Wasserabfluss von der Mauerkrone führt in vielen Fällen zu einer starken Belastung von vom Regen abgewandten Bereichen.

Die letzte Etappe des Niederschlagswassers ist schlussendlich der Boden des ›Hadriantempels‹. Dieser besteht zum Großteil aus einer eingebrachten Lage aus Kies und Sand und, vor allem in der Vorhalle, aus einzelnen originalen Bodenplatten. Im gesamten Innenraum hat sich ein massives, flächiges Fundament aus *opus caementicium* erhalten, das einst die Unterkonstruktion des Fußbodens bildete¹³⁵⁷. Diese Bausubstanz ist in sehr gutem Zustand und erweist sich als relativ wasserundurchlässig. Nach längeren, heftigen Regenfällen bilden sich sowohl in der Vorhalle als auch in der Cella Pfützen, die sich dort über mehrere Tage halten können (Taf. 199, 2). Die Bedingungen der bodennahen Bereiche im geschützten Innenraum der Cella sind teilweise so feucht, dass dort in den Wintermonaten Moos wächst.

Der Eintrag von abfließendem Regenwasser der Umgebung findet beim ›Hadriantempel‹ nur sehr gering statt. Seine Rückseite ist eingebettet in die freigelegte Bausubstanz des Variusbades, welche Wasserströme vom Panayırdağ blockiert. Im Westen befindet sich abschüssiges Gelände aus Bauschutt mit einem Gefälle hin zu einer Raumeinheit direkt vor der Kuretenstraße. Von abfließendem Wasser über die Kuretenstraße selbst wird der Tempel durch seinen Stufenaufbau geschützt. Bei heftigen Regenfällen fließt ein Wasserstrom teilweise erheblichen Ausmaßes direkt an dem Tempel vorbei. Die einzige Stelle mit nennenswerten Effekten ist die Ostseite. Dort befindet sich der Treppenaufgang mit seinen dazugehörigen Podesten am oberen und unteren Ende. Niederschlagswasser fließt hier potenziell nahe der Wand ab und kann durch den Durchgang nach der Antenwand in die Vorhalle eindringen. Da diesbezüglich aber keine Schädigung festzustellen ist und sich am Übergang Mauer – Boden viele Verwitterungsprodukte angesammelt haben, dürfte dieses Ereignis nur äußerst selten vorkommen.

II.2.4.4.3 Wasser und Marmor

Das wichtigste antike Baugestein des ›Hadriantempels‹, der Marmor, reagiert mit Wasser auf unterschiedlichste Weise. Zum einen wird er vom Wasser über einen Lösungsangriff direkt angegriffen und sein Mineral Kalzit zerstört. Zum anderen dringt das Wasser in vorhandenen Porenraum ein und führt dort zu einem breiten Spektrum an Schäden wie Frost- und Salzsprengung, Quellungsvorgängen oder auch zu einem erhöhten Wachstum von Mikroorganismen¹³⁵⁸.

In der Regel führt eine starke Wasserbelastung immer zu einer erhöhten Gefahr und signifikanten Beschleunigung der Schädigung von Marmor¹³⁵⁹. Sichtbar sind diese Gesteinsschäden meist in Form einer Gefügezerstörung, des sog. Zuckerzerfalls. Derartige Stellen kommen am ›Hadriantempel‹ relativ oft vor und wurden im Rahmen der Zustandserfassung (s. Kap. I.7.4.1) als Oberflächenverlust 2 und 3 klassifiziert.

Um die Wechselwirkung geschädigter Areale mit Wasser zu untersuchen und zu quantifizieren, wurde an ausgewählte Bereiche das ›Karsten'sche Prüfröhrchen‹ angesetzt. Die einzelnen Messungen erfolgten über einen Zeitraum von einer Stunde im Intervall von 5, 10, 15, 30 und 60 min. Ein vorzeitiger Abbruch der Messung wurde nach der Überschreitung des Endpunkts der Skala bei 4 ml vorgenommen. Die Daten sind zur Veranschaulichung in einem Diagramm der Menge an aufgenommenen Wasser gegen die Zeit (Taf. 200, 1) erfasst. Die Gruppierung der Messungen

¹³⁵⁷ Zu einer im Ostteil des Innenraumes durchgeführten Sondage s. Kap. I.4.2.5.

¹³⁵⁸ s. dazu Kap II.2.4.1.2.

¹³⁵⁹ s. dazu Grimm – Schwarz 1985, 73; Poschold 1990, 11.

orientiert sich an dem jeweiligen Verwitterungsgrad der Oberflächen (Oberflächenverlust)¹³⁶⁰. Die in der Grafik enthaltenen Daten entsprechen einem Mittelwert aus drei Messungen vor Ort¹³⁶¹.

Es ist klar ersichtlich, dass Marmoroberflächen mit geringer Schädigung (Oberflächenverlust 1) nur sehr wenig bis gar kein Wasser aufnehmen. Das darunterliegende Marmorgefüge ist gesund, und es ist fast kein Porenraum ausgebildet. Mit zunehmendem Zerstörungsgrad der Marmoroberfläche steigt schließlich auch die Wasseraufnahme. Im Fall der leicht entfestigten Oberflächen (Oberflächenverlust 2), welche durch den Ausbruch einzelner Kalzitkristalle ein ausgeprägtes Relief zeigen, steigt die Wasseraufnahme deutlich an. Die höchsten Werte erreichen dann schließlich die Bereiche mit der stärksten Entfestigung und dem größten Substanzverlust (Oberflächenverlust 3). Nach einer Stunde Einwirkzeit des ›Karsten'schen Prüfröhrchens‹ nehmen diese Oberflächen im Mittel 2 ml Wasser auf.

Massive Probleme hinsichtlich des zukünftigen Erhalts der Substanz des ›Hadrianstempels‹ ergeben sich daraus für jene Bereiche mit hohem Zerstörungsgrad bei gleichzeitig hoher Belastung durch abfließendes Niederschlagswasser. Das Wasser dringt dort leicht und rasch in das Innere ein und führt zu einer Beschleunigung vieler Verwitterungsfaktoren, vor allem dem Wachstum von Mikroorganismen. Besonders dramatisch erscheint hierbei der drohende Verlust in den Bereichen des Gebälks und der Kapitelle mit reicher plastischer Oberflächendekoration. Diese Oberflächen sind wichtige Zeugen der hohen bildhauerischen Qualität und maßgeblich für das Erscheinungsbild des Tempels.

II.2.4.4.4 Wasser und Beton

Die Reaktion von Wasser und Beton, dem wichtigsten Baustoff der Anastylose 1957/1958, ist vergleichbar vielfältig wie jene des Marmors. Auch hier kommt es zu Lösung, Frost- und Salzsprengung, Quellungsvorgängen und einem erhöhten Wachstum von Mikroorganismen. Dementsprechend führt eine starke Wasserbelastung von Betonoberflächen ebenfalls zu einem erhöhten Schadensausmaß. Besondere Bedeutung in diesem System hat die Ausbildung des Porenraumes des Betons, eine direkte Folge des Herstellungsprozesses¹³⁶². Je höher der Anteil an kapillaraktiven Poren, desto tiefer kann das Wasser in die Substanz eindringen und seine schädigende Wirkung entfalten. Dies betrifft vor allem die Möglichkeit, die im Inneren des Betons liegende Bewehrung zu erreichen und dort zu Korrosionsschäden zu führen.

Im Rahmen der Untersuchung des Wasserverhaltens des Betons wird in die in der Bestandsaufnahme definierten Gruppen – Schalung *in situ*, Schalung Werkstatt und Abformung – unterschieden. Die Methode umfasst Messungen mit dem ›Karsten'schen Prüfröhrchen‹ inklusive der Analyse von Wasseraufnahme und -abgabe im Labor an den entnommenen Bohrkernen (HTEMP K1–5). Die Daten sind zur Veranschaulichung in einem Diagramm der Menge an aufgenommenem Wasser gegen die Zeit (Taf. 201, 2) dargestellt. Die in der Grafik enthaltenen Daten entsprechen einem Mittelwert aus drei Messungen vor Ort¹³⁶³.

Hierbei zeigt sich, dass die Betonelemente der Gruppen Schalung, Werkstatt und Abformung nur relativ wenig Wasser aufnehmen. Das Betongefüge ist dicht, und es ist ein geringer Anteil an kapillaraktiven Poren ausgebildet. Dementsprechend konzentriert sich die Schädigung durch Wasser auf den oberflächennahen Bereich und eine tief greifende Schädigung kann ausgeschlossen werden.

Wesentlich komplexer gestaltet sich im Anschluss daran das Wasserverhalten der Betonelemente Schalung *in situ*. Hier ließen sich erhebliche Schwankungen der Wasseraufnahme feststellen, die in der großen Bandbreite unterschiedlicher Betonmischungen sowie der nachträglichen

¹³⁶⁰ s. dazu Kap. II.2.4.1.2.

¹³⁶¹ Für die Einzelwerte der Messungen s. Kap. II.2.3 Tabellen.

¹³⁶² s. dazu Kap. II.2.4.2.1.

¹³⁶³ Für die Einzelwerte der Messungen s. Kap. II.2.3 Tabellen.

Oberflächenbearbeitung ihre Ursache haben¹³⁶⁴. Im Allgemeinen ist die gemessene Wasseraufnahme mit durchschnittlich 1,2 ml in 60 min groß. Davon abgeleitet haben diese Elemente einen erheblichen Anteil an kapillaraktiven Poren, und im Fall von starken Niederschlägen kann das Wasser tief in das Innere eindringen. Folge ist eine erhebliche Gefahr der Bewehrungskorrosion der *in situ* hergestellte Betonelemente.

II.2.4.5 BESCHREIBUNG DES STATISCHEN ZUSTANDS¹³⁶⁵

II.2.4.5.1 Allgemeines

Der ›Hadrianstempel‹ ist Bestandteil der Originalbausubstanz der umgebenden Insula, deren größten Teil das Variusbad einnimmt¹³⁶⁶. Entsprechend dem Geländeanstieg nach Norden zum Panayırdağ befindet sich das Gelniveau der umgebenden Badeanlage auf einer Höhe von etwa 3,60 m über dem erhaltenen Boden des Tempels. Die Cellawände des Tempels reichen an der West-, Nord- und Ostseite über diesen Laufhorizont und sind in das umgebende Erdreich eingebettet. Wie die Neuvermessung des Variusbades im Jahr 2011 ergab, reichen die umgebenden Substruktionen der Badeanlage an der West- und Ostseite bis an die Tempelmauern heran. Die Antenwände und die Straßenfassade ragen hingegen aus der Baumasse des Variusbades heraus und stehen frei. Vereinfacht gesprochen, könnten sie als ein eingeschossiger Skelettbau aufgefasst werden.

II.2.4.5.2 Fundamente

Konkrete Informationen über die Gestaltung der Fundamente liegen lediglich für die Cella – und auch hier nur in eingeschränktem Maß – vor¹³⁶⁷. Die Unterkonstruktion der Cella wird von einer flächigen und sehr harten *opus caementicium*-Schicht gebildet, welche in die unterste Lage der aufgehenden Cellamauern einbindet. Ob sich unter den Mauern selbst noch eine zusätzliche Fundamentierung befand, ist mangels Untersuchungen nicht zu beurteilen. Ebenso wenig lassen sich Aussagen für die Situation im Pronaos treffen. Es ist lediglich zu vermuten, dass das Fundament der Straßenfassade mit seinen Punktlasten der Säulen und Pfeiler entweder aus einem durchlaufenden Streifenfundament oder aus vier Einzelfundamenten besteht.

Die gesamte Fundamentierung und Unterkonstruktion der Mauern und der Fassade zur Kurentenstraße hin ist in statischer Hinsicht als einwandfrei und standfest zu bezeichnen. Die Übertragung der Lasten in den Baugrund ist in ihrer Funktion gegeben, aktive Setzungsvorgänge oder Gleitbewegungen können nicht festgestellt werden.

II.2.4.5.3 Das Mauerwerk des Innenraumes

Das Mauerwerk der Cella besteht aus horizontalen Lagen grob zugehauener Steine. Zwischen den einzelnen Lagen finden sich sog. Ausgleichslagen aus kleinen, flachen Steinbruchstücken. Es sind keine Risse oder Verformungen festzustellen. Lediglich an den Mauerwerkskronen der West-, Nord- und Ostseite sind durch die nicht mehr vorhandene Abdeckung Verwitterungsschä-

¹³⁶⁴ s. dazu Kap. II.2.4.2.1.

¹³⁶⁵ Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit dem baustatischen Zustand nach dem Wiederaufbau der 1950er Jahre, s. dazu Kap. I.2.3 sowie Kap. I.1.4. Zu Überlegungen die Antike betreffend s. Kap. I.4.2.4 und Kap. I.4.2.6. Für Hinweise sei H. Quatember gedankt. Zu den 2013/2014 erfolgten Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen s. Wissenschaftlicher Jahresbericht des Österreichischen Archäologischen Instituts 2013, 30; Wissenschaftlicher Jahresbericht des Österreichischen Archäologischen Instituts 2014, 37–41 <<https://www.oeaw.ac.at/oeai/kommunikation/jahresberichte>> (22. 9. 2017).

¹³⁶⁶ Zur Beschreibung des Variusbades vgl. Kap. I.7.1.

¹³⁶⁷ Vgl. dazu Kap. I.4.2.5.

den zu konstatieren. Folgen sind eine Lockerung der Bruchsteine sowie der Eintrag von Erde und Schmutz in das Innere der Mauermaße.

II.2.4.5.4 *Die Wände des Pronaos*

Die Wand zwischen Pronaos und Cella sowie die östliche Antenwand bestehen ebenfalls aus Bruchsteinmauerwerk, das an drei Höhenstufen von sog. Binderscharen durchbrochen wird. Diese wiederum werden im erhaltenen antiken Bauverband in Bodennähe aus die gesamte Wandstärke einnehmenden, exakt zugerichteten Quadersteinen abgebildet. Im oberen rekonstruierten Bereich der Wände wurden bewehrte Ortbetonroste zur Verschließung des Mauerwerks ausgeführt. Dadurch erhöhte sich die Stabilität der Mauer. Zusätzlich ragen die Binderscharen und bewehrten Ortbetonroste in Richtung Vorhalle ca. 15 cm über die Wandfläche hinaus und sind in die dekorative Wandgestaltung eingebunden. Sie zeigen dort ein durchlaufendes Mäandermotiv und schaffen eine horizontale Gliederung der Wandfläche. Gleichzeitig dienen sie als Auflager für die dazwischen angebrachten Orthostatenplatten.

Der obere Abschluss von Portalwand und Anten besteht aus einem in mehreren Lagen gefertigten bewehrten Betonkörper. Richtung Vorhalle sind diesem etwa 20 cm dicke Kopien des ehemals dort angebrachten Relieffrieses (**085Re–088Re**) vorgehängt. Über dem Portal bildet der Betonkörper die Türverdachung. Er ist im vorderen Bereich als Fertigteil hergestellt und wurde beim Versetzen mit dem oberen Teil des Betonkörpers kraftschlüssig verbunden. Im Bereich des Übergangs von der Portalwand zur westlichen Ante besteht eine Fehlstelle dieses Betonkörpers.

In der Nordwand des Pronaos befindet sich ein Türdurchgang. Die Türleibungen bestehen im bodennahen Bereich aus den originalen Marmorsteinen (**076T. 077T. 081T. 082T**), an welche im Zuge des Wiederaufbaus Ortbetonkörper angegossen wurden. Das dekorative Profil Richtung Vorhalle wurde hierbei in Form von ca. 15–20 cm starken Betonkopien dem Ortbetonkörper vorgestellt. Der Ortbetonkörper der Laibung wird an beiden Seiten von fünf Längseisen (Dm 16 mm) in gesamter Höhe durchzogen¹³⁶⁸.

Der Türsturz besteht analog den Türleibungen ebenfalls aus einem Ortbeton mit vorgestelltem Profil Richtung Cella. Sowohl der Ortbeton als auch das vorgeblendete Profil des Türsturzes sind jedoch weitaus stärker mit Eisen bewehrt, um die vorherrschenden Biegezugkräfte aufnehmen zu können. Laut den vorliegenden naturwissenschaftlichen Untersuchungen¹³⁶⁹ sowie den Freileigungsarbeiten im Zuge einer Notsicherung 2012 wird der Sturz bis in eine Tiefe von 13 cm von sieben Längseisen (Dm 16 mm) durchzogen. Diese sind mit den Längseisen der Ortbeton-Laibungsstützen kraftschlüssig verbunden. Der Zustand der Portalwand und der Antenwände zeigt keine statische Rissbildung. Zu bemängeln ist ausschließlich die Fehlstelle im abschließenden Betonkörper am Übergang von Portalwand zur westlichen Ante.

II.2.4.5.5 *Die Straßenfassade*

Die Fassadenarchitektur Richtung Kuretenstraße ruht auf insgesamt vier Stützen in Form von zwei seitlichen Pfeilern und zwei zentralen Säulen. Analog den Verbindungen der Kapitelle mit den Architraven¹³⁷⁰ dürften auch die einzelnen Bauteile der Säulen und Pfeiler (Postament, Basis, Schaft, Kapitell) untereinander mit Dübeln von 16 mm Stärke verbunden sein (Taf. 201, 1). Zusätzlich dazu findet sich in sämtlichen Lagerfugen Polyesterharz, was auf eine flächige Verklebung der Blöcke untereinander deutet (Taf. 201, 2). Des Weiteren besteht bei den aus Ortbeton hergestellten Schäften des östlichen Pfeilers sowie den beiden zentralen Säulen eine kraftschlüssige vollflächige Verbindung zwischen der eingefüllten Betonmasse und der jeweiligen Auflager

¹³⁶⁸ Vgl. dazu Kap. III.2.1.2: Messung 4320–4325.

¹³⁶⁹ Vgl. dazu Kap. III.2.1.2: Messung 4312.

¹³⁷⁰ Der Nachweis dieser Verbindungen erfolgte in der auf diesem Forschungsvorhaben anschließenden Restaurierungskampagne 2013/2014.

der Basen. Der westliche Pfeilerschaft besteht im Gegensatz dazu nicht aus Ortbeton. Er setzt sich aus zwei vertikalen Hälften zusammen. Der hintere Teil (**110S**, **142Se**) ist dreiteilig aus antikem Marmor und einem eingeschobenen Betonfertigteile hergestellt. Der vordere, ergänzte Teil (**013Se**) wurde aus einem durchgehenden Fertigteile angefertigt. Insofern ist anzunehmen, dass mehr als ein Dübel eingesetzt wurde und beide Pfeilerhälften vermutlich über je zwei Dübel mit der Basis bzw. mit dem Kapitell verbunden sind.

Statische Probleme bestehen im Bereich sämtlicher Stützen in Form deutlicher Schiefstellungen. Die Messungen der Schiefstellung erfolgten mit dem Lot. Der östliche Pfeiler neigt sich ca. 3 cm nach Osten, die östliche Säule etwa 2,6 cm nach Osten und ca. 1 cm nach Norden, die westliche Säule ungefähr 2,5 cm nach Süden und etwa 1 cm nach Westen und der westliche Pfeiler ca. 2 cm nach Süden und 1 cm nach Westen. Ein weiteres Problem stellt das Kapitell **018K** der westlichen Säule dar. Dieses zeigt sehr langsame Laufzeiten bei der Ultraschallmessung¹³⁷¹, was auf einen durchgehenden Längsriss in dem Kapitell schließen lässt (Taf. 201, 3).

Auf den Stützen der Straßenfront ruht die Gebälkzone. Die seitlichen Interkolumnien werden von je einem horizontalen Architrav überspannt. Der Mittelteil zeigt eine aus neun Keilsteinen gefertigte Bogenkonstruktion, die einen seitlichen Horizontalschub von ca. 2,2 kN in beide Richtungen ausübt¹³⁷². An den Gebäudeecken knickt das Gebälk um 90° nach Norden um und verläuft horizontal zu den vorspringenden Antenwänden. Während im geraden Bereich das Gebälk dreiteilig aus Architrav-, Fries- und Gesimsblöcken angefertigt ist, sind die Keilsteine des Bogens als Architravfriese in einem Stück gearbeitet, und das Gebälk ist (inklusive der Gesimse) in diesem Bereich somit nur zweiteilig.

Die Verbindungen der Architrave zu den Stützen sind folgendermaßen gestaltet¹³⁷³: An der Westseite liegt **100A** sowohl auf der Antenwand als auch auf dem westlichen Pfeilerkapitell **014K** ohne Verdübelung auf. Der horizontale Architrav **029A** im westlichen Bereich der Straßenfront ist hingegen mit dem Pfeilerkapitell **014K** verdübelt. Im östlichen Teil des Architravs **029A** besteht eine Verbindung zu dem Kapitell **018K** über einen Dübel als auch durch angegossenen Ortbeton. Der östliche horizontale Architrav **040A** ist mit Kapitell **021K** und mit **025K** durch je einen Dübel verbunden. An der Ostseite des Tempels liegt **089A** ohne zusätzliche Verbindung auf der Ante auf. Eine Dübelverbindung besteht lediglich mit dem Pfeilerkapitell **025K**. Alle Dübel haben einen Durchmesser von 16 mm. Die Architravblöcke sind an den Tempelcken auf Gehrung geschnitten.

Der Zwischenraum von Pfeiler und Ante im Osten ist erheblich kleiner als derjenige im Westen. Dies ist mit baulichen Veränderungen im Zuge eines historischen Einsturzes und Wiederaufbaus in Verbindung zu bringen.

Das Gebälk läuft über den Antenwänden aus und ist im Bereich der Nordwand des Pronaos nicht erhalten. Die Verbindungen der horizontalen Architrave verlaufen gegen den Uhrzeigersinn von Westen nach Osten folgendermaßen: **102A** ist mit zwei Klammern (Rundeisen, Dm 8 mm) in der Oberseite mit **100A** verbunden. Dieser wiederum hat eine Klammer (Rundeisen, Dm 16 mm) als Eckverbindung zum Architravblock **029A**. Sowohl der Bogenansatz an **029A** als auch derjenige an **040A** weisen zwei Dübel (Dm 10 mm, Taf. 192, 4) als Verbindung am Bogenansatz auf. Als Eckverbindung zu **089A** hat **040A** zwei Klammern in Form von Bandeisen (B 45 mm, D 5 mm, Taf. 202, 1) in der Oberseite sowie an der nach außen gerichteten Seitenfläche eine weitere Klammer mit identischen Dimensionen. **089A** ist mit dem anschließend verbauten Architravblock **092A** modern durch eine Klammer (Bandeisen, B 45 mm, D 5 mm) auf der Oberseite verbunden.

¹³⁷¹ Vgl. dazu Kap. II.2.3.1 Tabellen.

¹³⁷² Die Berechnung des Horizontalschubs erfolgte im Rahmen der Restaurierung 2013/2014 durch den Statiker Wolfgang Nesitka.

¹³⁷³ Der Nachweis dieser Verbindungen erfolgte in der auf diesem Forschungsvorhaben anschließenden Restaurierungskampagne 2013/2014.

Im Zuge des Wiederaufbaus mussten mehrere horizontale Architrave durch Armierungen gestärkt werden. **100A** an der Westwand des Tempels weist einen Querriss auf, der mit Polyester verklebt und mit drei etwa 15 cm tief in den Seiten eingelassenen Dübeln (Dm 16 mm) armiert wurde. Zusätzlich wurde die antiken Klammerbettung an der Seitenfläche zum Inneren des Pronaos für eine moderne Klammer (B 12 mm) wiederverwendet. Die östliche Hälfte von **029A** wurde in Form von Ortbeton ergänzt und besitzt eine Bewehrung in Längsrichtung mit 16 mm starken Eisen, die ca. 15 cm in das erhaltene Original eingreifen¹³⁷⁴. Am massivsten waren die Eingriffe in die antike Substanz von **040A**: ein vorhandener Riss wurde mit Polyester verklebt. In die Unterseite wurden zwei Nuten eingearbeitet, in die man zwei Schienen der sog. Feldbahn zur Armierung einbrachte, und die man anschließend mit Zement ausgoss (Taf. 170, 1).

Die Verbindungen der zentralen Bogenkonstruktion zeigt Klammern auf der Oberseite und zusätzliche Dübel (vierkant, 45 mm dick, ca. 15 cm lang) im oberen Drittel der Lagerfuge (Taf. 202, 2–3). Der Schlussstein des Bogens war als letztes am Bogen verbautes Element nicht verdübelt worden. Im Zuge des Wiederaufbaus 1957/1958 wurden die antiken Klammerbettungen auf der Oberseite der Blöcke in der Regel nicht zweitverwendet, sondern durch neue ersetzt.

Die horizontalen Friesblöcke sind mit den darunterliegenden Architraven nicht verdübelt. Eckverbindungen zwischen **101F** und **030F** im Westen sowie zwischen **041F** und **090F** im Osten sind jeweils durch zwei Klammern mit 12 mm Breite in der Oberseite gesichert. **090F** und **093D** sind durch eine einzelne, ebenfalls 12 mm breite Klammer verbunden.

Die abschließende Gesimszone des Gebälks ist in der Regel ebenfalls nicht mit der unterhalb liegenden Frieszone verbunden. Eine Ausnahme stellt Block **094G** an der Ostwand dar, der durch zwei moderne seitliche Klammern im Norden und Süden am darunterliegenden Friesblock **090F** fixiert ist (Taf. 170, 2). Ebenso ist **044G** mit **030F** verklammert. Horizontale Verbindungen bestehen über 8 mm breite Klammern zwischen mehreren Blöcken. So ist der Eckblock **042G** mit dem angrenzenden Block **043G** durch zwei Klammern verbunden. Dies gilt ebenfalls für den östlichen Eckblock **053G**, welcher durch zwei Klammern mit **052G** gesichert ist. Im unteren Bereich des Bogens sind **044G** mit **045G** und **046G** mit einer Klammer verbunden, ebenso der östliche Bogenansatz **051G** und **052G**. Im Bereich von **047G–050G** fehlt jegliche Verklammerung der Blöcke untereinander.

Statische Probleme der Straßenfassade ergeben sich zusammenfassend aus der Schiefstellung der Stützen, dem unzureichenden Verband der Fassade mit der restlichen Bausubstanz des Pronaos und der Cella sowie durch die fortgeschrittene Verwitterung der Verbindungselemente aus Eisen und der historischen Klebungen mit Polyester. Bis zu der Sanierung des Gebäudes 2013–2014 existierte demnach ein latentes Risiko des Fassadeneinsturzes.

II.2.5 Zusammenfassung

Wie sich anhand der Analyse zeigt, findet sich am ›Hadrianstempel‹ über 50 Jahre nach Durchführung der Anastylose ein umfangreiches Schadensbild, das den natürlichen Verwitterungsprozess widerspiegelt. Die Schädigung betrifft sowohl die historischen als auch die eingebrachten modernen Materialien. Aus konservatorischer Sicht muss demnach der Erhaltungszustand als schlecht beurteilt werden, und es besteht in mehrfacher Hinsicht dringender Handlungsbedarf.

Sehr komplex ist das Schadensbild der antiken Marmorsubstanz. Das Spektrum umfasst verschiedene Formen von Rissen, Verlust, Entfestigung, biogener Besiedlung, Krustenbildung und Verschmutzung. Wie der Vergleich mit den vier im Museum gelagerten Friesblöcken der Vorhalle des ›Hadrianstempels‹ zeigt, ist ein erheblicher Teil der Schäden bereits vor der Ausgrabung entstanden. Dies betrifft hauptsächlich Risse, Entfestigung und Verlust. Daneben existieren aber auch Schadensbilder, welche mit der freien Exposition im Rahmen der heutigen Präsentation zusammenhängen. Im Wesentlichen sind das die biogene Besiedlung, Krustenbildungen und

¹³⁷⁴ Vgl. dazu Kap. III.2.1.2: Messung 4317.

Verschmutzungen. Zu einer aktiven Zerstörung der Marmorsubstanz kommt es vor allem in jenen Bereichen, die eine deutliche historische Schädigung haben und eine hohe Belastung durch rezente Verwitterungsfaktoren erfahren. Ein zweiter Schwerpunkt der Schädigung des Marmors besteht in der Wechselwirkung mit eingebrachten Materialien der Anastylose.

Ein dramatisches Schadensbild zeigt sich in sämtlichen Zonen mit Entfestigungserscheinungen, dem sog. Zuckerzerfall von Marmor. Derartige Bereiche befinden sich bevorzugt an abstehenden, fragilen Elementen der plastischen Dekoration sowie entlang der Ecken und Kanten. Das geschädigte Gefüge ist von einem intensiven Rissnetz durchzogen, welches bis in eine Tiefe von mehreren Zentimetern reicht. Einzelne Körner bzw. kleinteilige Konglomerate brechen bereits bei der kleinsten Erschütterung, etwa durch Wind, aus; es besteht große Gefahr eines intensiven Substanzverlusts. Rezente Verwitterungsfaktoren sind Temperaturschwankungen, Lösungsvorgänge und biogene Besiedlung. Eine deutliche Wechselwirkung ist hierbei vor allem an jenen Oberflächen festzustellen, an denen Regenwasser konzentriert über die Fassade abfließt und die Belastung durch biogene Besiedlung besonders stark ist.

Eine weitere aktive Schädigung der Marmorsubstanz besteht im Rahmen vorhandener Rissstrukturen. Hierbei ist anzumerken, dass eine Vielzahl der Risse in stabilem, gutem Zustand ist und keine weitere Schädigung aufweist. Das Schadensausmaß zeigt vielmehr eine deutliche Konzentration auf einzelne Problembereiche mit unterschiedlichen Ursachen. Die Werkblöcke **042L**, **095L**, **096L** und **097L** zeigen beispielsweise eine verstärkte Rissbildung parallel zur Oberfläche, und es droht die abstehende plastische Dekoration verloren zu gehen. Die Schadensursache ist in diesem Fall die natürliche Verwitterung entlang ausgebildeter mineralogischer Schwachstellen im Gestein. Leicht abweichend stellt sich die Situation bei den Blöcken **053G** und **099D** dar: das dort ausgebildete Rissnetz hat seinen Ursprung in mechanischen Belastungen und entstand vermutlich beim Einsturz des Tempels. Die Verwitterung der letzten 55 Jahre führte schließlich zu einer Weitung und Ausbreitung der Risse in das Innere und zu einer Loslösung größerer Bruchstücke, die abzustürzen drohen.

Ähnlich absturzgefährdete Bereiche aufgrund von Rissbildung finden sich bei den Werkblöcken **040A** und **095L**. Die Schadensursache ist in diesem Fall die Korrosion von eingebrachten Eisenelementen der Anastylose. Bei Architrav **040A** handelt es sich um zwei an der Unterseite eingebrachte Eisenbahnschienen zur statischen Armierung des gebrochenen Werkblocks. Werkblock **095L** zeigt eine Schollenbildung aufgrund der Korrosion einer Eisenklammer, welche für die Verbindung zu dem angrenzenden Stein **098D** dient. Das Kapitell **018K** weist einen diagonal durch die gesamte Höhe des Blocks verlaufenden Riss auf, der nach den Ergebnissen von Ultraschallmessungen als durchgängig anzusehen ist. Die Schadensursache besteht in der statischen Überlastung des historisch geschädigten Kapitells im Rahmen der rezenten Anastylose. Der Rissverlauf spiegelt hierbei die vom Bogen eingeleiteten Horizontalkräfte deutlich wider.

Den Abschluss der schadhafte Risse bilden die in der Anastylose verklebten Areale. Es handelt sich um insgesamt 15 Verklebungen, welche mit einem Polyesterharz durchgeführt wurden. Das Harz ist aus heutiger Sichtweise als nicht altersbeständig einzustufen und zeigt deutliche Schrumpfungerscheinungen sowie eine Loslösung vom Gesteinsuntergrund. Anhand der Untersuchung mit Ultraschall konnte nachgewiesen werden, dass eine Vielzahl der Klebungen bereits vollständig gelöst ist und der Rest als stark geschwächt eingestuft werden muss.

Die weiteren Schadensbilder des Marmors – Krustenbildung, Verschmutzungen, Verlust und biogene Besiedlung – stellen im Vergleich zu den vorherigen Schäden keine akute Gefährdung für die Substanz dar. Ihre Beeinflussung ist vielmehr ästhetischer Natur. So haben die rezenten Krustenbildungen in den Regenschattenzonen intensiv rötliche Färbung. Im Gegensatz dazu zeichnet sich der biogene Bewuchs aus diversen Mikroorganismen durch eine schwarze Pigmentierung der Oberfläche aus. Im Fall von Verschmutzungen kommt es durch die Berührung von Menschen entweder zu einer Farbvertiefung oder zu einer Entstellung der Oberfläche durch Mörtel und Klebereste.

Der Zustand der im Zuge der Anastylose 1957/1958 verwendeten Eisenelemente stellt sich besonders schlecht dar und ist einer der Hauptschäden an dem ›Hadrianstempel‹. So zeigen eine

Vielzahl der Elemente, vor allem die Klammern zwischen den Marmorblöcken, eine intensive Korrosion. Diese führt einerseits zu einer Sprengwirkung in der angrenzenden mineralischen Substanz. Die Folge sind Rissstrukturen und Absturzgefahr größerer Teile, wie bei Architrav **040A** und **095L**. Andererseits führt die Korrosion zur Zerstörung der Eisenelemente selbst, deren Funktion verlorengeht. Bei dem ›Hadrianstempel‹ betrifft dies vor allem die Verklammerungen der Werkblöcke untereinander an ihrer jeweiligen Oberseite. Besonders weit vorgeschrittene Stadien der Auflösung zeigen die Eisenklammern in den nicht zugänglichen Lagerfugen. Entscheidend im Hinblick auf die dramatische Schadensentwicklung ist das weitgehend offene Fugenwerk der Natursteinkonstruktion. Über dieses dringt Regenwasser ungehindert in das Innere des Mauerwerks ein, wo es sich im geschützten Bereich der Fugen lange halten kann. Die Verbindung zwischen den Steinen muss demnach als geschwächt eingestuft werden, und die Resistenz gegenüber mechanischen Belastungen, wie sie etwa bei Erdbeben auftreten, ist herabgesetzt.

Der allgemeine Zustand des Bruchsteinmauerwerks kann als relativ gut eingestuft werden. Es zeigen sich keinerlei statische Schadensbilder, die Mauern sind rissfrei, stabil und ohne Verformungen ausgebildet. Sehr gering ist ebenfalls das Schadensausmaß bei den verschiedenen Mauersteinen und dem antiken Mauermörtel. Die einzig festzustellenden Schäden des Bruchsteinmauerwerks umfassen den angetragenen Fugenmörtel der Anastylose und die Reste des antiken Hinterfüllmörtels. Beide Mörtel zeigen deutliche Entfestigung und einen damit einhergehenden Substanzverlust. Als Folge stehen in den rekonstruierten Mauerabschnitten viele Fugen offen und im Bereich der Mauerkrone haben sich Steine aus dem Verband gelöst. Die Fehlstellen im Bruchsteinmauerwerk werden von höheren Pflanzen besiedelt. Ein weiterer Schaden besteht ebenfalls in Form lokal vorhandener Salzausblühungen. Zum aktuellen Zeitpunkt sind von diesem Schaden nur rekonstruierte Bereiche des Bruchsteinmauerwerks betroffen.

Der zentrale Schaden bei den Betonelementen des ›Hadrianstempel‹ besteht in Form einer hohen Korrosionsgefahr der Bewehrungsseisen durch fortgeschrittene Karbonatisierung. Laut den gewonnenen Daten ist dies bei ca. 80–90 % der Betonelemente der Fall. Die Ursache für dieses hohe Schadensausmaß ist vor allem in der Herstellung des Betons zu suchen. Gefundene Schwachstellen sind hohe w/z-Werte, nicht ideale Zusammensetzungen der Gesteinskörnung, ein großer Porenraum sowie große Unregelmäßigkeiten der gemessenen Betonüberdeckung oder Tiefe der Bewehrungsseisen.

Eine aktive Schädigung aufgrund der Korrosion von Bewehrungsseisen findet sich zum aktuellen Zeitpunkt ausschließlich an ausgewiesenen Problemstellen. Es handelt sich um zwei Orthostaten der Vorhalle, bei welchen das Bewehrungsgitter verrutscht ist und direkt unterhalb der Oberfläche liegt. Weiters sind davon Areale des Cellaportals betroffen, welche eine erhöhte Belastung durch abfließendes Niederschlagswasser aufweisen, wie es in der bodennahen Spritzwasserzone und einen Bereich des Türsturzes auftritt. Besonders wichtig ist in diesem Zusammenhang auch die rasche Kapillarwasseraufnahme dieser Betonelemente.

Weitere Schäden der Betonelemente umfassen Krustenbildungen, biogene Besiedlung, Auswaschungen und Rissstrukturen. Diese sind rein oberflächlicher Natur und stellen keine Gefahr für die Betonsubstanz dar. Ihr Schadensausmaß ist wie bei den Marmoroberflächen hauptsächlich ästhetischer Natur. Krustenbildungen verursachen eine rötliche Färbung, Zonen mit Auswaschung zeigen den Verlust der Zementhaut und sind durch biogenen Bewuchs häufig dunkel gefärbt.

Martin Pliessnig

