Andreas Koch

Deformation von Fassadenplatten aus Marmor

Schadenskartierungen und gesteins-technische Untersuchungen zur Verwitterungsdynamik von Marmorfassaden

Universitätsverlag Göttingen

Andreas Koch

Deformation von Fassadenplatten aus Marmor

erschienen im Universitätsverlag Göttingen 2006

Andreas Koch

Deformation von Fassadenplatten aus Marmor:

Schadenskartierungen und gesteinstechnische Untersuchungen zur Verwitterungsdynamik von Marmorfassaden

Universitätsverlag Göttingen
2006

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultäten
der Georg-August-Universität zu Göttingen

D7
Referent: Prof. Dr. Siegfried Siegesmund,
Geowissenschaftliches Zentrum der Universität Göttingen

Korreferent: Prof. Dr. Rolf Snethlage,
Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Oktober 2005

Umschlagestaltung: Maren Büttner, Kilian Klapp
Abbildung: Deformierte Marmorfassade der Niedersächischen Staats- und Universitätsbibliothek
Göttingen, Foto: Andreas Koch

© 2006 Universitätsverlag Göttingen
ISBN-10: 3-938616-47-4
ISBN-13: 978-3-938616-47-5

Kurzfassung/Abstract

Die seit etwa vier Jahrzehnten dauernde Verwendung von Marmor als dünnplattige Fassadenverkleidung hat weltweit an zahlreichen Gebäuden zu Problemen mit der Langzeitstabilität solcher Fassaden geführt. Das dabei oft auftretende Phänomen des Verbiegens von Marmorplatten geht mit einer Materialentfestigung einher, was langfristig die Sanierung der betroffenen Fassaden zur Folge hat und mittlerweile ein Imageproblem für den Werkstoff Marmor darstellt. Die bislang vorhandenen Kenntnisse zu den Ursachen dieser speziellen Form der Marmorverwitterung beschränken sich meist auf Untersuchungen an Carrara Marmor und auf die Wirkung einzelner Faktoren. In der vorliegenden Arbeit wurde der kombinierte Einfluss von umweltbedingten (extrinsischen) und materialspezifischen (intrinsischen) Parametern untersucht. Ihr Wirkungsgrad wird am Beispiel von vier Schadenskartierungen an Marmorfassaden aufgezeigt. Der Schwerpunkt liegt auf dem Einfluss des Mikrogefüges auf die Schadensdynamik von Fassadenmarmor unter besonderer Berücksichtigung der Feuchtigkeit als essentieller Klimafaktor. Basis für die Charakterisierung und Interpretation des Verwitterungsprozesses ist die Erfassung von petrographischen, gefügekundlichen und petrophysikalischen Eigenschaften an bruchfrischen und künstlich verwitterten Marmorproben sowie an demontierten Fassadenplatten unterschiedlicher Vorschädigung von den untersuchten Marmorfassaden. Dazu wurden insgesamt 13 verschiedene Marmore mit sehr verschiedenen Gefügeeigenschaften aus Portugal, der Schweiz, Schweden und Italien untersucht.

Der Verwitterungsprozess wird durch eine thermohygrisch gesteuerte Mikrorissbildung vorangetrieben. Die anisotropen Dehnungseigenschaften der Hauptminerale Calcit und/oder Dolomit führen bei Temperaturänderungen wie Tag-Nacht-Wechseln zu Spannungen im Kornverband und letztlich zur Mikrorissbildung entlang von Gefügediskontinuitäten wie Korngrenzen, Spaltflächen oder präexistierenden Rissen. Die irreversible Restdehnung als Maß für die akkumulierte Mikrorissweitung schreitet bei kontinuierlichen Temperaturwechseln nur unter feuchten Bedingungen weiter fort. Die Verbiegung von Marmorplatten resultiert aus der Restdehnungsdifferenz zwischen Plattenvorder- und Rückseite. Diese Differenz wird mit progressiver Restdehnung größer, so dass die Verbiegung mit der Restdehnung korreliert. Die Anisotropie dieser beiden Deformationsparameter wird maßgeblich von der Textur (kristallographische Vorzugsorientierung) und von der Kornformregelung bestimmt, welche die Mikrorissregelung kontrollieren. In ähnlicher Weise trägt die Mikrorissregelung zur Anisotropie der Biegefestigkeit und der Kompressionswellengeschwindigkeit (V_P) als verwitterungssensible Kenngrößen bei. Die Verbiegung variiert ebenso wie die Biegefestigkeit in Abhängigkeit von der Schnittlage um bis zu Faktor 3. Die richtungsbedingten Unterschiede von V_P betragen bei verwitterten Marmoren bis zu 30 % und sind bei der Bewertung des Erhaltungszustandes zu berücksichtigen.

Die Plattenverbiegung als Indikator für den Grad der Verwitterung geht mit einem Anstieg der Häufigkeit von Rissen sowie einer Veränderung der Porositätskennwerte und einer Reduzierung der mechanischen und elastischen Parameter einher. Sie hängt neben dem Mikrogefüge von äußeren Einflüssen wie der Exposition (Himmelsrich-

tung, Höhe) und bauphysikalischen Besonderheiten ab, welche sich auf den Feuchtegradienten in den Platten als eigentlichen Einflussparameter auswirken.

Beispielhaft durchgeführte Vergleichsmessungen an der Fassade der Universitätsbibliothek in Göttingen über einen Zeitraum von drei Jahren sowie Verwitterungssimulationstests am dortigen Fassadenmarmor lassen ein ungebrochenes Fortschreiten der Plattenverbiegung erkennen. Das Wissen um den zeitlichen Verlauf der Verbiegung und deren Korrelation mit der Entfestigung kann als Basis für Prognosen zur Standsicherheitsbewertung von geschädigten Marmorfassaden herangezogen werden.

For about four decades marble has been used as thin veneer cladding. The durability of such thin slabs (mostly 30-40 mm) is satisfactory at most constructions. However, on numerous buildings all over the world, the long-term deformation (expansion, bowing) of some claddings is associated with structural weakening and strength loss which led to an inevitable restoration of the affected facades and to an image problem of marble used as a structural building stone. Up to now, the existing knowledge about the causes for this special kind of marble weathering is mostly restricted to research on Carrara marble and to the effect of individual parameters. This thesis presents the first study of the combined influence of extrinsic (environmental) and intrinsic (material specific) parameters on marble bowing. The respective impact of these factors on the weathering process is elucidated by damage mapping of four different marble facades. The work focuses on the influence of the microfabric on the damage dynamics of veneer marble and particularly considers moisture as an essential climatic parameter. In order to characterize and understand the weathering process, an array of different marble samples had to be studied with regard to their petrographic, rock physical and microstructural properties. Besides both fresh and artificially weathered marble samples this survey also included demounted façade panels from the investigated buildings with varying degrees of pre-deterioration. All in all 13 different marbles with extremely different fabric properties from Portugal, Switzerland, Sweden and Italy were examined.

Generally the weathering process is promoted by thermal-hygric microcrack propagation. In case of temperature variations, as occuring during day-night cycles, the anisotropic strain properties of the main components calcite and/or dolomite generate stress within the interconnection of grains. This finally leads to microcracking along fabric discontinuities such as grain boundaries, cleavage planes or pre-existing cracks. Irreversible residual strain serves as an indicator of the accumulated extension of microcracks. When a sample is exposed to repeating temperature cycles this parameter reaches a constant value under dry conditions, whereas moisture leads to a further increase of residual strain. The difference between frontside and backside residual strain finally causes bowing of a marble slab, so that a correlation of residual strain and bowing can be found. The anisotropy of both residual strain and bowing is affected by the preferred orientation of microcracks and the width anisotropy of such microcracks which again are finally controlled by the texture (lattice preferred orientation) and the grain shape preferred orientation. In a similar way, the preferred orientation of microcracks contributes to the anisotropy of weathering sensitive parameters, i.e. flexural strength and compressional wave velocity (V_P). Depending on the cutting

direction, bowing as well as flexural strength can vary up to a factor of three. When assessing the structural integrity of already weathered marbles it has to be considered that V_P can vary up to 30% for different directions.

Indicating the degree of deterioration, slab bowing is associated with the frequency of macro-cracks, a change of porosity parameters and a decrease of mechanical and elastic parameters. Aside from the microfabric certain extrinsic factors concerning the exposure of the facade (e.g. height above ground, orientation) and building-specific characteristics are closely connected with the marble bowing, since they are shown to directly influence the intra-slab moisture gradient.

Exemplary long-term field data from the facade of the University Library building in Göttingen as well as weathering simulations of the concerned veneer marble under laboratory conditions reveal an unbroken progress of slab bowing there. The detailed knowledge of long-term bowing dynamics and its correlation with strength loss of veneer panels can provide the basis for risk assessment and prediction of the service life of damaged marble facades.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1

2 Stand der Technik, Terminologie und Zielsetzung 3

2.1 Eigenschaften kristalliner Marmore und Terminologie 3
2.1.1 Marmor und seine mineralogische Zusammensetzung 3
2.1.2 Terminologie 3
2.1.3 Rekristallisationsgefüge 8

2.2 Einflussparameter auf die Schädigung von Marmor 10

2.3 Zielsetzung und Vorgehensweise 11

3 Methodik 15

3.1 Probenorientierung und Referenz-Koordinatensystem (RKS) 15

3.2 Petrographische und gefügekundliche Analysen 15
3.2.1 Mikroskopische und bildanalytische Analysen 15
3.2.2 Neutronentexturanalyse 16

3.3 Petrophysikalische Analysen 17
3.3.1 Ultraschallanalytik 17
3.3.1.1 Ultraschallmessungen an Kugelproben 17
3.3.1.2 Ultraschallmessungen an Fassadenplatten 17
3.3.2 Thermische und hygrische Eigenschaften 18
3.3.2.1 Thermische Dilatation 18
3.3.2.2 Quantifizierungen von Plattenverbiegungen 20
3.3.2.3 Verbiegungsmessung an Fassadenplatten 23
3.3.2.4 Biegetest 24
3.3.3 Mechanische Eigenschaften 25
3.3.3.1 Biegefestigkeit 25
3.3.3.2 Ausbruchlast am Ankerdornloch 25
3.3.4 Porositätskennwerte 26
3.3.4.1 Porosität mittels Auftriebswägung 26
3.3.4.2 Porenradienverteilung und Porosität mittels Quecksilberporosimetrie 26
3.3.4.3 Permeabilität 28

4 Bauwerksuntersuchungen: Fallbeispiele 29

4.1 Oeconomicum, Theologicum und Juridicum auf dem Campus der Universität Göttingen 29
4.1.1 Bauwerkscharakteristika 29
4.1.2 Schadensphänomene 32
4.1.3 Untersuchungsergebnisse 34
4.1.3.1 Einteilung in Schadensklassen und Schadenskartierung 34
4.1.3.2 Zusammenhang zwischen Exposition und Plattenverbiegung 34
4.1.3.3 Relative Häufigkeit sichtbarer Schäden 37

4.1.3.4 Einfluss der Plattendimension ... 39
4.1.3.5 Zusammenhang zwischen Schnittlage und Plattenverbiegung ... 40
4.1.3.6 Zusammenhang zwischen Mikroklima und Plattenverbiegung ... 41

4.2 Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen (SUB) ... 43
4.2.1 Bauwerkscharakteristika ... 43
4.2.2 Schadensphänomene ... 44
4.2.3 Untersuchungsergebnisse ... 45
4.2.3.1 Einteilung in Schadensklassen und Schadenskartierung ... 45
4.2.3.2 Zusammenhang zwischen Exposition und Plattenverbiegung ... 46
4.2.3.3 Relative Häufigkeit sichtbarer Schäden ... 49
4.2.3.4 Seitenausdehnung versus Durchbiegung ... 49
4.2.3.5 Einfluss der Plattengröße ... 51
4.2.3.6 Fortschreiten der Plattendurchbiegung ... 52

5 Gefügeeigenschaften ausgewählter Marmore ... 57

5.1 Provenienz und Makrogefüge ... 57

5.2 Mikrogefüge ... 63
5.2.1 Korngrenzenorientierung an ausgewählten Beispielen ... 75
5.2.2 Korngrößenverteilung an ausgewählten Beispielen ... 78
5.2.3 Textur ... 79
5.2.4 Rissorientierung mittels Ultraschallanalyse ... 83
5.2.4.1 Intrinsische Ultraschallgeschwindigkeit ... 83
5.2.4.2 Rissbedingte Ultraschallgeschwindigkeit ... 86

6 Thermische und hygrische Verwitterung ... 89

6.1 Gefügeabhängigkeit des thermischen Längenänderungsverhaltens ... 90

6.2 Gefügekontrollierte Restdehnung infolge thermischer Mikrorissbildung ... 94
6.2.1 Anisotropie der Restdehnung ... 95
6.2.2 Intensität der Restdehnung ... 97
6.2.3 Progressive Restdehnung unter feuchten Bedingungen ... 99

6.3 Anisotropie und Intensität der Plattenverbiegung ... 101

7 Verwitterungsbedingte Änderung petrophysikalischer Eigenschaften ... 105

7.1 Porenraumänderung ... 105

7.2 Quantifizierung thermisch induzierter Mikrorisse mittels Ultraschallanalyse ... 107

7.3 Entfestigung von Marmor bei künstlicher Verwitterung ... 109

8 Bauwerksuntersuchungen: Weiterführende Untersuchungen an demontierten Fassadenplatten ... 111

8.1 Oeconomicum, Theologicum und Juridicum auf dem Campus der Universität Göttingen ... 111
8.1.1 Verbiegungsgeometrie und räumliche Verteilung der Ultraschallgeschwindigkeit von Marmorplatten ... 112

8.1.2 Mikrogefüge 120
8.1.3 Porositätskennwerte versus Plattenverbiegung 121
8.1.4 Mechanische und elastische Eigenschaften versus Plattenverbiegung 125
8.1.5 Mechanische und elastische Eigenschaften versus Porosität 128

8.2 Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek (SUB) 130
8.2.1 Mikrogefüge 132
8.2.2 Porositätskennwerte versus Plattenverbiegung 133
8.2.3 Mechanische Eigenschaften versus Plattenverbiegung 136
8.2.4 Korrelation zwischen petrophysikalischen Eigenschaften 139
8.2.5 Schadenspotenzial 139
8.2.5.1 Durchbiegung und Expansion unter künstlicher Verwitterung 140
8.2.5.2 Festigkeitsverlust nach künstlicher Verwitterung 141

9 Zusammenfassende Interpretation 143

9.1 Gefügeabhängigkeit der Schadensdynamik von Marmor 144

9.2 Überführung der Laborkenntnisse ans Bauwerk 149
9.2.1 Der besondere Einfluss von Feuchtigkeit auf das Verbiegephänomen 149
9.2.2 Plattenverbiegung: Laboruntersuchung versus in situ Schadensanalyse 153
9.2.3 Schadensanalyse als Basis für Langzeitprognosen 154

10 Literaturverzeichnis 159

Anhang 169

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1 Anisotropie physikalischer Eigenschaften von Calcit und Dolomit 4
Abb. 2.2 Herausbildung von Foliation und Lineation 5
Abb. 2.3 Schematisierte Polfiguren idealisierter Texturtypen 6
Abb. 2.4 Korngrenzengeometrien 6
Abb. 2.5 Klassifizierung von Kornaggregaten in kristallinen Gesteinen 7
Abb. 2.6 Schematische Darstellung der Korngrenzenflächenreduktion 9
Abb. 2.7 Mechanismen dynamischer Rekristallisation 9
Abb. 2.8 Beispiele von Gebäuden mit verbogenen Fassadenplatten 10
Abb. 2.9 Einflussparameter auf die Verwitterung von Marmorplatten 11
Abb. 2.10 Überblick über die Ausbildung einzelner Gefügeelemente 12
Abb. 2.11 Grundstruktur der vorliegenden Arbeit 13

Abb. 3.1 Referenz-Koordinatensystem 15
Abb. 3.2 Messaufbau der Kugelmesseinrichtung 18
Abb. 3.3 Temperaturverlauf und Dehnungskurve während der Dilatationsmessung .. 19
Abb. 3.4 Orientierung der Probekörper zum Referenz-Koordinatensystem 20
Abb. 3.5 Messen unter Nassbedingungen 20
Abb. 3.6 Verformungsgeometrie von Marmorplatten 21
Abb. 3.7 Durchbiegung in Abhängigkeit der Berechnungsweise 23
Abb. 3.8 Aluminium-Messschiene (Biegemeter) 23
Abb. 3.9 Biegetest-Apparatur und Messbrücke 24
Abb. 3.10 Orientierungstypen der Ankerdorne 26

Abb. 4.1 Geisteswissenschaftliches Zentrum der Universität Göttingen 30
Abb. 4.2 Fassadenansicht des Oeconomicums und des Juridicums 30
Abb. 4.3 Befestigungssystem der Fassadenplatten 31
Abb. 4.4 Orientierung der Foliation im Verhältnis zur Schnittrichtung der Platten 32
Abb. 4.5 Schadensphänomene an der Fassadenverkleidung 33
Abb. 4.6 Durchbiegung der Fassadenplatten in Abhängigkeit der Exposition 36
Abb. 4.7 Durchbiegungsanomalie von Ersatzplatten aus Carrara-Marmor 37
Abb. 4.8 Häufigkeitsverteilung der Durchbiegung 38
Abb. 4.9 Relative Häufigkeit von sichtbaren Schäden versus Durchbiegung 39
Abb. 4.10 Zusammenhang zwischen Plattenbreite und Schädigungsgrad 40
Abb. 4.11 Zusammenhang zwischen Schnittlage und Verbiegung 41
Abb. 4.12 Oberflächentemperatur und Plattenverbiegung am Oeconomicum 42
Abb. 4.13 Hauptgebäude der Niedersächsischen Staats- und Universitätsbibliothek .. 43
Abb. 4.14 Schadensphänomene an der Marmorfassade des SUB-Gebäudes 45
Abb. 4.15 Häufigkeitsverteilung der Durchbiegung am SUB-Gebäude 46
Abb. 4.16 Schadenskarten der Gebäudefassade 47
Abb. 4.17 Durchbiegung der Fassadenplatten in Abhängigkeit der Exposition 48
Abb. 4.18 Relative Häufigkeit von sichtbaren Schäden versus Durchbiegung 49
Abb. 4.19 Zusammenhang zwischen Verbiegung, Fugenweite und Höhe 50
Abb. 4.20 Zusammenhang zwischen Verbiegung, Fugenweite und Schadensklasse 51
Abb. 4.21 Zusammenhang zwischen Durchbiegung und Plattenformat 52

Abb. 4.22 Position der Ankerdorne 53
Abb. 4.23 Veränderung der Durchbiegung von 2000 bis 2003 (Zeilenmittelwerte) 54
Abb. 4.24 Veränderung der Durchbiegung von 2000 bis 2003 (Einzelwerte) 54
Abb. 4.25 Veränderung der Durchbiegung von 2000 bis 2003 (Himmelsrichtungen) 55
Abb. 4.26 Veränderung der Durchbiegung von 2000 bis 2003 (Gesamtfassade) 55

Abb. 5.1 Makroskopisches Erscheinungsbild des Peccia Marmors 57
Abb. 5.2 Makroskopisches Erscheinungsbild des Carrara Venato Gioia Marmors 58
Abb. 5.3 Makroskopisches Erscheinungsbild des Ruivina Marmors 59
Abb. 5.4 Makroskopisches Erscheinungsbild des Rosa Estremoz Marmors 59
Abb. 5.5 Makroskopisches Erscheinungsbild des Trigaches Marmors 60
Abb. 5.6 Makroskopisches Erscheinungsbild des Verde Viana Marmors 61
Abb. 5.7 Makroskopisches Erscheinungsbild unterschiedlicher Carrara Marmore..... 61
Abb. 5.8 Makroskopisches Erscheinungsbild des Ekeberg Marmors..... 62
Abb. 5.9 Mikrogefüge des Peccia Marmors 65
Abb. 5.10 Mikrogefüge der Probe Carrara 1..... 66
Abb. 5.11 Mikrogefüge des Ruivina Marmors..... 67
Abb. 5.12 Mikrogefüge des Rosa Estremoz Marmors 68
Abb. 5.13 Mikrogefüge des Trigaches Marmors 69
Abb. 5.14 Mikrogefüge des Verde Viana Marmors 70
Abb. 5.15 Mikrogefüge der Probe Carrara 2..... 71
Abb. 5.16 Mikrogefüge der Probe Carrara 3..... 72
Abb. 5.17 Mikrogefüge der Probe Carrara 4..... 72
Abb. 5.18 Mikrogefüge der Probe Carrara 5..... 73
Abb. 5.19 Mikrogefüge der Probe Carrara 6..... 74
Abb. 5.20 Mikrogefüge des Ekeberg Marmors 75
Abb. 5.21 Korngefüge ausgewählter Marmore 76
Abb. 5.22 Korngrenzenorientierung am Beispiel ausgewählter Marmore 77
Abb. 5.23 Korngrößenverteilung am Beispiel ausgewählter Marmore..... 78
Abb. 5.24 Textur der untersuchten Marmore..... 81
Abb. 5.25 Formfaktor T als Funktion der Intensität des c-Achsenmaximums..... 82
Abb. 5.26 V_P-Verteilung von Kugelproben 85
Abb. 5.27 Anisotropie von V_{Psat} als Funktion der Intensität der Textur 86

Abb. 6.1 Anisotropie des thermischen Verhaltens eines Calcit-Einkristalls 89
Abb. 6.2 Grundmuster des thermischen Längenänderungsverhaltens 90
Abb. 6.3 Anisotropie der thermischen Dilatation (ε) in Abhängigkeit der Textur 91
Abb. 6.4 Anisotropie von α als Funktion der Intensität der Textur..... 92
Abb. 6.5 Ausdehnungskoeffizient α in der Heiz- und Abkühlphase..... 94
Abb. 6.6 Prinzip der Bildung einer Restdehnung im Marmor 95
Abb. 6.7 Restdehnung am Beispiel ausgewählter Marmore 96
Abb. 6.8 Schema der Herausbildung anisotroper Restdehnung 97
Abb. 6.9 Richtungsabhängige Variabilität der Restdehnung 98
Abb. 6.10 Progressive Restdehnung und deren Anisotropie (trocken und nass) 100
Abb. 6.11 Progressive Restdehnung des Marmors Carrara 1a (trocken und nass)..... 101
Abb. 6.12 Durchbiegung von Marmorplatten versus Anzahl der Temperaturzyklen 102

Abb. 6.13 Zusammenhang zwischen Restdehnung und Plattenverbiegung 103

Abb. 7.1 Porenradienverteilung vor und nach künstlicher Verwitterung 106
Abb. 7.2 V_P-Verteilung von Kugelproben vor und nach künstlicher Verwitterung ... 108
Abb. 7.3 Biegefestigkeit vor und nach künstlicher Verwitterung 109

Abb. 8.1 Orthogonales Netz zur Erfassung der Verbiegegeometrie 113
Abb. 8.2 Verbiegungsgeometrie, V_P-Verteilung und Orientierung der Foliation 114
Abb. 8.3 Überhöhte Querprofile durch verbogene Fassadenplatten 116
Abb. 8.4 Schematische Seitenansicht einer Fassadenplatte des Juridicums 116
Abb. 8.5 Ermittlung der Durchbiegung B als Funktion des Messabstandes L 117
Abb. 8.6 Zusammenhang zwischen v/h und Verformungsgeometrie 118
Abb. 8.7 v/h einzelner Marmorplatten am Beispiel unterschiedlicher Fassaden 118
Abb. 8.8 Korngefüge des Peccia Marmors in Fassadenplatten 120
Abb. 8.9 Nutzporosität der demontierten Marmorplatten 122
Abb. 8.10 Mittlere Porenradienverteilung versus Intensität der Plattenverbiegung 123
Abb. 8.11 Mittlerer Porenradius als Funktion der Porosität 123
Abb. 8.12 Luftpermeabilitäten der demontierten Fassadenplatten 124
Abb. 8.13 Biegefestigkeit als Funktion der Plattenverbiegung 126
Abb. 8.14 Ausbruchlast am Ankerdornloch als Funktion der Plattenverbiegung 126
Abb. 8.15 Biegefestigkeit versus Ausbruchlast am Ankerdornloch 127
Abb. 8.16 V_P versus Durchbiegung (wassergesättigt und trocken) 128
Abb. 8.17 Gesteinsfestigkeit als Funktion der Porosität 129
Abb. 8.18 V_P als Funktion der Porosität (wassergesättigt und trocken) 130
Abb. 8.19 Repräsentative Auswahl von sieben Fassadenplatten 131
Abb. 8.20 Mikrogefüge unterschiedlich stark verformter Marmorplatten 132
Abb. 8.21 Zusammenhang zwischen Porosität und Plattenverbiegung 134
Abb. 8.22 Porenradienverteilung in Abhängigkeit der Plattenverbiegung 135
Abb. 8.23 Mittlerer Porenradius als Funktion der Porosität 136
Abb. 8.24 Porosität und der Porenradienverteilung auf Vorder- und Rückseite 136
Abb. 8.25 Gesteinsfestigkeit versus Plattenverbiegung 137
Abb. 8.26 Biegefestigkeit versus Ausbruchlast am Ankerdornloch 138
Abb. 8.27 Anisotropie der Biegefestigkeit in demontierten Fassadenplatten 138
Abb. 8.28 Gesteinsfestigkeit als Funktion der Porosität 139
Abb. 8.29 Verformung von Fassadenplatten unter künstlicher Weiterverwitterung .. 140
Abb. 8.30 Plattenverbiegung unter natürlicher und künstlicher Verwitterung 141
Abb. 8.31 Festigkeitsänderung unter künstlicher Weiterverwitterung 141
Abb. 8.32 Festigkeit versus Durchbiegung unter künstlicher Weiterverwitterung 142

Abb. 9.1 Schema des Gefügeeinflusses auf die Deformation von Marmorplatten 147
Abb. 9.2 Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und Plattenverbiegung 150
Abb. 9.3 Längenänderungsverhalten unter verschiedenen Feuchtebedingungen 152
Abb. 9.4 Langzeitprognose zur Standsicherheit von Fassadenplatten 156

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Korngrößenskala für kristalline Gesteine 7

Tabelle 4.1: Überblick wichtiger Gebäudedaten. 31
Tabelle 4.2: Einteilung in Schadensklassen 35
Tabelle 4.3: Auswahl von Fassadenplatten 53

Tabelle 5.1: Übersicht über die untersuchten Marmortypen 64
Tabelle 5.2: Übersicht über V_P-Parameter der untersuchten Marmore 84

Tabelle 7.1: Porosität vor und nach künstlicher Verwitterung 106

Tabelle 8.1: Übersicht über demontierte Fassadenplatten 112
Tabelle 8.2: Übersicht zu den demontierten Fassadenplatten am SUB-Gebäude. ... 131

Tabelle 9.1: Durchbiegungsrate der Marmore Peccia und Carrara Venato Gioia. ... 154

1 Einleitung

Seit der Antike wird Marmor als Baumaterial verwendet und ist wesentlicher Bestandteil in zahlreichen kulturhistorisch bedeutsamen Bauten. Im Zuge der Entwicklung maschineller Fertigungstechniken wird Marmor seit einigen Jahrzehnten zunehmend auch als Fassadenmaterial für großflächige Außenwandverkleidungen genutzt. Im gleichen Zeitraum häuften sich die Probleme, die mit einer mangelnden Beständigkeit und einer reduzierten Lebensdauer von Marmorfassaden verknüpft sind. Ausgelöst durch vornehmlich physikalische Verwitterungsprozesse erfährt das Gestein eine Gefügeauflockerung, die mit einer irreversiblen Deformation und Entfestigung einher geht. Das spektakulärste Phänomen ist hierbei das Verbiegen der üblicherweise 30-40 mm dicken Fassadenplatten aus Marmor, welche oftmals bereits nach wenigen Jahren eine konvexe oder konkave Wölbung zeigen. Wenngleich viele Marmorfassaden eine befriedigende Beständigkeit aufweisen, gibt es weltweit zahlreiche Gebäude, bei denen dieses Schadensbild zu aufwändigen Sanierungsmaßnahmen oder zum kostspieligen Austausch ganzer Marmorfassaden geführt hat. Prominente Beispiele sind das Amoco Building in Chicago (Trewitt & Tuchmann 1988), die Finlandia Hall in Helsinki (Royer-Carfagni 1999b) oder der Grande Arche de la Défense in Paris (Bouineau & Perrier 1995).

Generell können bei Marmor vielfältige Verwitterungsformen auftreten wie z.B. Rückwitterung, Krustenbildung, biogene Besiedlung etc., welche aber meist auf dem oberflächennahen Bereich beschränkt bleiben. Die Prozesse, die zur Deformation (Expansion, Verbiegung) von Marmor führen, sind dagegen penetrativer Natur. Sie werden einerseits ausgelöst durch von außen einwirkende (extrinsische) Einflussparameter wie Temperaturwechsel (Tag-Nacht-Zyklen) und Feuchtigkeit. Letzterer nimmt eine Schlüsselrolle ein, die erst in den letzten Jahren Gegenstand von Forschungsarbeiten wurde (Grelk et al. 2004, Koch & Siegesmund 2004b). Auf der anderen Seite sind es die materialspezifischen (intrinsischen) Eigenschaften des Marmors selbst, die eine Deformation bedingen. Die außergewöhnliche thermische Anisotropie der gesteinsbildenden Minerale Calcit und Dolomit führt bei einer Temperaturänderung zu thermischen Spannungen im Kornverband, die zur Entwicklung eines durchdringenden Netzwerks von Mikrorissen entlang mechanischer Schwächezonen im Gestein wie Korngrenzen, intrakristallinen Spaltflächen oder transgranularen Diskontinuitäten führen können. Die Bereitschaft, solche Mikrorisssysteme herauszubilden, hängt von der Ausprägung der Gefügeeigenschaften ab. Hat sich erst einmal eine gewisse Rissporosität entwickelt, können zunehmend auch weitere Verwitterungsmechanismen eingreifen, die auf der Wirksamkeit von Wasser beruhen wie z.B. Lösungsprozesse oder Frostsprengung (Poschlod 1990).

Obwohl bereits zahlreiche Veröffentlichungen zur Verformung von Marmorobjekten existieren (vgl. Überblick in Grimm 1999), mangelt es noch am genauen Verständnis zum komplexen Zusammenwirken der verschiedenen Einflussfaktoren auf den Verwitterungsprozess exponierter Marmorplatten. Das Fehlen dieses Wissens führt in der Praxis seitens von Natursteinproduzenten, Architekten und Gebäudeeigentümern zu großer Unsicherheit bei der Auswahl eines geeigneten Marmors für die Verwendung als Fassadenverkleidung. In der vorliegenden Arbeit soll daher die kombinierte Wir-

kung von extrinsischen und intrinsischen Einflüssen auf die Deformation und Entfestigung von Marmorplatten auf breiter Basis untersucht werden. Dazu werden sowohl in-situ-Beobachtungen an Marmorfassaden als auch Laboruntersuchungen an bruchfrischen, natürlich verwitterten sowie künstlich verwitterten Marmorproben einbezogen. Es wird insbesondere der noch wenig untersuchte Einfluss richtungsabhängiger Gefügeeigenschaften auf die Anisotropie des Verwitterungsprozesses und deren Bedeutung für die Schnittlage von Fassadenplatten aufgezeigt. Die Charakterisierung der verwitterungsbedingten Änderungen im Gestein erfolgt zum einen mittels der Analyse des thermischen Längenänderungsverhaltens und zum anderen mittels Porositätskennwerten sowie elastischen und mechanischen Parametern.

Ein weiterer Schwerpunkt bei der Bewertung äußerer Einflussparameter liegt auf der besonderen Wirkung von Wasser. Plattenverbiegungen treten nur in Ländern mit ausreichenden Niederschlagsmengen auf (Bucher 1956). Aus der Literatur (z.B. Sage 1988) ist bekannt, dass Temperaturwechsel unter trockenen Bedingungen nur eine limitierte Expansion von Marmor bewirken. Thomasen & Ewart (1984) und Bortz et al. (1988) führen die Verbiegung auf Feuchtewechsel in den Marmorplatten zurück. In dieser Arbeit wird der Einfluss von Feuchtigkeit auf die Deformationsrate untersucht und mit der Wirkungsweise unterschiedlicher mikroklimatischer Bedingungen an der Fassade in Beziehung gesetzt.

Wenn eine Marmorfassade bereits charakteristische Schäden aufweist, ist es das Interesse des Gebäudeeigentümers zu wissen, wann Handlungsbedarf besteht und eine kritische Entfestigung erreicht wird, bei der die Standsicherheit der Fassadenplatten nicht mehr gewährleistet werden kann. Die Verknüpfung von Labordaten und Schadensuntersuchungen an der Marmorfassade dient als Basis für Langzeitprognosen und kann zur Beurteilung des zeitlichen Verlaufs der Standsicherheit der Marmorplatten herangezogen werden.

2 Stand der Technik, Terminologie und Zielsetzung

2.1 Eigenschaften kristalliner Marmore und Terminologie

2.1.1 Marmor und seine mineralogische Zusammensetzung

Der Begriff „Marmor“ wird hier im petrographischen Sinne verwendet und meint einen durch Regional- oder Kontaktmetamorphose überprägten sedimentären Kalk- bzw. Dolomitstein mit einem Karbonatgehalt >80 % (Matthes 1993). Die Definition unterscheidet sich von der landläufigen Sprachweise wie sie zum Beispiel in der gesteinsverarbeitenden Industrie verwendet wird, in der Marmor alle polierfähigen Kalksteine oder Dolomite umfasst.

In Abhängigkeit des Gehaltes an Silikaten und anderen Mineralverunreinigungen im ursprünglichen Kalkstein kann der Marmor eine farbige Bänderung oder Änderung des weißlichen Grundtons durch feinverteilte Mineralphasen zeigen, wie z.B. eine grünliche Pigmentierung durch Chlorit oder Serpentinminerale, eine bräunliche und rötliche Färbung durch Eisenoxide oder Grau durch Graphit.

Die Materialeigenschaften eines Gesteins werden allgemein zunächst vom Modalbestand, vom Gefüge und von den Einkristalleigenschaften seiner Mineralphasen gesteuert. Im Falle von anisotropen Mineralphasen ist darüber hinaus die kristallographische Regelung zu berücksichtigen. Das physikalische Verhalten von Marmor als meist nahezu monomineralisches Gestein wird somit wesentlich von den anisotropen Eigenschaften seiner Hauptkomponenten Calcit und/oder Dolomit (beide trigonales Kristallsystem) bestimmt. In dieser Arbeit sind die thermische Längenänderung und die elastischen Eigenschaften von Bedeutung, die durch den Ausdehnungskoeffizienten α und die Kompressionswellengeschwindigkeit V_P zum Ausdruck gebracht werden (Abb. 2.1).

Beide Kenngrößen sind sowohl bei Calcit als auch bei Dolomit extrem anisotrop. Insbesondere Calcit zeigt bei der thermischen Längenänderung nicht nur starke Unterschiede in den Richtungen, sondern sogar gegenläufiges Verhalten, das heißt Dehnung in Richtung der kristallographischen c-Achse ($\alpha = 26 \times 10^{-6}\ K^{-1}$) und Kontraktion parallel zur a-Achse ($\alpha = -6 \times 10^{-6}\ K^{-1}$) bei Erwärmung (Kleber 1990). In der Literatur werden neben weiteren linearen Ausdehnungskoeffizienten (z.B. Skinner 1966, Rao et al. 1968, Reeder et al. 1983, Sage 1988) auch nichtlineare genannt (z.B. Fei 1995).

2.1.2 Terminologie

In der Literatur kursieren sehr unterschiedliche Definitionen zum Terminus „Gefüge“. In dieser Arbeit wird der Begriff weit gefasst und beinhaltet in Anlehnung an Siegesmund (1995) die strukturellen Elemente eines Gesteins, die sich in erster Linie auf den Skalenbereich eines Dünnschliffs beziehen („Mikrogefüge“, vgl. Passchier & Trouw

1996). Zu nennen sind hierbei die Form und Größe der Mineralkörner, die Korngrenzengeometrie, die Vorzugsorientierung nach dem Kristallgitter (Textur) und der Kornform (Kornformregelung) sowie Verteilung, Zustand und Orientierung von Mikrorissen. Die einzelnen Gefügeelemente können sowohl skalare (richtungsunabhängige) als auch vektorielle (richtungsabhängige) Größen darstellen.

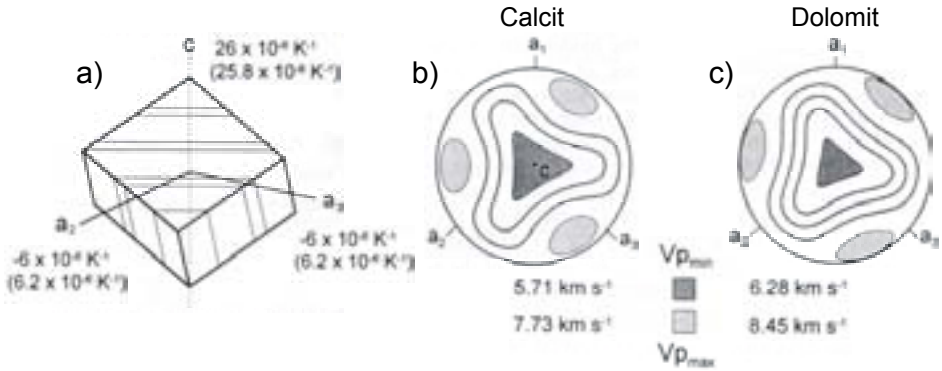


Abb. 2.1: Anisotropie physikalischer Eigenschaften von Calcit und Dolomit (modifiziert nach Leiss & Ullemeyer 1999). a) Ausdehnungskoeffizienten von Calcit (Dolomit in Klammern) parallel zu den kristallographischen Achsen am Beispiel eines Spaltrhomboeders (Daten aus Kleber 1990 [Calcit] und Markgraf & Reeder 1985 [Dolomit]). b,c) Räumliche Verteilung der Kompressionswellengeschwindigkeit (V_P) in einem Calcit- und einem Dolomit-Einkristall (untere Halbkugel; stereographische Projektion; Daten aus Dandekar 1968).

Als Folge seiner geologischen Vorgeschichte (Metamorphose, Deformation) ist im Marmor oftmals eine Vorzugsorientierung von Gefügeelementen gegeben, die zur Herausbildung einer Foliation, einer Lineation oder einer kristallographischen Vorzugsorientierung geführt haben kann (Passchier & Trouw 1996).

Unter Foliation bzw. Lineation wird allgemein ein planares bzw. lineares Merkmal verstanden, das penetrativ im Gesteinskörper anzutreffen ist. In Marmoren wird eine Foliation häufig hervorgerufen durch eine Vorzugsorientierung nach der Kornform deformierter Kristallkörner (Kornformregelung), die mit einer Korngrenzen-Vorzugsorientierung einher geht (Abb. 2.2a). In die Formregelung können sowohl die Hauptkomponente Calcit/Dolomit als auch Nebengemengteile wie z.B. plättchenförmige Glimmerminerale einbezogen sein. Sie orientieren sich nach den Hauptrichtungen der Kräfte, die in der die Metamorphose begleitenden Deformationsphase gewirkt haben. Die beteiligten Minerale haben tendenziell eine diskusförmige (oblate Kornform). Weitere Varianten eines planaren Gefüges sind beispielsweise gegeben durch Korngrößenvariationen (Abb. 2.2b), linsenförmige Mineralaggregate (Abb. 2.2c) oder Lagen unterschiedlicher mineralogischer Zusammensetzung (Abb. 2.2d). Eine Lineation kann das Ergebnis einer Vorzugsorientierung länglich deformierter (prolater) Körner (Abb. 2.2e) oder langgestreckter Kornaggregate sein (Abb. 2.2f).

Die kristallographische Vorzugsorientierung oder Einregelung nach dem Kristallgitter wird in der vorliegenden Arbeit als Textur bezeichnet. Der Begriff orientiert sich an der Definition, wie sie in der Materialwissenschaft in Zusammenhang mit Metall und

Keramik üblich ist und sich in den letzten Jahren auch in der Strukturgeologie zunehmend durchgesetzt hat. Die Textur umfasst die „Gesamtheit der Orientierungen der Kristalle eines polykristallinen Materials“ (Bunge 1982) und kann quantitativ mit der „orientation distribution function“ (ODF; vgl. Dahms & Bunge 1989) beschrieben werden. Sie enthält im Gegensatz zur geologischen Sprechweise keine Aussagen über die Größe, Form und Lage von Mineralkörnern (z.B. Turner 1968, Bucher & Frey 1994).

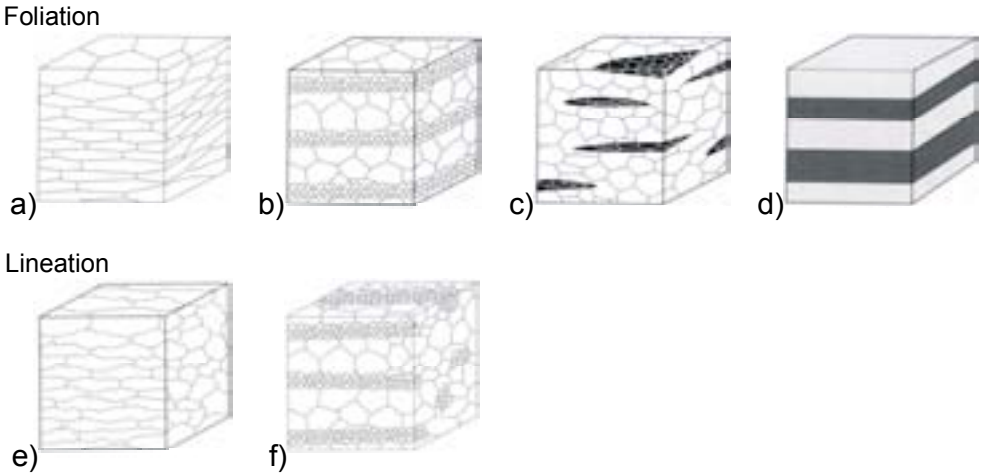


Abb. 2.2: Schematische Darstellung einer Auswahl von Gefügeelementen, die eine Foliation oder Lineation herausbilden können (aus Passchier & Trouw 1996). a) Vorzugsorientierung der Korngrenzen und der Kornform. b) Korngrößenwechsel. c) Vorzugsorientierung linsenförmiger Mineralaggregate. d) Lagen unterschiedlicher Zusammensetzung. e) Dehnungslineation durch länglich deformierte Körner. f) Dehnungslineation durch langgestreckte Kornaggregate.

Die Textur kann charakterisiert werden durch Intensität, Orientierung und Verteilungsmuster. Letzteres bewegt sich bei kristallinen Karbonatgesteinen zwischen zwei idealisierten Endgliedern: dem c-Achsenfasertypen und dem a-Achsenfasertypen (Leiss & Ullemeyer 1999). Die beiden Fasertexturen sind axialsymmetrisch und können als Einkristalle beschrieben werden, die um eine bestimmte Achse rotieren. Beim c-Achsenfasertypen rotieren die Kristalle hierbei um die c-Achse, woraus in der Polfigur ein einzelnes, punktförmiges c-Achsenmaximum resultiert (Abb. 2.3 links oben). Die a-Achsen sind hierbei entlang eines Großkreises senkrecht zum Punktmaximum angeordnet (Abb. 2.3 links unten), alle anderen Kristallflächenpole entlang von Kleinkreisen um die c-Achse. Für den a-Achsenfasertypen hingegen ist die a-Achse die Rotationsachse (Abb. 2.3 Mitte unten). Entsprechend sind die c-Achsen auf einen Großkreis um die a-Achse verteilt (Abb. 2.3 Mitte oben). Als intermediäre Fasertypen bezeichnet man Texturtypen, die sich in der Mitte des Übergangs zwischen den beiden Extrem-Fasertypen bewegen (Abb. 2.3 rechts). Der Texturtyp korrespondiert mit dem Formfaktor T (vgl. Kap. 3.2.2) und kann mit diesem quantitativ beschrieben werden.

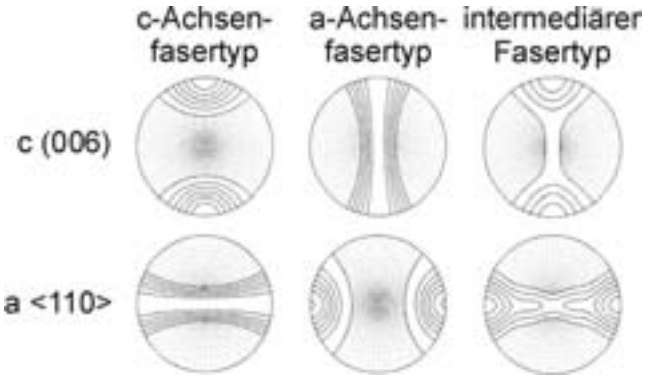


Abb. 2.3: Schematisierte Polfiguren idealisierter Texturtypen (untere Halbkugel; stereographische Projektion; aus Leiss & Ullemeyer 1999).

Der Terminus Korngefüge beschränkt sich auf die Gefügeelemente Korngröße, Kornform, Kornformregelung und Korngrenzengeometrie. Es wird als granoblastisch bezeichnet, wenn sich die Kornaggregate aus gleich großen Körnern mit geraden oder leicht gekrümmten Korngrenzen zusammensetzen. Demgegenüber wird in der Literatur ein Korngefüge häufig als xenoblastisch benannt, wenn die Kristallkörner an irregulären Korngrenzen ineinander verzahnt sind (z.B. Spry 1983, Royer-Carfagni 1999b).

Bezüglich der Korngrenzengeometrie erfolgt eine grobe Unterteilung in polygonal (gerade bis leicht gekrümmte Korngrenzen) und interlobat (ineinander lappende Korngrenzen; Moore 1970). Polygonale Kristalle stellen ein Gleichgewichtsgefüge dar und stehen am Ende des Prozesses der statischen Rekristallisation, in welchem unter Temperaturzufuhr die Grenzflächenenergie im polykristallinen Kornverband durch Korngrenzenmigration reduziert wird (Passchier & Trouw 1996). Die Folge ist eine Reduktion der Korngrenzenflächen („grain boundary area reduction"), aus der am Ende ein Korngefüge mit gleich großen, polygonalen Körnern und glatten Kornflächen resultiert (vgl. Kap. 2.1.3).

Die Geometrie der Kornkontakte ist für das Schädigungspotenzial eines Marmors von besonderer Bedeutung, da sie Einfluss auf die innere Kohäsion des Kornverbandes haben. Ebene Korngrenzflächen stellen eine relativ schwache Bindung dar, während mit zunehmender Verzahnung die mechanische Festigkeit stärker wird. Die Korngrenzengeometrie wurde in der vorliegenden Arbeit daher nach dem Schema in Abb. 2.4 feiner unterteilt.

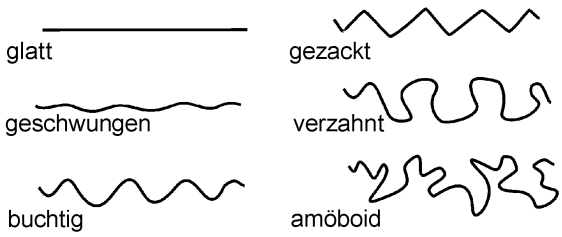


Abb. 2.4: Unterscheidbare Korngrenzengeometrien im Skalenbereich eines Dünnschliffes (nach Rüdrich 2003).

Die Korngröße eines Marmors ist insofern von Bedeutung, da sie die Häufigkeit von Korngrenzen kontrolliert, welche als mechanische Schwachstellen Einfluss auf das Schädigungspotenzial ausüben. Die eigentliche Korngröße bezieht sich entweder auf Einzelkörner oder auf die mittlere Korngröße eines Marmors. Die Benennung unterschiedlicher Korngrößen erfolgt in der vorliegenden Arbeit nach der Unterteilung von Teuscher (Tab. 2.1).

Bezeichnung	Korndurchmesser [mm]
dicht	< 0,01
sehr feinkörnig	0,01 - 0,1
feinkörnig	0,1 - 0,3
kleinkörnig	0,3 - 1,0
mittelkörnig	1,0 - 3,3
grobkörnig	3,3 - 10
großkörnig	10 - 33
riesenkörnig	> 33

Tabelle 2.1: Korngrößenskala für kristalline Gesteine (nach Teuscher; aus Wimmenauer 1985)

Der Anteil einzelner Korngrößenfraktionen am Gesamtvolumen bzw. die Variationsbreite unterschiedlicher Korngrößen eines Marmors wird durch die Korngrößenverteilung zum Ausdruck gebracht. Hierbei kann zwischen einer equigranularen (alle Körner etwa gleich groß), einer inequigranularen (bi- bzw. polymodale Verteilung) und einer seriaten (graduellen) Korngrößenverteilung unterschieden werden (Passchier & Trouw 1996). In Kombination mit der Kornform („polygonal“ mit überwiegend glatten Korngrenzen oder „interlobat“ mit eher irregulären Korngrenzen) erfolgt eine Klassifizierung von Kornaggregaten mit unterschiedlichen Größenverteilungen nach dem in Abb. 2.5 gezeigten Schema.

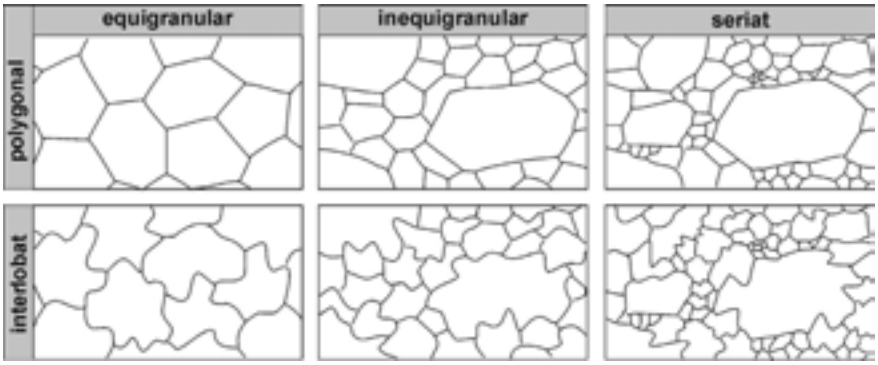


Abb. 2.5: Klassifizierung von Kornaggregaten in kristallinen Gesteinen unter Berücksichtigung der Korngrößenverteilung und der Kornform (nach Moore 1970; aus Passchier & Trouw 1996).

Offene Mikrorisse stellen Trennflächen im Gesteinsgefüge dar und nehmen damit Einfluss insbesondere auf die mechanischen und elastischen Eigenschaften eines Marmors. Sie sind entweder als präexistierende Mikrorisse im Laufe der geologischen Vorgeschichte oder während der Gewinnung durch Exhumierung (Druckentlastung), Transport und Weiterverarbeitung angelegt worden oder als thermisch induzierte Mikrorisse während des Verwitterungsprozesses entstanden. Sie orientieren sich am Verlauf gesteinsinterner Schwächezonen. Abhängig von ihrer Lage lassen sich drei Arten von Rissen unterscheiden: (1) Intergranulare Risse entlang von Korngrenzen, (2) intragranulare Risse entlang von Schwächezonen im Kristallgitter wie Spaltflächen oder Zwillingsebenen und (3) transgranulare Risse, die über mehrere Körner hinweg das Gestein durchziehen und dabei sowohl Korngrenzen als auch intrakristallinen Diskontinuitäten folgen können (vgl. Kranz 1983).

Neben offenen Mikrorissen lassen sich mineralisierte und versiegelte Mikrorisse als Risstypen identifizieren. Sie stellen ehemalige Bruchstrukturen dar, die entweder mit der gleichen Mineralphase wie das umgebende Gestein (→mineralisiert) oder mit verschiedenartigen Mineralphase (→versiegelt) verfüllt sind.

Zwillinge sind Kristallverwachsungen, die meist nach bestimmten Gesetzmäßigkeiten entstanden sind. Calcit bildet Druckzwillinge entlang der e{018}-Flächen aus, die bereits bei Raumtemperatur und unter sehr niedrigen Scherspannungen gebildet werden können (Burkhard 1993). Sie sind im Dünnschliff als feine Parallelstreifung auf Spaltflächen erkennbar. Aus ihrer Erscheinungsform (Breite der Zwillinge, gerade/verbogen, durchgehend, sich verjüngend oder kreuzend) kann auf die Metamorphosebedingungen während der Deformation geschlossen werden (vgl. Burkhard 1993). Druckzwillinge in Dolomit entstehen dagegen erst bei Temperaturen ab 300 °C und bei höheren Scherspannungen parallel zu den f{012}-Flächen (vgl. Newman 1994). Bezüglich der mechanischen Eigenschaften eines Marmors stellen Zwillinge Diskontinuitäten dar, die vor allem bei einer starken Textur zu einer Schwächung in der bevorzugten Ebene beitragen kann.

2.1.3 Rekristallisationsgefüge

Das Gefüge eines kristallinen Gesteins ist letztendlich das Ergebnis miteinander konkurrierender Prozesse während der Deformation. In Dünnschliffen ist der Stand aus der letzten Phase dieser Prozesse gleichsam eingefroren erhalten. Welcher Prozess dominiert, hängt im Wesentlichen von verschiedenen Deformationsparametern ab: Eine hohe Temperatur und die Gegenwart von Fluiden entlang von Korngrenzen begünstigen Erholungs- und Rekristallisationsprozesse, während eine hohe Verformungsrate eine große Fehlstellendichte im Kristallgitter mit hoher interner Verformungsenergie provoziert (Passchier & Trouw 1996).

Herrscht der Erholungsprozess vor, entwickelt sich der Kornverband unter dem Mechanismus der Korngrenzenflächenreduktion („grain boundary area reduction“) in Richtung eines Gleichgewichtsgefüges, in welchem Gitterdefekte und Korngrenzenenergie weitestgehend abgebaut sind (Abb. 2.6). Die Merkmale dieser statischen

Rekristallisation sind ein polygonales Korngefüge mit geraden oder leicht gekrümmten Korngrenzen und typischerweise dreistrahligen Kornkontakten („120° triple junctions“). Subkörner und undulöse Auslöschung sind verschwunden. Die Textur ist häufig nur schwach ausgeprägt.

Abb. 2.6: Schematische Darstellung des Prozesses der Korngrenzenflächenreduktion. Unter Glättung irregulärer Korngrenzen und Kornwachstum bildet sich ein polygonales Korngefüge heraus (aus Passchier & Trouw 1996).

Im Falle einer hohen Deformationsrate überwiegen Merkmale einer dynamischen Rekristallisation. Im Zuge der Korngrenzenmigration-Rekristallisation beult sich die Korngrenze zwischen zwei benachbarten Kristallen in Richtung des Korns mit der höheren Fehlstellendichte aus („bulging“; Abb. 2.7a). Zeigen benachbarte Körner etwa die gleiche Fehlstellendichte, führt sukzessives Rotieren von Subkörnern zur Neukornbildung (Subkornrotation-Rekristallisation; Abb. 2.7b). Es können hierbei zwei charakteristische Typen von Mikrogefügen unterschieden werden: teilweise oder komplett dynamisch rekristallisierte Gefüge. Teilweise rekristallisierte Gefüge zeichnen sich durch eine bimodale Korngrößenverteilung aus, wobei große Körner undulöse Auslöschung und Subkornbildung zeigen. Merkmale eines komplett rekristallisierten Gefüges sind Anzeichen intrakristalliner Deformation (z.B. undulöse Auslöschung, verbogene Zwillingslamellen), eine einheitliche Korngröße und eine starke Textur (Passchier & Trouw 1996).

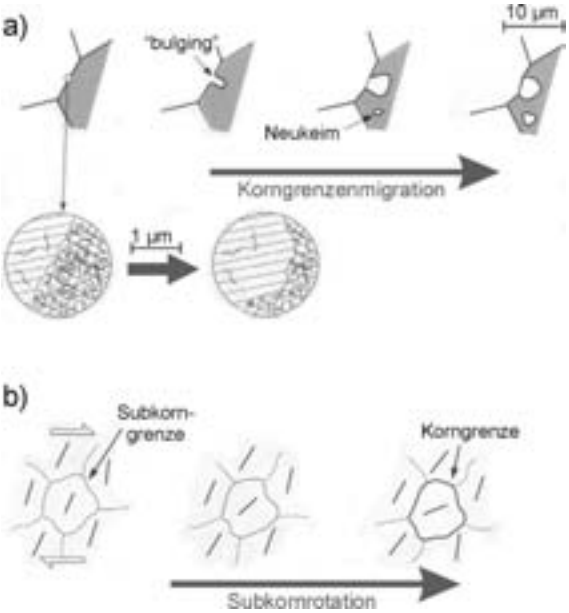


Abb. 2.7: Mechanismen dynamischer Rekristallisation (aus Passchier & Trouw 1996): a) Während der Korngrenzenmigration-Rekristallisation wandert die Korngrenze in das Korn mit der höheren Fehlstellendichte (grau) hinein oder es kommt zu spontaner Neukeimbildung. b) Bei der Subkornrotation-Rekristallisation führt die Wanderung von Fehlstellen im Kristallgitter Richtung Subkorngrenze zu einem größeren Winkel zwischen Subkorn und Nachbarkörner und schließlich zur Entstehung eines Neukorns.

2.2 Einflussparameter auf die Schädigung von Marmor

Die Prozesse, die allgemein zur Verwitterung von Marmor führen können, sind physikalischer, chemischer oder biologischer Natur (Grimm 1999). Viele Verwitterungsformen wie Lösungserscheinungen oder Krustenbildungen treten aber nur oberflächlich auf. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit einer penetrativen Form der Marmorverwitterung, die mit der Verformung des Marmors und damit verbunden einer Gefügeauflockerung einher geht. Beispiele der Verformung von Marmorobjekten sind bereits aus der frühen Literatur bekannt und vornehmlich an Grabsteinen beobachtet worden (Kieslinger 1934). In den letzten Jahrzehnten sind zahlreiche Arbeiten verfasst worden, die sich mit der konvexen oder konkaven Wölbung bzw. Krümmung von Fassadenplatten aus Marmor befassen. Spektakuläre und oft zitierte Beispiele sind das Amoco Building in Chicago (Trewitt & Tuchmann 1988; Abb. 2.8a), der Grande Arche de la Défense in Paris (Bouineau & Perrier 1995; Abb. 2.8b), die Finlandia Hall in Helsinki (Royer-Carfagni 1999b; Abb. 2.8c) oder das St. Marien-Hospital in Lünen (Stocksiefen 1996; Abb. 2.8d).

Abb. 2.8: Prominente Beispiele von Gebäuden mit verbogenen Fassadenplatten: a) Das Amoco Building in Chicago (aus Logan 2004), b) der Grande Arche de la Défense in Paris, c) die Finlandia Hall in Helsinki (um 1999) und d) das St. Marien-Hospital in Lünen (Balkon).

In der Literatur werden vielfältige Einflussfaktoren als Ursache in Betracht gezogen (Abb. 2.9). Zum einen werden umweltbedingte, von außen einwirkende (extrinisische) Einflussparameter genannt wie physikalische und chemische Witterungseinflüsse durch Tag-Nacht-Temperaturwechsel (Rosenholtz & Smith 1949, Thomasen & Ewart 1984, Zezza et al. 1985; Bortz et al. 1988, Widhalm et al. 1996), Feuchtewechsel (Bucher 1956, Thomasen & Ewart 1984, Bortz et al. 1988, Winkler 1994, Schouenborg et al. 2000) oder Salz-/Frostsprengung (Bortz et al. 1988, Sage 1988, Tschegg et al. 1999), der Einfluss der Schwerkraft (Eigengewicht; Sander et al. 1929, Kieslinger 1932), Zwängungen resultierend aus der Befestigungsweise (Cavalucci et al. 1997, Grimm 1999) oder die Herstellung betreffende Ursachen wie die Plattendimension oder die Oberflächenbeschaffenheit (Erlin 1989, Cohen & Monteiro 1991, Logan et al. 1993). Neben äußeren Einflüssen sind Form und Ausmaß der Verwitterung vom Marmor selbst, also von intrinsischen Einflussparametern, abhängig, wie z.B. residualen Gebirgsspannungen nach raschem Abbau (in-situ Spannungen; Logan et al. 1993, Garzonio et al. 1995), dem Dolomitanteil (Dunakin et al. 1999, Zeisig et al. 2002), den

kristallphysikalischen Eigenschaften der Hauptkomponenten Calcit und Dolomit oder den Gefügeeigenschaften.

Abb. 2.9: Grundschema des Zusammenwirkens von Einflussparametern auf die Verwitterung von Marmorplatten.

Letztere umfassen mehrere Gefügeelemente, denen unterschiedliche Bedeutung beigemessen wird (Abb. 2.10). Der Korngrenzengeometrie wird in zahlreichen Arbeiten eine wichtige Rolle zugesprochen (Bain 1940, Zezza 1993, Barsottelli et al. 1998, Grimm 1999, Royer-Carfagni 1999b, Cantisani et al. 2000). Darüber hinaus werden die Korngröße bzw. die Korngrößenverteilung (Tschegg et al. 1999), die Textur (Tschegg et al. 1999, Widhalm et al. 1999, Siegesmund et al. 2000a, 2000b, Koch & Siegesmund 2002, 2004b), die Kornformregelung (Rüdrich et al. 2001, Rüdrich 2003, Koch & Siegesmund 2004b) sowie die Korn-zu-Korn-Orientierung (Sage 1988, Tschegg et al. 1999, Weiß et al. 2002b) als Einfluss nehmende Gefügeelemente genannt.

2.3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel der Arbeit ist es, denn Einfluss des Mikrogefüges auf die Schadensdynamik sowohl von natürlich als auch künstlich verwitterten Marmoren zu charakterisieren und vergleichend zu interpretieren (vgl. Abb. 2.11). Der Einfluss der Feuchtigkeit als wichtiger klimatischer Einflussparameter wird dabei besonders berücksichtigt.

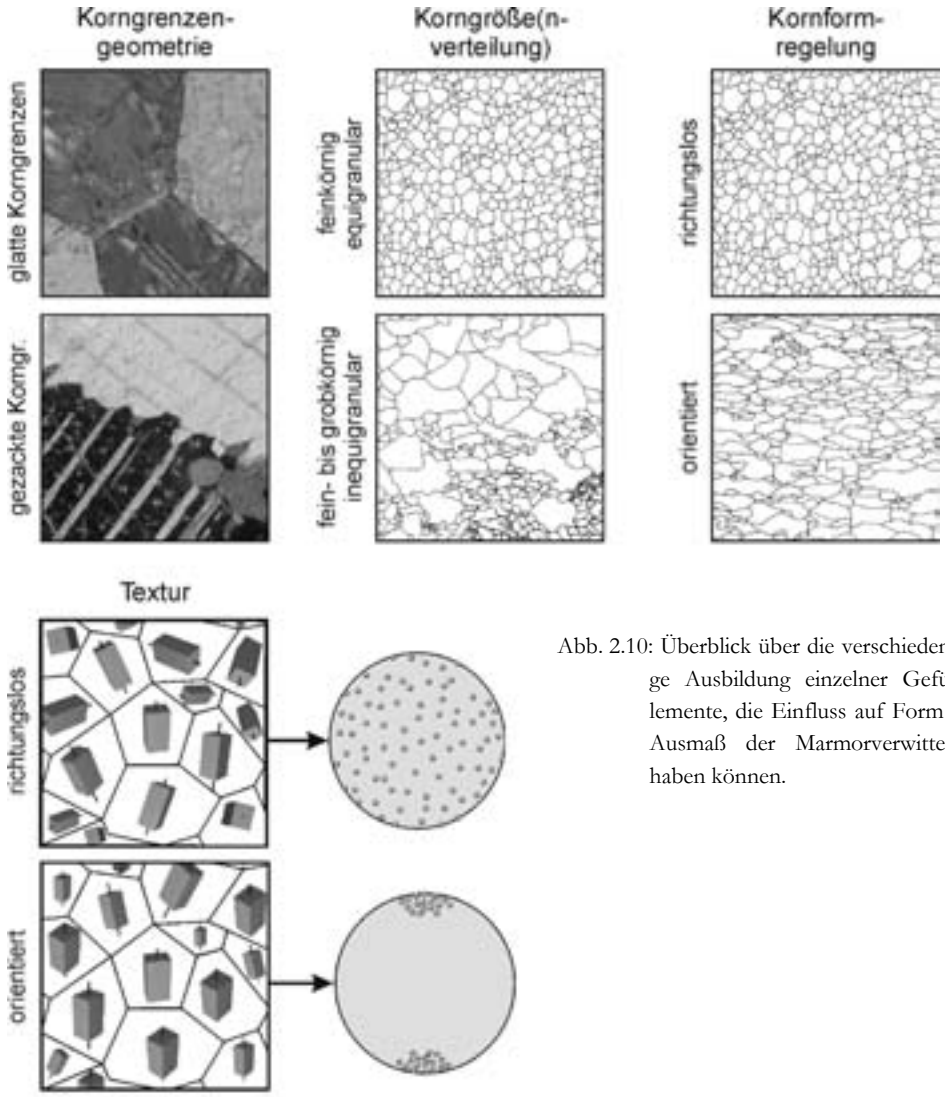


Abb. 2.10: Überblick über die verschiedenartige Ausbildung einzelner Gefügeelemente, die Einfluss auf Form und Ausmaß der Marmorverwitterung haben können.

Umfangreiche Schadenskartierungen an Marmorfassaden von Universitätsgebäuden in Göttingen (Kap. 4), die mit zwei verschiedenen Marmortypen mit sehr unterschiedlichen Materialeigenschaften verkleidet sind, erlauben erste Hypothesen zum Wirkungsgrad extrinsischer und intrinsischer Einflussparameter insbesondere auf die Verformung und Entfestigung von Fassadenplatten aus Marmor. Die vorliegende Arbeit fokussiert auf den Einfluss intrinsischer Eigenschaften – vor allem des Mikrogefüges - auf das Schädigungspotenzial von Marmor. Gleichzeitig wird auf die Rolle der Feuchtigkeit als extrinsischer Schlüsselfaktor beim Verwitterungsprozess eingegangen. Als Basis für die Interpretation der Gefügeabhängigkeit diente die Charakterisierung aller relevanten Gefügeeigenschaften von insgesamt 13 bruchfrischen Marmoren (Kap. 5.2). Richtungsabhängige Gefügeelemente wurden dabei an vier Marmortypen

eingehender untersucht, u.a. an den beiden bruchfrischen Referenzproben zu den Gebäudekartierungen.

Unter künstlicher Verwitterung bruchfrischer Proben im Labor wurde die Gefügeabhängigkeit der thermischen und thermo-hygrischen Verwitterung aufgezeigt (Kap. 6) und die Änderung verwitterungssensibler petrophysikalischer Parameter beschrieben (Kap. 7). Weiterführende Untersuchungen an natürlich verwitterten Marmorplatten von den kartierten Gebäudefassaden (Kap. 8) ermöglichten die Überprüfung der Laborergebnisse aus den bruchfrischen Marmoren und die Überführung auf das in-situ Verhalten am Gebäude (Kap. 9).

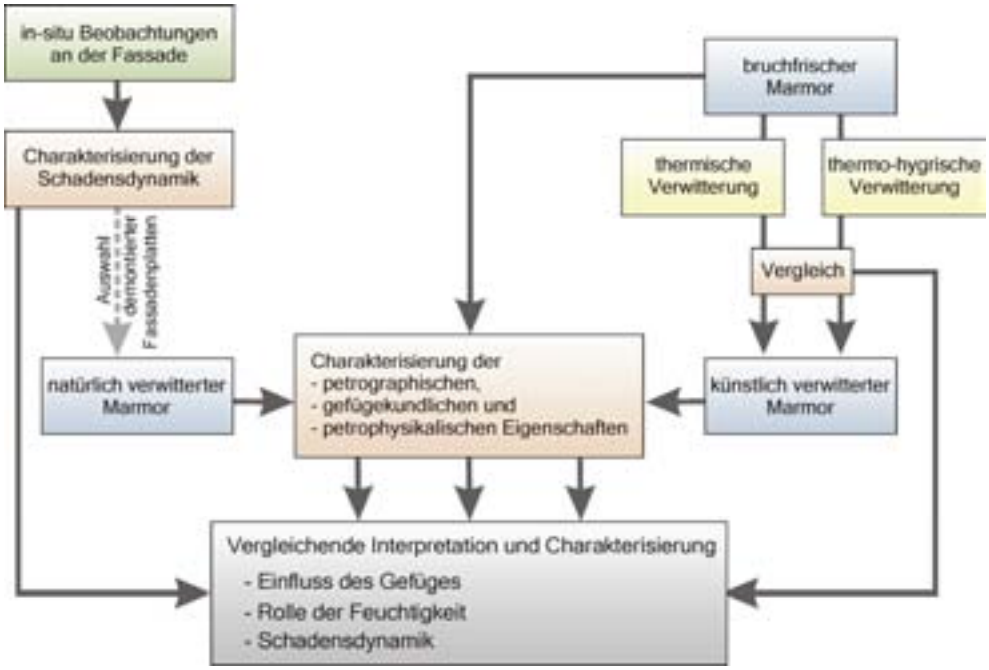


Abb. 2.11: Grundstruktur der vorliegenden Arbeit.

3 Methodik

3.1 Probenorientierung und Referenz-Koordinatensystem (RKS)

Wenn die Orientierung anisotroper Gefügeelemente eines Marmors mit richtungsabhängigen petrophysikalischen Eigenschaften korreliert werden soll, ist die Einführung eines Referenz-Koordinatensystems (RKS) unerlässlich. Es gewährleistet die Gleichheit der Orientierung und ermöglicht die Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen vektoriellen Gesteinseigenschaften. Das RKS wurde vor Beginn der Präparationsarbeiten am Probenblock verbindlich festgelegt und für alle Dünnschliffe und Probekörper beibehalten. Dabei wurde ein kartesisches Koordinatensystem (X, Y, Z) angewendet, das sich an die makroskopisch sichtbaren Gefügeelemente Foliation (=XY-Ebene) und Lineation (=X-Richtung) orientiert (Abb. 3.1a). War dies nicht möglich, wurden die Richtungen nach praktischen Gesichtspunkten festgelegt, in der Regel nach der vorgegebenen Probeblockgeometrie.

Polfiguren und Isolinienplots zeigen eine einheitliche Orientierung in Bezug auf das RKS und sind als flächentreue Projektionen (Schmidt'sches Netz) der unteren Halbkugel dargestellt (Abb. 3.1b).

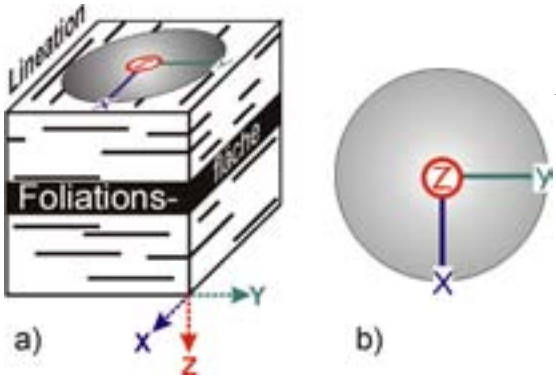


Abb. 3.1: a) Referenz-Koordinatensystem in Bezug auf die makroskopisch sichtbaren Gefügeelemente Foliation und Lineation. b) Orientierung des Referenz-Koordinatensystems in Polfiguren und Isolinienplots (untere Halbkugel).

3.2 Petrographische und gefügekundliche Analysen

3.2.1 Mikroskopische und bildanalytische Analysen

Für die Erfassung des Mineralbestandes und die Charakterisierung des Korngefüges wurde die konventionelle Polarisationsmikroskopie an Dünnschliffen von 30 µm Dicke durchgeführt. Die Methode eignet sich auch, um verwitterungsbedingte Änderungen wie z.B. offene Korngrenzen zu erfassen. Für richtungsabhängige Untersuchungen wurden jeweils drei Dünnschliffe parallel zur XY-, XZ- und YZ-Ebene angefertigt.

Zur Quantifizierung der statistischen Verteilung der Orientierung von Korngrenzen, welche als Diskontinuitäten Einfluss auf das Materialverhalten haben, wurden Dünnschliffe in den drei orthogonalen Schnittlagen bildanalytisch ausgewertet. Dazu wurde eine halbautomatische Bildanalyse durchgeführt (vgl. Poschlod 1990), bei der die einzelnen Calcitkörner eines Dünnschliffs nachgezeichnet und digitalisiert wurden. Mit Hilfe des Softwareprogramms DIANA (Duyster 1991) wurde die Korngrenzenorientierung dargestellt.

Weiterhin liefert das Programm die Fläche jedes Einzelkorns im Dünnschliff, woraus der kreisäquivalente Korndurchmesser berechnet und die Korngrößenverteilung abgeleitet wurden. Der mittlere Korndurchmesser ließ sich analog zur „gewogenen" mittleren Korngröße im Sinne von Füchtbauer (1988) errechnen. Da das Gewicht der Einzelkörner nicht bekannt war, konnten unter Annahme der gleichen Korndichte (δ_{Calcit}= 2,71 g/cm³) die logarithmierten Durchmesser der Einzelkörner alternativ nach ihrem kugeläquivalenten Kornvolumen gewichtet werden.

3.2.2 Neutronentexturanalyse

Die Erfassung der kristallographischen Vorzugsorientierung (Textur) erfolgte mittels Neutronendiffraktometrie. Die Messungen wurden am time-of-flight (TOF) Texturdiffraktometer am „pulsed reactor" IBR-2 des Frank Laboratory for Neutron Physics am Joint Institute of Nuclear Research in Dubna (Russland) durchgeführt (Ullemeyer et al. 1998). Die Methode hat den Vorteil, aufgrund der großen Eindringtiefe der Neutronen ein relativ großes Probenvolumen zu erfassen, was die Messung von grobkristallinen Materialien ermöglicht und Aussagen zur Gesamtgesteins-Anisotropie erlaubt. Somit lässt sich der Einfluss auf petrophysikalische Eigenschaften wie z.B. die Anisotropie von Ultraschallgeschwindigkeiten oder der thermischen Dehnung aus der Textur ableiten. Die Dimension der zylindrischen Proben betrug Ø30 mm x 30 mm oder Ø40 mm x 40 mm. Mit Hilfe des TOF-Verfahrens wurde die dreidimensionale „orientation distribution function" (ODF; Dahms & Bunge 1989) berechnet, welche die vollständige statistische Beschreibung der Textur beinhaltet und die Ableitung von Polfiguren zu jeder beliebigen Kristallfläche erlaubt. Die Polfiguren sind als Isolinienplots dargestellt, die die dreidimensionale Häufigkeitsverteilung der Kristallflächenpole wiedergeben. Darüber hinaus lässt sich aus der ODF die Anisotropie petrophysikalischer Eigenschaften modellieren (Siegesmund 1996).

Die Form des Polfigurentensors kann durch den Formfaktor T beschrieben werden, welcher aus den Eigenwerten der drei Hauptrichtungen des Tensors e_{min}, e_{int} und e_{max} (kleinster, mittlerer und größter Eigenwert) berechnet wird (Jelinek 1981):

Formel 3.1: $$T = \left(\ln\frac{e_{int}}{e_{min}} - \ln\frac{e_{max}}{e_{int}} \right) \Big/ \left(\ln\frac{e_{int}}{e_{min}} + \ln\frac{e_{max}}{e_{int}} \right)$$ T [-]: Formfaktor

Der Formfaktor ist dimensionslos und liegt zwischen –1 und 1, wobei –1 einem punktförmigen c-Achsenmaximum entspricht (perfekt linear) und 1 eine gürtelartige c-Achsenverteilung beschreibt (perfekt planar).

Ausgewertet wurden die Basisfläche (006) (deren Flächennormale der kristallographischen c-Achse entspricht), die a-Achse <110>, die Zwillingsfläche {018} (nicht bei Dolomit), die Spaltrhomboederfläche {104} und die Versetzungsgleitfläche {012}.

3.3 Petrophysikalische Analysen

Die Ermittlung von petrophysikalischen Eigenschaften erfolgte zum einen an bruchfrischen Marmoren vor und nach künstlicher Verwitterung im Labor, und zum anderen an Fassadenplatten von Gebäuden, die über einen längeren Zeitraum den natürlichen Witterungseinflüssen ausgesetzt waren.

3.3.1 Ultraschallanalytik

3.3.1.1 Ultraschallmessungen an Kugelproben

Die Messung von Ultraschallgeschwindigkeiten an Kugelproben diente in erster Linie zur Bestimmung der Mikrorissdichte und der Vorzugsorientierung von Mikrorissen im Gestein. Dazu wurde die vollständige räumliche Verteilung der Kompressionswellengeschwindigkeiten (V_P) sowohl im wassergesättigten als auch im trockenen Zustand erfasst. Die Messungen wurden nach der Durchschallungsmethode (z.B. Birch 1960) an Kugelproben mit einem Durchmesser von 50±0,02 mm im Tauchbad durchgeführt (Abb. 3.2). Dazu wurde die Laufzeit der Kompressionswellen in insgesamt 193 unabhängigen Richtungen mittels piezokeramischen Tauchschwingern (1 MHz) erfasst, was durch die Rotation der Kugel in 15°-Schritten um eine vertikale Achse und durch Neigung des Schwingerpaars aus einer horizontalen Ebene in 10°-Schritten bis zu einem Neigungswinkel von 70° ermöglicht wurde. Für die Messungen im trockenen Zustand wurden die Kugelproben mindestens 72 Stunden bei 30 °C getrocknet und anschließend mit einem Kunststofffilm gegen das Eindringen von Wasser abgedichtet. Weitere Details zur Bestimmung der V_P-Verteilung an Kugelproben geben Jahns (1995) und Weiß (1998).

3.3.1.2 Ultraschallmessungen an Fassadenplatten

Die Messung von V_P an demontierten Fassadenplatten erfolgte mit dem Ziel, den Erhaltungszustand des Marmors zu charakterisieren sowie den Einfluss einzelner Gefügeelemente auf V_P aufzuzeigen (Köhler 1991, Weiß et al. 2001). Dazu wurden aus der Mitte der oberen Plattenhälfte jeweils drei Probekörper (100 x 100 x 30 mm) präpariert und V_P mit Hilfe des Impuls-Laufzeit-Verfahrens mit Kompressionswellenschwingern (Sender- und Empfängerpaar; 0,5 MHz) senkrecht zur Plattenoberfläche an jeweils drei Stellen erfasst, so dass sich der V_P-Wert einer Fassadenplatte aus dem arithmetischen Mittel von insgesamt neun Messungen zusammensetzt. Die Ultraschall-

Laufzeiten wurde mit einem Messgerät von KRAUTKRAMER BRANSON ® Typ USD10 bestimmt. Die Messung von V_P im trockenen Zustand ($V_{Ptrocken}$) erfolgte an Proben, die mindestens 72 Stunden bei 30 °C getrocket waren. Für die Messung von V_P im wassergesättigten Zustand (V_{Pnass}) wurden die Proben mit demineralisiertem Wasser unter Vakuum geflutet, um die vollständige Füllung des offenen Porenraums zu gewährleisten.

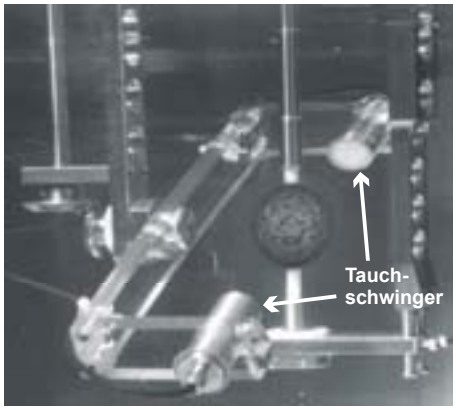


Abb. 3.2: Messaufbau der Kugelmesseinrichtung. Die Drehung der Kugel um ihre vertikale Achse und die Neigung der Tauchschwinger ermöglicht die Erfassung der räumlichen Verteilung von V_P.

3.3.2 Thermische und hygrische Eigenschaften

3.3.2.1 Thermische Dilatation

Das thermische Dehnungsverhalten der untersuchten Marmore wurde an einem 6-Stangen-Dilatometer (Strohmeyer 2003) an zylindrischen Proben (Ø15 mm x 50 mm) parallel zu den Hauptkoordinaten des RKS (X, Y, Z) durchgeführt. Der Messaufbau ermöglicht die simultane Messung von bis zu sechs Zylindern, um den systematischen Messfehler, der durch geringfügig unterschiedliche Messbedingungen bei mehreren Durchgängen entstehen könnte, zu minimieren. Die inkrementalen Messtaster erlauben die Erfassung von Längenänderungen von ±1 µm, was bei der gegebenen Probenlänge von 50 mm eine Auflösung von ±0,02 mm/m bedeutet. Als Referenzmaterial für die Kalibrierung wurde Quarzglas gewählt, welches aufgrund seines niedrigen isotropen Ausdehnungskoeffizienten von $\alpha = 0{,}5 \times 10^{-6}\ K^{-1}$ besonders geeignet ist. Die Temperatur erfasste ein Pt-100 Temperaturfühler, dessen Sensor im Inneren eines „Dummy"-Zylinders angebracht war, welcher aus dem gleichen Material wie die zu messenden Proben bestand.

Um das Schädigungspotenzial bei unterschiedlichen Temperaturen zu erfassen, wurden die Proben drei Heizzyklen mit zwei unterschiedlichen Maximaltemperaturen von 60 °C und 90 °C ausgesetzt (Abb. 3.3a). Eine Heizrate von 0,5 °C/min gewährleistete zum einen die thermische Äquilibrierung in der Probe, zum anderen die Simulation realistischer Bedingungen am Gebäude. Klimamessungen an Marmorfassaden in

Göttingen ergaben eine maximale Temperaturerhöhung von 0,3 °C/min, gemessen am frühen Morgen eines Sommertages an einer Ostfassade.

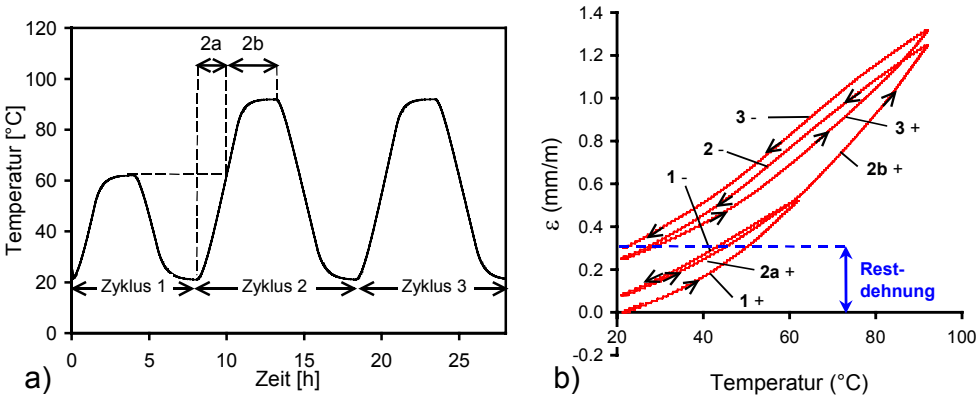


Abb. 3.3: a) Temperaturverlauf während der Dilatationsmessung beim Durchlaufen der drei Heizzyklen. Die Heiz- und Abkühlrate beträgt 0,5 °C/min. Die Maximaltemperatur in Zyklus 1 ist 60 °C, in Zyklus 2 und 3 jeweils 90 °C. b) Beispiel einer Dehnungskurve beim Durchlaufen der drei Heizzyklen. +: Heizphase; -: Abkühlphase.

Als gängiger Parameter zur Beschreibung des thermischen Verhaltens wurde der Ausdehnungskoeffizient α jeweils aus der Steigung eines Teilbereichs der Dehnungskurve (Abb. 3.3b) nach folgender Formel ermittelt:

Formel 3.2: $$\alpha = \frac{\Delta l}{l \cdot \Delta T}$$

α	[10^{-6} K^{-1}]:	Ausdehnungskoeffizient
Δl	[µm]:	Längenänderung
l	[m]:	Initiale Probenlänge
ΔT	[K]:	Temperaturänderung

Zur Veranschaulichung wird im Diagramm die relative Längenänderung (Dilatation) ε (Formel 3.3) als Funktion der Temperatur dargestellt:

Formel 3.3: $$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

ε [mm/m]: Relative Längenänderung bezogen auf 1 m

Die irreversible Restdehnung nach Wiederabkühlung der Probe auf die Ausgangstemperatur von 20 °C (ε_{RD}) dient als Indikator für die thermische Schädigung und wurde gemäß Formel 3.4 berechnet mit

Formel 3.4: $$\varepsilon_{RD} = \frac{\Delta l_{(20°C)}}{l}$$

ε_{RD}	[mm/m]:	Restdehnung
$\Delta l_{(20°C)}$	[mm]:	Irreversible Längenänderung nach Wiederabkühlung auf 20 °C

Die thermische Dilatation kann quantifiziert werden durch einen Tensor zweiter Ordnung. Um die Orientierung eines solchen Tensors zu beschreiben, sind Messun-

gen in mindestens sechs unabhängigen Richtungen erforderlich (Siegesmund et al. 2000a). Aus diesem Grund wurden an den Proben, die eingehend auf Richtungsabhängigkeiten untersucht wurden (vgl. Tab. 5.1), neben den drei orthogonalen Hauptrichtungen jeweils drei weitere Orientierungen gemessen, die in 45°-Winkel zu den Hauptkoordinaten orientiert waren (Abb. 3.4).

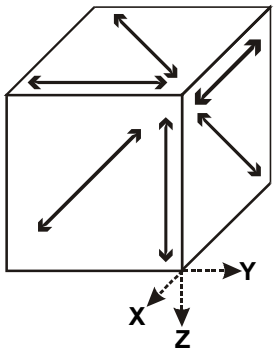


Abb. 3.4: Orientierung der Längsachsen der zylindrischen Probekörper in sechs unabhängige Richtungen in Relation zum Referenz-Koordinatensystem.

Um das thermische Dehnungsverhalten von Marmor an der Außenfassade unter in-situ Bedingungen zu untersuchen, wurden Tests unter Nassbedingungen durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde die Probenkammer des Dilatometers mit der Probenhalterung um 25° gekippt und mit demineralisiertem Waser aufgefüllt, so dass die Hälfte der Probezylinder zu Beginn eines Heizzyklus mit Wasser bedeckt war (Abb. 3.5). Nach Erreichen der Bestimmungstemperatur von 90 °C wurde die Temperatur acht Stunden lang gehalten, bis das Wasser in der Probenkammer vollständig verdunstet war. Die Probenkammer mit den trockenen, auf 20 °C abgekühlten Proben wurde jeweils eine Stunde vor Beginn jeder Heizphase wieder mit Wasser gefüllt. Es wurde die progressive Restdehnung als Funktion der Temperaturzyklen (mindestens 10) unter Nassbedingungen bestimmt.

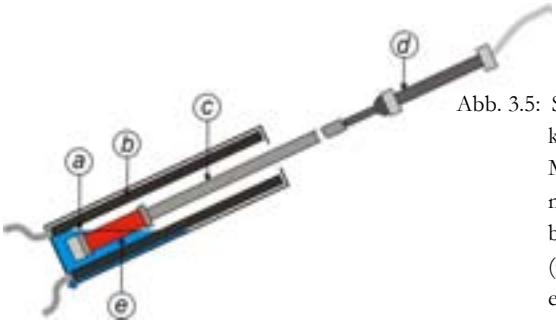


Abb. 3.5: Schematischer Querschnitt durch die Klimakammer des 6-Stangen-Dilatometers beim Messen unter Nassbedingungen, modifiziert nach Strohmeyer 2003. a Wasserpegel. b Kupfer-Wärmetauschplatten. c Schubstange (Quarzglas). d Inkrementaler Messtaster. e Probezylinder.

3.3.2.2 Quantifizierungen von Plattenverbiegungen

Die Durchbiegung von Marmorplatten dient als Kennwert, der zerstörungsfrei ermittelt werden kann und Aufschluss über den Verwitterungszustand eines Fassadenmarmors geben soll (Nordtest Method NT BUILD 500). Zur Quantifizierung der Durch-

biegung wird allgemein der Abstand zwischen der Plattenoberfläche und einer gedachten ebenen Referenzfläche „parallel“ zur verbogenen Platte, die beispielsweise die Plattenecken oder die Befestigungspunkte schneidet, erfasst (vgl. Erlin 1989, Karhapää et al. 1994, Garzonio et al. 1995, Cavallucci et al. 1997, Grimm 1999). Eine Möglichkeit ist, die Abweichung von der hypothetischen Bezugsebene über die horizontale, vertikale oder diagonale Mittellinie über dem Zentrum der Plattenoberfläche zu messen (Nordtest Method NT BUILD 500, Koch & Siegesmund 2002). Der so erhaltene Abstand des Plattenzentrums von der gedachten Ebene wird auf die Länge dieser Mittellinie (= Messabstand) bezogen.

Um die Krümmung von verschieden großen Platten, die mittels unterschiedlicher Messabstände erfasst wurden, miteinander vergleichen zu können, muss die Durchbiegung auf einen einheitlichen Messabstand bezogen werden (z.B. 1 m). Der Grad der Verbiegung kann dann in mm Durchbiegung pro m Messabstand, also in mm/m, ausgedrückt werden. Wenn der Messabstand nicht der Einheitslänge entspricht, ist der Biegewert zu transformieren. Eine vereinfachende Berechnung mittels Dreisatz unter Verwendung des Ausdrucks

Formel 3.5: $B = H / L \cdot L_N$

L	[m]:	Messabstand
L_N	[m]:	normierter Messabstand (= 1 m)
H	[mm]:	gemessene Durchbiegung
B	[mm/m]:	normierte Durchbiegung

(Nordtest Method NT BUILD 499, 500) ist nicht angebracht. Das daraus resultierende geometrische Modell würde einer geknickten Platte entsprechen (Abb. 3.6a). Untersuchungen zur Verformungsgeometrie von Marmorplatten lassen eher eine kugelförmige Schüsselung (Cavallucci et al. 1997, Koch & Siegesmund 2002, Schouenborg et al. 2003) oder eine zylindrische Wölbung erkennen (Grimm 1999). Nachfolgend wird daher ein neuer Berechnungsansatz etabliert (Koch & Siegesmund 2004a).

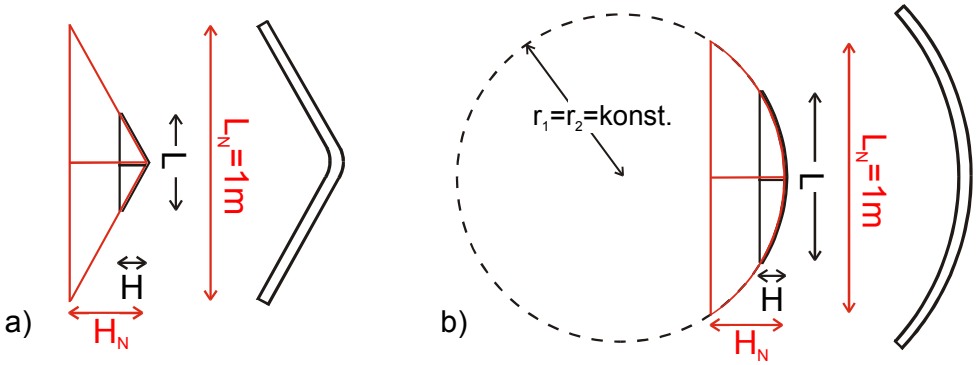


Abb. 3.6: Beziehung zwischen gemessenen (schwarz) und normierten (rot) Parametern in Abhängigkeit vom geometrischen Modell (siehe Text): a) Schema einer geknickten Platte; b) Schema einer kreisrund gewölbten Platte (aus Koch & Siegesmund 2004a).

Nach Grimm (1999) kann ein Längsschnitt durch eine gekrümmte Platte als ein Kreissegment betrachtet werden (Abb. 3.6b), bei dem der Kreis- bzw. Biegeradius r mit der Sehnenlänge L und der Bogenhöhe H verknüpft ist:

Formel 3.6: $$r = \frac{4H^2 + L^2}{8H}$$

Durch Umformung nach der Bogenhöhe H, welche der gemessenen Durchbiegung entspricht, ergibt sich folgende Beziehung:

Formel 3.7: $$H = r - \sqrt{r^2 - \frac{L^2}{4}}$$

Wird nun die Durchbiegung H einer Platte über einen Messabstand L gemessen und soll bei gegebenem Biegeradius r_1 auf eine normierte Länge L_N (= 1 m) bei gleichbleibendem Biegeradius ($r_1 = r_2$) normiert werden (Abb. 3.6b), so resultiert daraus für die normierte Durchbiegung H_N

Formel 3.8: $$H_N = \frac{4H^2 + L^2}{8H} - \sqrt{\left(\frac{4H^2 + L^2}{8H}\right)^2 - \frac{L_N^2}{4}}$$

H_N [mm]: normierte Durchbiegung

Falls für die Bogenhöhe bzw. die gemessene Durchbiegung H negative Werte benutzt werden, um beispielsweise zwischen konkaven und konvexen Wölbungen zu unterscheiden (Nordtest Method NT BUILD 500), dann ist der Subtrahend in Formel 3.8 als Summand zu behandeln, d.h. das Minus vor dem Wurzelausdruck wird zum Plus.

Anstelle von Formel 3.8 kann die vereinfachte Formel 3.9 verwendet werden, die bei Durchbiegungsintensitäten, wie sie üblicherweise bei Fassadenplatten auftreten können, eine sehr gute Annäherung ergibt (Abb. 3.7):

Formel 3.9: $$H_N \approx H \cdot \left(\frac{L_N}{L}\right)^2$$

Schließlich ist die Durchbiegung B, welche numerisch mit H_N identisch ist, gegeben durch den Ausdruck

Formel 3.10: $B = H_N / L_N$

B [mm/m]: normierte Durchbiegung, bezogen auf L_N = 1 m

Im Falle von gleichmäßig gekrümmten Wölbungen macht es unter Verwendung von Formel 3.9 bzw. 3.10 keinen Unterschied mehr, ob die Durchbiegung über die horizontale, vertikale oder diagonale Mittellinie der Plattenoberfläche gemessen wird. Der entscheidende Vorteil ist darüber hinaus, dass die Gleichung den Vergleich von Plattenkrümmungen unterschiedlich dimensionierter Fassadenplatten ermöglicht.

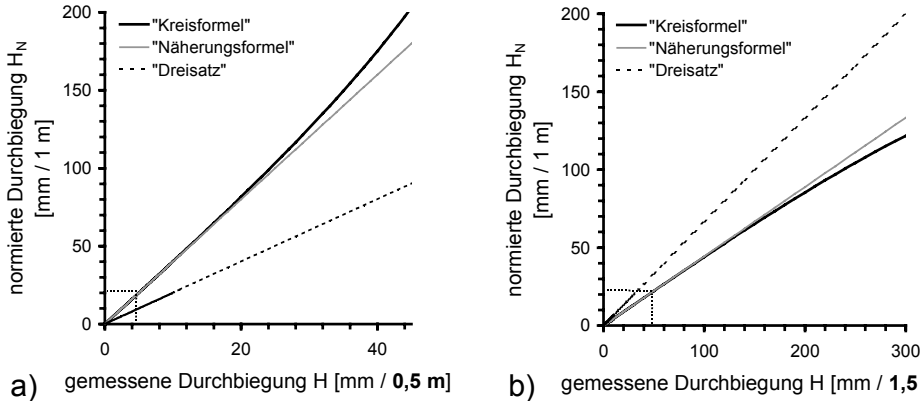


Abb. 3.7: Vergleich zwischen gemessener und normierter Durchbiegung in Abhängigkeit der Berechnungsweise, a) wenn der Messabstand kleiner als 1 m ist (hier: 0,5 m), und b) wenn der Messabstand größer als 1 m ist (hier: 1,5 m). Es zeigt sich, dass die Plattenkrümmung bei der Berechnung unter Verwendung des Dreisatzes (gestrichelte Graphen) bei kleinen Plattenformaten unterschätzt (links) und bei großen Plattenformaten überschätzt wird (rechts). Die Ergebnisse unter Verwendung der Näherungsformel (Formel 3.9) sind im Bereich von Durchbiegungen, wie sie üblicherweise bei Fassadenplatten auftreten können, gleichsam identisch mit den Ergebnissen aus Formel 3.8 (durchgezogene Graphen). Links unten ist jeweils die maximale Plattenkrümmung markiert (H_N=21,2 mm/m), die im Rahmen der vorliegenden Arbeit gemessen wurde.

3.3.2.3 Verbiegungsmessung an Fassadenplatten

Die Verbiegung von Fassadenplatten am Gebäude wurde mit Hilfe einer Aluminium-Messschiene (Biegemeter) ermittelt (Abb. 3.8), welche eine modifizierte Version des „Bow-meter“ darstellt, wie sie in der Nordtest Method NT BUILD 500 beschrieben wird. Die Durchbiegung wurde dabei über den Abstand von zwei Fußgestellen hinweg (= Messabstand) in der Plattenmitte als Abweichung von einer ebenen Fläche (= gemessene Durchbiegung) erfasst. Die Messung erfolgte über die vertikale oder horizontale Mittellinie der Plattenoberfläche, wobei der Abstand der Fußgestelle zu den Plattenkanten etwa 4 cm betrug.

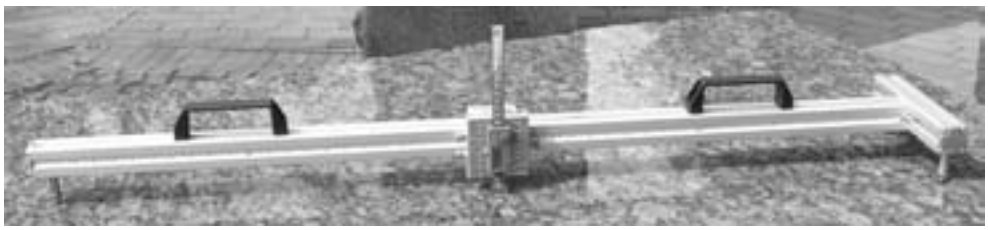


Abb. 3.8: Aluminium-Messschiene (Biegemeter) zur Erfassung der Durchbiegung von Fassadenplatten. Die beiden Fußpunkte am rechten Fußgestell gewährleisten einen festen Stand. Sowohl der linke Fußpunkt als auch die Messeinheit in der Mitte sind verstellbar.

Die Kalibrierung des Biegemeters wurde an ebenen Referenzflächen wie z.B. Fensterglas durchgeführt. Die Überprüfung der Reproduzierbarkeit (R) der Messwerte erfolgte an 12 Platten mit einer Durchbiegung von ≤ 5 mm auf 1,2 m Messabstand über die vertikale Mittellinie hinweg durch vier verschiedene Personen mit Neukalibrierung vor jeder der vier Testreihen und ergab in Übereinstimmung mit der Nordtest Method NT BUILD 500 einen Wert von R ≤ 0,2 mm.

3.3.2.4 Biegetest

Mittels künstlicher Verwitterung wurden im Biegetest in Anlehnung an die Nordtest Method NT BUILD 499 die klimatischen Bedingungen am Bauwerk in extremer Form im Labor simuliert, um so das Verbiegepotenzial sowohl von unterschiedlichen Marmoren als auch in unterschiedlichen Schnittrichtungen zu ermitteln. Dafür wurden längliche Marmorplatten (400 x 100 x 30 mm) mit der üblichen Dicke von Fassadenplatten auf einen etwa 5 mm hohen Wasserfilm platziert und von oben mit einer Heizmatte aus ca. 3 cm Entfernung zyklisch bestrahlt (Abb. 3.9a). Ein Zyklus umfasst eine Heizphase von 6 Stunden, in der die Temperatur auf der Plattenoberfläche von Raumtemperatur (21-24 °C) auf 80 °C ansteigt, und eine Abkühlphase von etwa 18 Stunden, so dass ein Temperaturzyklus pro Tag gefahren werden kann. Die Verbiegung der Probekörper wurde mittels einer Messbrücke (Abb. 3.9b) mit einer Ablesegenauigkeit von ±1µm / 35 cm erfasst. Für die Nullstellung der Messuhr wurde ein Referenzzylinder aus Quarzglas mit planparallelen Stirnflächen verwendet. Die Berechnung der normierten Durchbiegewerte folgte dem Prinzip in Formel 3.10 (Kap. 3.3.2.2). Bei der Darstellung der Werte im Diagramm (Durchbiegung versus Anzahl der Temperaturzyklen) wurden konvexe Durchbiegungen der Probekörper (Plattenmitte wölbt sich nach oben) mit positiven Werten, konkave Durchbiegungen mit negativen Werten belegt.

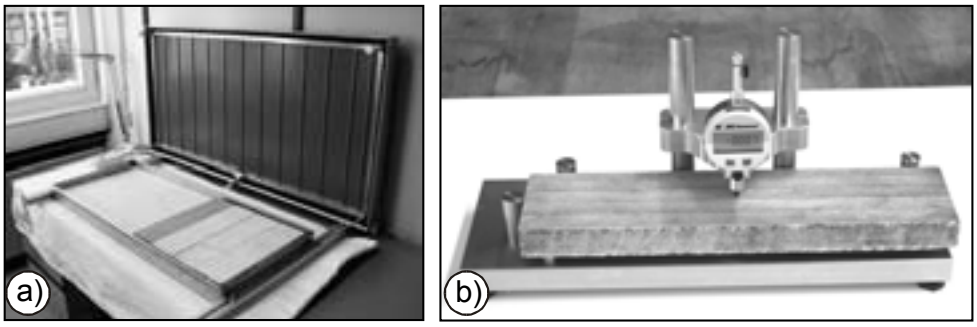


Abb. 3.9: a) In der Biegetest-Apparatur werden die Marmor-Probekörper (in der Wanne rechts) auf eine Filtermatte gelegt, die wiederum auf einem ebenen Edelstahlrost aufliegt. Der Wasserpegel bedeckt die Filtermatte, so dass die Unterseite der Probekörper im Wasser liegt. Der Deckel mit der Heizmatte (rechts oben) wird während der Heizphase heruntergeklappt. b) Messbrücke zur Verbiegungsmessung der Probekörper. Drei abgerundete Auflagepunkte unter der Platte und drei Führungszylinder gewährleisten, dass die Verbiegung immer an der gleichen Stelle in der Mitte des Probekörpers präzise gemessen werden kann (nach Nordtest Method NT BUILD 499).

3.3.3 Mechanische Eigenschaften

Als wichtigste mechanische Kenngrößen wurden die Biegefestigkeit (oder auch Biegezugfestigkeit) und die Ausbruchlast am Ankerdornloch (oder Ankerausbruchfestigkeit) bestimmt, die nach DIN 18516 bei der Eignungsprüfung eines Natursteins für seine Verwendung als hinterlüftete Fassadenbekleidung obligatorisch sind.

3.3.3.1 Biegefestigkeit

Die Biegefestigkeit unter Mittellinienlast (R_{tf}) wurde nach EN 12372 an quaderförmigen Proben der Größe 180 x 50 x 30 mm durchgeführt. Probekörper aus 40 mm dicken Fassadenplatten des SUB-Gebäudes (vgl. Kap. 8.2) hatten die Größe 240 x 50 x 40 mm. Die Proben wurden mindestens 72 Stunden bei 30 °C getrocknet. Die Biegefestigkeit errechnet sich aus der Probengröße, dem Auflagerabstand und der Bruchlast wie folgt:

Formel 3.11: $$R_{tf} = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

R_{tf}	[MPa]:	Biegefestigkeit
F_{max}	[N]:	Bruchlast
l	[mm]:	Abstand der Biegeauflager
b	[mm]:	Probenbreite
h	[mm]:	Probenhöhe

Die Biegefestigkeit kann richtungsabhängig ermittelt werden. Die angegebene Richtung ist hierbei die Raumlage der Vektoren der beim Versuch auftretenden Zugkräfte, welche senkrecht zur Bruchfläche wirken.

3.3.3.2 Ausbruchlast am Ankerdornloch

Die Ausbruchlast am Ankerdornloch wurde in Anlehnung an prEN 13364 an quadratischen Probekörpern der Größe 200 x 200 x 30 mm bestimmt. Probekörper aus Fassadenplatten hatten entsprechend die Dicke dieser Platten (30 oder 40 mm). Wurde die verwitterungsbedingte Änderung der Ausbruchlast im Biegetest ermittelt (s. Kap. 3.3.2.4), wurden die Probekörper aus Biegetest-Quadern herauspräpariert und hatten die Größe 200 x 100 x 30 mm bzw. 160 x 100 x 40 mm bei Proben aus Fassadenplatten des SUB-Gebäudes (vgl. Kap. 8.2.5.2). Da die prEN 13364 eine Mindestkantenlänge der Prüfkörper von 200 mm vorschreibt, wurde im Vorfeld am bruchfrischen Ruivina Marmor (s. Kap. 5) getestet, ob und wie stark eine reduzierte Kantenlänge Einfluss auf den zu ermittelnden Messwert hat. Messungen an jeweils mindestens 12 Ankerdornlöchern von Probekörpern unterschiedlicher Kantenlängen (200 mm, 150 mm, 100 mm) ergaben keine nennenswerten Unterschiede.

Die Ausbruchlast am Ankerdornloch gibt die Kraft an, bei der ein Ankerdorn bei senkrechter Belastung aus dem Ankerdornloch bricht und kann direkt ermittelt werden. Gegenüber der Norm wurde eine niedrigere Prüfgeschwindigkeit von 10 N/s gefahren, weil sonst die Versuchsdauer wegen der im Vergleich zu anderen Natursteinen relativ geringen Ausbruchlast von Marmor zu kurz gewesen wäre. Die wirkenden Kräfte am Ankerdorn sind komplex und können keiner bestimmten Raumrichtung

zugeordnet werden. Jedoch werden in der prEN 13364 in Abhängigkeit der Orientierung der Schichtung oder Anisotropie verschiedene „Typen“ unterschieden (Abb. 3.10).

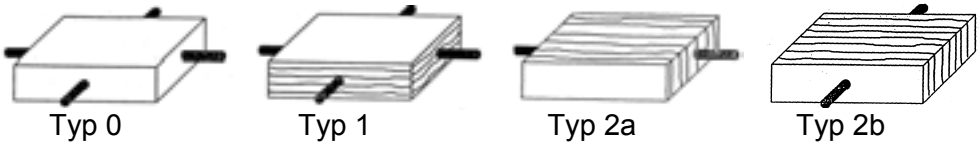


Abb. 3.10: Orientierungstypen der Ankerdorne, bezogen auf die Raumlage eines planaren Gefüges im Prüfkörper (aus prEN 13364).

3.3.4 Porositätskennwerte

3.3.4.1 Porosität mittels Auftriebswägung

Die Porosität hat direkt oder indirekt Einfluss auf die meisten physikalischen Gesteinseigenschaften und gilt deshalb als eine der wichtigsten Kenngrößen von Naturwerksteinen (z.B. Poschlod 1990). Als Porosität wird das Verhältnis aller in einem Gestein vorhandenen Hohlräume zum Gesteinsvolumen bezeichnet. In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff auf die effektive Porosität (= Nutzporosität) bezogen.

Die Bestimmung der Porosität erfolgte mittels Auftriebswägung nach dem Archimedes-Prinzip. Dabei wurden an Probekörpern der Größe 100 x 100 x 30 mm verschiedene Gewichtszustände gemessen: Das Trockengewicht (m_t) nach mindestens 72stündiger Trocknung bei 30 °C, das Nassgewicht (m_n) unter vollständiger Wassersättigung des zugänglichen Porenraums nach Flutung mit demineralisiertem Wasser unter Vakuum und das Auftriebsgewicht (m_{au}) im wassergesättigten Zustand im Wasserbad. Die Porosität errechnet sich daraus wie folgt:

Formel 3.12: $$\Phi = \frac{m_n - m_t}{m_n - m_{au}} \cdot 100$$

Φ	[Vol.-%]:	Porosität
m_t	[g]:	Trockengewicht
m_n	[g]:	Nassgewicht
m_{au}	[g]:	Auftriebsgewicht

3.3.4.2 Porenradienverteilung und Porosität mittels Quecksilberporosimetrie

Die Porenradienverteilung gibt als verwitterungssensibler Parameter Information über den Grad der Gefügeauflockerung bei Marmoren durch progressive Rissbildung. Sie spiegelt den Anteil unterschiedlicher Porengrößen (Porenklassen) am Gesamtvolumen des Gesteins wider.

Die Bestimmung der Porenradienverteilung erfolgte mittels Quecksilber(Hg-)-porosimetrie an zylindrischen Proben der Größe Ø12,5 mm x 40 mm. Dem Messver-

fahren liegt die Washburn-Gleichung zugrunde (Formel 3.13). Jedem Kapillarradius kann demnach ein bestimmter Druck zugeordnet werden, der aufgebracht werden muss, um das Quecksilber in die Kapillare hineinzupressen. Das bei stufenweise zunehmendem Druck in den Marmor hineingepresste Quecksilbervolumen ermöglicht somit die Berechnung der Porenradienverteilung.

Formel 3.13: $r = \frac{2\sigma_{Hg}\cos\theta}{p}$

r	[µm]:	Kapillarradius
σ_{Hg}	[mN/m]:	Oberflächenspannung Quecksilber (= 480 mN/m)
θ	[°]:	Kontaktwinkel (= 141,3°)
p	[kPa]:	Druck

Hierbei wird von idealisierten zylindrischen Poren ausgegangen, so dass bei komplexeren Porengeometrien nur mehr der kreisäquivalente Porenradius gemessen wird. Zu Bedenken ist weiterhin, dass der kleinste Querschnitt in den Poren den Druck kontrolliert und nur die Eintrittsradien erfasst werden, so dass die Rissweiten im Marmor nur näherungsweise quantifiziert werden können (vgl. Poschlod 1990).

Die Messung erfolgte mit einem Gerät des Typs „Porosimeter 2000“ der Firma Carlo Erba (jetzt Porotec), welches einen Maximaldruck von 2000 bar erreicht, womit Porenradien von etwa 50 µm bis 0.0038 µm erfasst werden konnten. Wegen der niedrigen Porosität von Marmor, welche bruchfrisch oft unter 0,4 Vol.-% beträgt und damit an der Auflösungsgrenze des Analyseverfahrens liegt, wurden zur Kontrolle je Gesteinsprobe immer mindestens zwei Messungen durchgeführt. Jede Messung wurde einer Korrektur durch Subtraktion der Hg-Intrusionskurve der Blindwertmessung unterzogen.

Aus der Porenradienverteilung konnte der mittlere Porenradius berechnet werden. Dazu wurden die Radienklassen nach ihrem Anteil an der Gesamtporosität gewichtet. Im Histogramm sind die Porenradien pro Faktor 10 in fünf Intervalle unterteilt, so dass die Intervallgrenzen mit ..., 10^0, $10^{0,2}$, $10^{0,4}$, $10^{0,6}$, $10^{0,8}$, 10^1 , ... [µm] vorgegeben sind und auf der Abszisse logarithmisch dargestellt werden. Die Mitten der einzelnen Radienintervalle wurden unter Berücksichtigung des logarithmischen Maßstabs mit den dazugehörigen Porositätswerten multipliziert. Die Produkte aus allen Radienklassen wurden aufsummiert und die Summe durch die Gesamtporosität geteilt. Das Ergebnis ist der Logarithmus des mittleren Porenradius.

Die Porosität mittels Hg-Porosimetrie kann aus dem Hg-Intrusiosvolumen und dem Volumen der Mineralmatrix der Probe berechnet werden. Das Matrixvolumen wurde indirekt aus dem Trockengewicht und der Matrixdichte ermittelt, welche bei Calcitmarmoren in der Regel mit der Mineraldichte von Calcit (2,71 g/cm³; Tröger 1967) übereinstimmt. In Formel 3.14 ist das Trockengewicht bereits im spezifischen Intrusionsvolumen berücksichtigt, so dass die Porosität wie folgt berechnet wurde:

Formel 3.14: $\Phi = \frac{V_{Hg}}{V_{Hg} + \frac{1}{\rho_{Matrix}}} \cdot 100$

Φ [Vol.-%]: Porosität
V_{Hg} [mm³/g]: spezifisches Intrusionsvolumen
ρ_{Matrix} [g/mm³]: Dichte der Mineralmatrix (Calcit: 0,00271 g/mm³)

3.3.4.3 Permeabilität

Die Permeabilität (Durchlässigkeit) eines Gesteins ist ein Maß für die mit Gasen oder Flüssigkeiten durchströmbare Porosität (= effektive Porosität, vgl. Kap. 3.3.4.1) und für die Kommunikation des Porensystems (vgl. Poschlod 1990, Weiß 1992). Sie gibt als verwitterungssensibler und richtungsabhängiger Parameter Auskunft über die Entwicklung und Vorzugsorientierung von Rissporositäten und spielt für das Trocknungs- und Wasseraufnahmeverhalten eine wichtige Rolle. Ihre Maßeinheit ist Darcy ([d] = [10^{-12} m²]).

Die Messungen wurden an Marmorzylinder der Größe Ø30 mm x 30 mm mit Luft als durchströmendes Medium durchgeführt. Die Proben wurden vor der Messung mindestens 72 Stunden bei 30 °C getrocknet. Mit Hilfe einer Einspannvorrichtung konnte in der Probe ein Luftdruckgefälle erzeugt und die Durchflussrate gemessen werden. Die Berechnung der Luftpermeabilität erfolgte auf der Grundlage des Gesetztes von Darcy (1856) nach folgender Gleichung:

Formel 3.15: $k = \frac{2 \cdot \eta \cdot Q \cdot l \cdot p_2}{A \cdot (p_1^2 - p_2^2)} \cdot 10^6$

k [md]: Luftpermeabilität
η [Pas]: Viskosität des durchströmenden Mediums (Luft: 1,77 10^{-5} Pas)
Q [cm³/s]: Durchflussrate
l [cm]: Länge der durchströmten Gesteinsprobe
A [cm²]: Querschnitt der durchströmten Gesteinsprobe
p_1 [bar]: Luftdruck beim Eintritt in die Probe
p_2 [bar]: Luftdruck beim Austritt aus der Probe

4 Bauwerksuntersuchungen: Fallbeispiele

Hinsichtlich der Verwitterungsproblematik von Marmor in seiner Verwendung als Fassadenmaterial stellt sich die Frage, welche Bedeutung extrinsische und intrinsische Einflussfaktoren auf die Plattendeformation, die Materialentfestigung und letztendlich auf die Lebensdauer von Marmorfassaden haben. Um die Mechanismen, die zur strukturellen Schädigung von Marmor führen, besser verstehen zu können, wurden umfangreiche in-situ-Untersuchungen am Beispiel zweier Marmore aus Peccia (Schweiz) und Carrara (Italien) an insgesamt vier Gebäuden durchgeführt, die zwischen 1960 und 1991 im Geisteswissenschaftlichen Zentrum der Universität Göttingen errichtet worden sind. Die Marmorfassaden aller vier Gebäude weisen Verbiegungen und weitere vielfältige Schadensphänomene auf.

Die beiden verwendeten Marmortypen sind bezüglich zahlreicher Materialeigenschaften konträr, das heißt sie zeigen zum Teil extreme Unterschiede in ihren Gefügeparametern und dem daraus resultierenden Verwitterungsverhalten am Gebäude. Von daher deckt ihr Beispiel einen großen Bereich der in dieser Arbeit untersuchten Problematik ab.

Nachfolgend werden zunächst die Bauwerkscharakteristika der einzelnen Gebäude dargestellt. Anschließend erfolgt eine Schadensanamnese der Außenverkleidung, welche der Ausgangspunkt für eine systematische Fassadenkartierung ist. Diese beinhaltet als wesentliche Information die Quantifizierung der Verbiegung aller Fassadenplatten. Aus dem Verteilungsmuster der Durchbiegungen lässt sich vor allem der Wirkungsgrad klimatischer und bauphysikalischer Einflussfaktoren ableiten. Weiterhin stellen die Ergebnisse aus den Fassadenkartierungen die Grundlage für weiterführende Untersuchungen dar, die auf die Zustandserfassung und das Schadenspotenzial der Marmorverkleidung abzielen (vgl. Kap. 8).

4.1 Oeconomicum, Theologicum und Juridicum auf dem Campus der Universität Göttingen

Im Zuge steigender Studentenzahlen in den 60er Jahren wurden auf dem Campus der Universität Göttingen die Institutsgebäude der wirtschaftswissenschaftlichen, theologischen und juristischen Fakultät – das Oeconomicum, Theologicum (jeweils Baujahr 1966) und Juridicum (Baujahr 1960) errichtet (Abb. 4.1).

4.1.1 Bauwerkscharakteristika

Die beiden jüngeren Gebäude sind von der Bauweise her völlig identisch. Alle drei zeichnen sich durch einen zweckorientierten Baustil aus, der auf architektonische Raffinessen verzichtet. Jede Fassadenseite zeigt vier bzw. beim Juridicum drei Plattenreihen, die jeweils durch eine Fensterreihe mit Lüftungsschächten darüber unterbrochen sind (Abb. 4.2). Die Fassadenplatten sind am Oeconomicum und Theologicum

einheitlich dimensioniert und zu Ensembles von jeweils vier Platten montiert (Abb. 4.2a). Die Ornamentierung der Marmorplatten innerhalb einer solchen Vierergruppe ist meist identisch und variiert zwischen den Ensembles. Am Juridicum wechseln sich innerhalb der Fassadenzeilen drei gleich große Platten mit einer schmaleren Platte ab (Abb. 4.2b). Die ursprüngliche Fugenweite betrug an allen drei Gebäuden 5 mm. Die wesentlichen Bauwerkscharakteristika sind nachfolgend in Tab. 4.1 zusammengefasst.

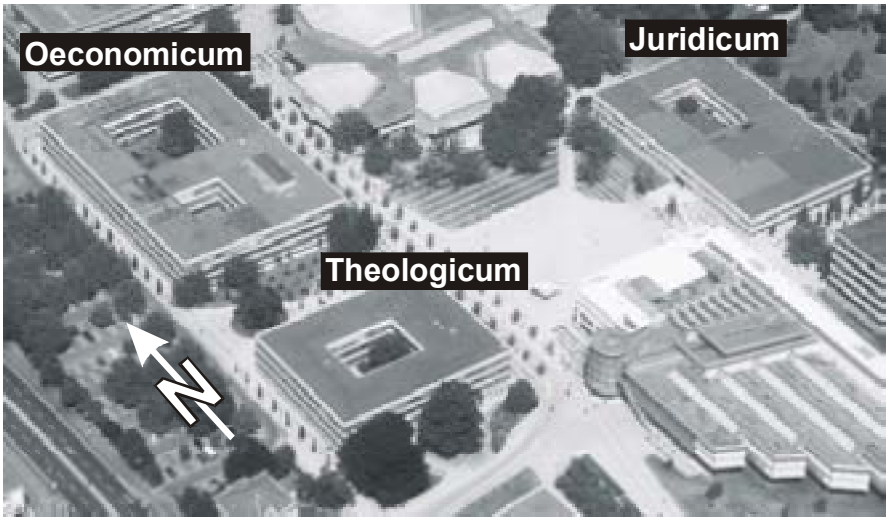


Abb. 4.1: Geisteswissenschaftliches Zentrum (Campus) der Universität Göttingen aus der Vogelperspektive mit den drei Funktionsgebäuden Oeconomicum, Theologicum und Juridicum.

Abb. 4.2: Fassadenansicht des a) Oeconomicums (analog zum Theologicum) mit vier Plattenzeilen und b) des Juridicums mit drei Plattenzeilen.

Tabelle 4.1: Überblick wichtiger Gebäudedaten.

	Anzahl der Stockwerke	Bau-jahr	Gebäudelänge in N-S-Richtung [m]	Gebäudelänge in W-E-Richtung [m]	Höhe [m]	Größe der Marmor-fassade [m²]	Anzahl der Fassaden-platten	Größe der Fassadenplatten Höhe [cm]	Größe der Fassadenplatten Breite [cm]	Größe der Fassadenplatten Dicke [cm]
Oeconomicum	3	1966	83	55	13	1400	1500	128	67	3
Theologicum	3	1966	44	55	13	1000	1100	128	67	3
Juridicum	2	1960	75	45	9	850	1100	118	71 / 55	3
							Eckplatten:	118	39 / 48	3

Die Fassadenplatten haben an der Unterkante eine Nut, die in eine am Mauerwerk befestigten Schiene eingelassen ist (Abb. 4.3a). Die Oberkante ist mittels einer Leiste fixiert (Abb. 4.3b). Die Platten des Juridicums sind zusätzlich seitlich mit Edelstahl-Ankerdornen befestigt (Abb. 4.3c). Der Abstand zwischen der Plattenrückseite und der nicht isolierten Stahlbetonwand dient zur Hinterlüftung und beträgt 1-3 cm (Oeconomicum, Theologicum) bzw. ca. 6 cm (Juridicum).

Abb. 4.3: Befestigungssystem der Fassadenplatten. a) Die Unterkante der Platten steckt mit der Nut an der Schiene, die am Mauerwerk befestigt ist. b) Die Oberkante der Platten steckt frei beweglich in der Leiste. c) Die Platten am Juridicum sind im oberen Drittel seitlich mit Ankerdornen befestigt.

Als Material für die Fassadenverkleidung wurde schweizerischer Peccia Marmor des Typs Peccia Virginio Normal verwendet (gleicher Typ wie in den Laborexperimenten, s. Kap. 5). Es handelt sich um einen mittelkörnigen, dunkelweißen Marmor. Seine zum Teil kräftige Pigmentierung wird von bräunlichen Biotitlagen oder grauen, wolkenartigen Pyritadern im mm- bis cm-, selten im dm-Abstand, gebildet. Zusammen mit langgestreckten mm- bis cm-dicken Linsen aus gröberkörnigem Calcit markieren sie die Foliation, die bisweilen im dm-Bereich gefaltet ist. Bei Schnittlagen parallel zur Foliation erscheinen die Platten mitunter auch gleichmäßig dunkelweiß. Es ist zu bemerken, dass bei einer Orientierung der Foliation senkrecht zur Plattenoberfläche nur Schnittlagen verwirklicht sind, bei denen die Spur der Foliation, d.h. das Schnittli-

near zwischen metamorphem Lagenbau und Plattenoberfläche, steil bis senkrecht verläuft (Abb. 4.4).

Abb. 4.4: Orientierung des metamorphen Lagenbaus (Foliation) des Fassadenmarmors im Verhältnis zur Schnittrichtung der Platten. An den Fassadenplatten der drei Gebäude sind lediglich die linken beiden Schnittlagen und alle Übergänge zwischen ihnen verwirklicht.

4.1.2 Schadensphänomene

Nach etwa vier Jahrzehnten zeigt der Großteil der Marmorverkleidung eine konkave Einwölbung (Abb. 4.5a), die besonders intensiv in der obersten Fassadenzeile der Ostfassade des Oeconomicums und Juridicums ausgebildet ist. Dort und in anderen Bereichen starker Einschüsselung sind die Plattenränder nach außen gebogen, so dass die oberen Plattenecken häufig Risse oder Ausbrüche aufweisen (Abb. 4.5b). Die unteren Plattenecken zeigen oftmals Risse, die von der Nut ausgehen (Abb. 4.5c). Es ist von außen nicht erkennbar, wie weit sich diese für die Standsicherheit der Platten gefährlich erscheinenden Risse zur Mitte der Plattenunterkante fortsetzen. Am Juridicum sind Risse häufig von der seitlichen Verankerung initiiert (Abb. 4.5d). Es ist zu befürchten, dass die Ankerdorne infolge der Plattenverformung vielfach verbogen oder möglicherweise zerbrochen sind, was aber von außen selten zu beobachten ist (Abb. 4.5e). Offene Risse quer durchs Platteninnere sind selten (Abb. 4.5f) und folgen meistens der Vorzeichnung der Foliation. Vor allem am Juridicum wurden kleinere Ausbrüche teilweise mit einer Ersatzmasse ausgebessert (Abb. 4.5g).

Die dramatischsten Schadensbilder mit großflächigen Ausbrüchen bis hin zu komplett durchgebrochenen Platten sind in den untersten Fassadenzeilen anzutreffen und stehen offensichtlich in Verbindung mit Vandalismus (Abb. 4.5h). Die Plattenoberflächen sind dort auch häufig angeraut, was gewöhnlich eine Folge chemischer und mechanischer Beanspruchung durch die Entfernung von Graffiti ist. Des Weiteren sind wenige Platten durch biogene Besiedelung in Mitleidenschaft gezogen (Abb. 4.5i). Ein Teil der Fassadenplatten der Ostfassade von Oeconomicum und Theologicum ist im Gegensatz zur allgemeinen Tendenz sichtbar konvex nach außen gewölbt.

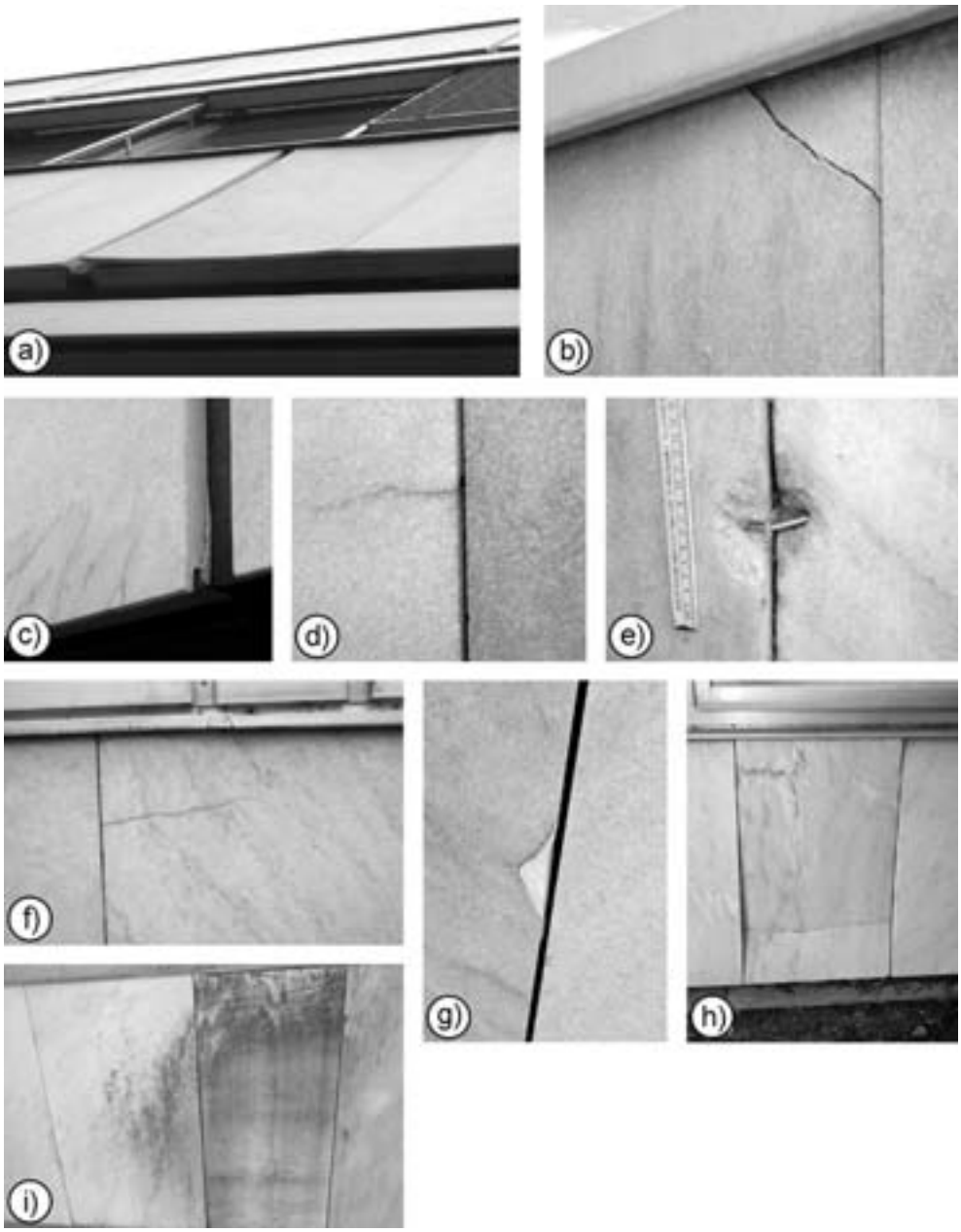


Abb. 4.5: Schadensphänomene an der Fassadenverkleidung der drei untersuchten Gebäude. a) Konkave Einschüsselung. b) Durchgehender Riss an der oberen Plattenecke, der sich leicht zum Ausbruch entwickelt. c) Riss, initiiert an der unteren Nut. d) Riss, initiiert am Ankerdorn. e) Durch die Plattenverformung verbogener Ankerdorn (rechts), sichtbar durch die Abplatzung am Halteanker. f) Langer Riss verläuft quer durchs Platteninnere. g) Mit Ersatzmasse verspachtelter Ausbruch (Juridicum). h) Gebrochene Marmorplatte in der untersten Fassadenzeile als Folge von Vandalismus. i) Mit Biofilm besiedelte Fassadenplatte (rechts).

4.1.3 Untersuchungsergebnisse

Zum Zwecke einer zerstörungsfreien Zustandserfassung der Fassadenverkleidung wurde eine Gebäudekartierung durchgeführt. Dazu wurde die Verbiegung aller Fassadenplatten quantifiziert mit dem Ziel, klimatische und bauphysikalische Einflussfaktoren zu erfassen (Höhe am Gebäude, Fassadenorientierung). Darüber hinaus soll der Einfluss weiterer Faktoren wie Plattenbreite oder die Schnittlage bzw. die Raumlage der Foliation in den Platten überprüft werden.

Weiterhin wurden alle Risse und Ausbrüche quantitativ und qualitativ erfasst. Unter der Annahme, dass der Verbiegungsgrad einer Fassadenplatte einen Indikator für deren Schädigungsgrad darstellt, soll der Zusammenhang zwischen Verbiegung und relativer Häufigkeit von sichtbaren Schäden überprüft werden.

Insgesamt wurde die Durchbiegung von 1500 Fassadenplatten am Oeconomicum und jeweils etwa 1100 Platten am Theologicum und Juridicum gemessen. Der Messabstand L zwischen den Fusspunkten des Biegemeters über die vertikale Mittellinie hinweg (vgl. Kap. 3.3.2.2) betrug an Oeconomicum und Theologicum L = 1200 mm und am Juridicum L = 1100 mm. Die Durchbiegungen der einzelnen Fassadenplatten sind im Anhang 1 bis 3 dargestellt. Da die Mehrheit der Platten konkav nach innen gewölbt ist, werden konkave Durchbiegungen mit positiven Messwerten und konvexe Durchbiegungen mit negativen Messwerten belegt. Die höchsten Einzelwerte sind am Oeconomicum und Theologicum jeweils in der obersten Zeile der Ostfassade (17,3 mm/m und 18,3 mm/m) zu verzeichnen. Am Juridicum beträgt der höchste Einzelwert 21,2 mm/m, gemessen an der mittleren Fassadenzeile der Südfassade.

4.1.3.1 Einteilung in Schadensklassen und Schadenskartierung

Die Zugehörigkeit einer Fassadenplatte zu einer bestimmten Schadensklasse wurde über ihren Verbiegungsgrad definiert. Eine solche Zuordnung ermöglicht zum einen, die Verbiegung in einer Gebäudekarte darstellen zu können, zum anderen eine Beziehung zwischen der relativen Häufigkeit von Rissen und Ausbrüchen und dem Grad der Verformung herzustellen. Die Anzahl der Schadensklassen sollte so gewählt werden, dass eine ausreichende Präzision erreicht wird, ohne unübersichtlich zu werden. Unter diesem Aspekt erschien bei der gegebenen Häufigkeitsverteilung eine Einteilung in Klassen mit einer Variationsbreite von etwa 3 mm/m am sinnvollsten. Über das gesamte Spektrum unterschiedlicher Verbiegungsgrade hinweg resultieren daraus insgesamt acht Schadensklassen (Tab. 4.2). Mit Zuordnung der Fassadenplatten zu Schadensklassen kann die Verteilung der Verbiegungsgrade an den Gebäuden mit Hilfe von Gebäudekarten dargestellt werden.

4.1.3.2 Zusammenhang zwischen Exposition und Plattenverbiegung

Da angenommen werden kann, dass der Einfluss der Exposition innerhalb einer Fassadenzeile für alle Platten vergleichbar ist, wurden die Absolutbeträge der Durch-

biegungen in den einzelnen Fassadenzeilen zu Mittelwerten zusammen gefasst (Abb. 4.6). An allen Gebäuden zeigen sich deutliche Unterschiede in der Durchbiegung in Abhängigkeit von der Höhe der Platten am Gebäude und der Orientierung der Fassade. Die Zeilenmittelwerte reichen von 0,5±0,5 mm/m in der untersten Fassadenzeile der Nordfassade des Theologicums bis 11,8±2,2 mm/m in der obersten Fassadenzeile der Ostfassade des Oeconomicums. Generell sind die Biegewerte an den Nordfassaden am niedrigsten. Alle anderen Fassaden zeigen auf höherem Niveau im Mittel etwa vergleichbare Werte (Oeconomicum, Theologicum) bzw. den höchsten Wert an der Südfassade des Juridicums. Darüber hinaus sind an den Nordfassaden die niedrigsten Schwankungen von Einzelwerten zu beobachten, abzulesen an der Länge der Fehlerbalken (Abb. 4.6). Es kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss der Sonneneinstrahlung und damit der Temperatur maßgeblich für dieses Verhalten verantwortlich ist.

Tabelle 4.2: Einteilung in Schadensklassen nach dem Grad der Verbiegung, gültig für die Fassadenplatten der Gebäude Oeconomicum, Theologicum und Juridicum.

	konvex			konkav				
Schadens-klasse	**-2**	**-1**	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Durchbiegung [mm/m]	< -4.5	-4.5 bis -1.5	-1.5 bis 1.5	1.5 bis 4.5	4.5 bis 7.6	7.6 bis 10.6	10.6 bis 13.6	> 13.6

An allen Fassaden der drei Gebäude ist die mittlere Durchbiegung in der untersten Fassadenzeile mit Ausnahme der Westfassade des Juridicums am geringsten. Weiterhin sind dort auch die Streuungen der Einzelwerte innerhalb der einzelnen Fassaden mit Ausnahme des Juridicums am kleinsten.

Am Oeconomicum und Theologicum zeigen jeweils die Ostfassaden eine Anomalie des Verbiegeverhaltens. Während an den anderen Fassaden der beiden Gebäude das gleiche Grundmuster vorliegt (niedrigste mittlere Durchbiegung in der untersten Zeile und etwa vergleichbare in den darüber liegenden), weist die Ostfassade jeweils sowohl die größten konkaven (oberste Zeile) als auch die einzigen deutlich konvexen Durchbiegungen (2te Zeile) auf (vgl. Anhang 1 und 2). Da alle anderen beobachteten Einflussparameter gleich sind, werden als Ursache bauphysikalische Besonderheiten vermutet. Der Einblick in die Installationspläne der beiden Gebäude, insbesondere der Heizungsanlagen, konnte diese Vermutung bislang nicht bestätigen. Bezüglich der Verteilung von Heißwasserrohren oder Abluftschächten, die einen Einfluss auf das Mikroklima und damit auf die Plattenverformung haben könnten, konnten an diesem Gebäudeteil keine Auffälligkeiten festgestellt werden.

Eine weitere Beobachtung, die möglicherweise auf bauphysikalischen Einfluss beruht, weist das Juridicum auf, das jeweils in der 2ten Fassadenzeile mit Ausnahme der Ostfassade die höchste mittlere Durchbiegung zeigt (Abb. 4.6e,f). Der Unterschied zu den benachbarten Zeilen liegt jedoch im Bereich der Streuung und ist damit relativ gering und wenig aussagekräftig.

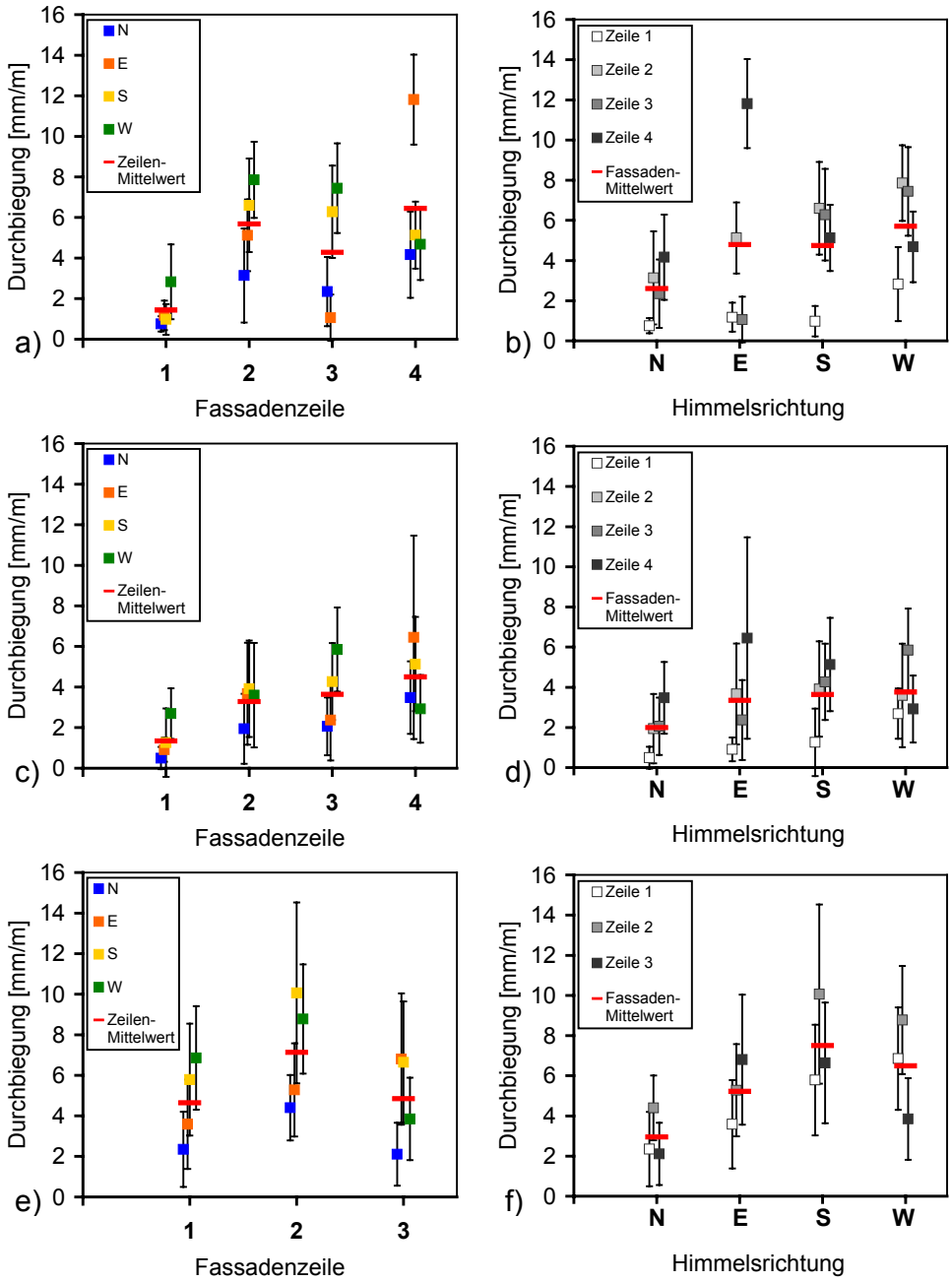


Abb. 4.6: Durchbiegung der Fassadenplatten in Abhängigkeit der Exposition an den Gebäuden a,b) Oeconomicum, c,d) Theologicum und e,f) Juridicum. Gegeben sind jeweils die Zeilenmittelwerte der Absolutbeträge der Durchbiegung als Funktion der Höhe am Gebäude (linke Diagramme) und der Himmelsrichtung (rechte Diagramme). Die Fehlerindikatoren markieren die Standardabweichung.

Am Juridicum sind im Gegensatz zu den Nachbargebäuden keine nennenswerten konvexen (nach außen gerichtete) Plattenkrümmungen zu beobachten. Einzige Ausnahme sind fünf Platten an der unteren Westhälfte der Nordfassade (Abb. 4.7). Hierbei handelt es sich um Ersatzplatten aus Carrara-Marmor, die etwa Mitte der 90er Jahre aus Restmaterial der Fassade des benachbarten SUB-Gebäudes (Kap. 4.2) gefertigt worden sind. Bemerkenswert hierbei ist, dass die zum Rest der Fassade gegensätzliche Wölbung einzig auf Materialeigenschaften zurückzuführen zu sein scheint, da sämtliche anderen möglichen Einflussparameter (Verankerung, Oberflächenbearbeitung, Exposition) an den Nachbarplatten identisch sind.

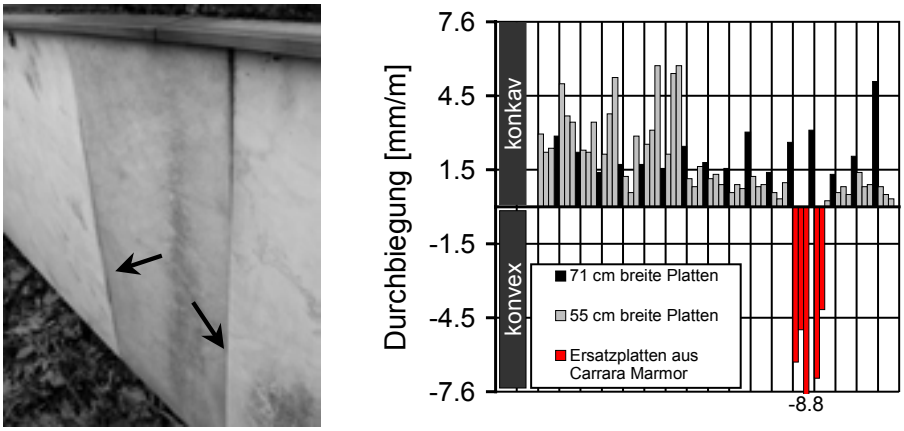


Abb. 4.7: Ersatzplatten aus Carrara-Marmor (äußere helle Platten im Bild links) in der untersten Fassadenzeile an der Nordfassade des Juridicums zeigen im Gegensatz zu allen anderen Fassadenplatten am Gebäude deutliche konvexe Wölbungen (Histogramm rechts).

4.1.3.3 Relative Häufigkeit sichtbarer Schäden

Die Verteilung der relativen Häufigkeiten unterschiedlicher Durchbiegungsgrade von Fassadenplatten an den Gebäuden zeigt, dass die Verteilungskurve des Oeconomicums im Vergleich zum gleich alten Theologicum etwas nach rechts in Richtung stärkerer konkaver Verbiegung verschoben ist (Abb. 4.8). Entsprechend unterscheidet sich die mittlere Plattenverbiegung (Mittelwert der absoluten Zeilenmittelwerte) mit 4,5±3,1 mm/m (Oeconomicum) und 3,2±1,7 mm/m (Theologicum). Beide Gebäude weisen gegenüber dem Juridicum auch einen gewissen Anteil deutlich konvex verbogener Platten (<-1,5 mm/m) von knapp 10 % (Oeconimicum) bzw. 5 % (Theologicum) auf. Die Verteilungskurve des Juridicums (Abb. 4.8) zeigt mit Ausnahme der Ersatzplatten aus Carrara-Marmor (vgl. Abb. 4.7) keine konvexen Verbiegungen und ist im Vergleich zu den jüngeren Nachbargebäuden in den Bereich stärkerer Durchbiegung verschoben. Der Gebäudemittelwert beträgt hier 5,5±2,4 mm/m.

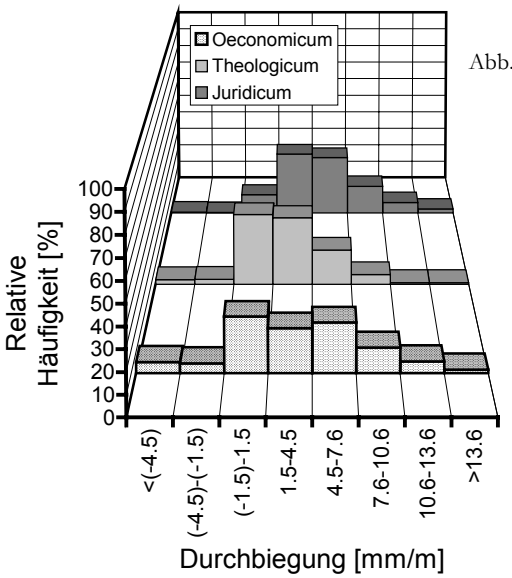


Abb. 4.8: Relative Häufigkeitsverteilung der unterschiedlichen Durchbiegungsgrade der Fassadenplatten an den drei untersuchten Gebäuden.

Die relative Häufigkeit sichtbarer Schäden als ein Indikator für den Schädigungsgrad einer Biegeklasse sollte mit dem Grad der Plattenverbiegung ansteigen. Erfasst wurden hierbei Risse bzw. Ausbrüche mit einer Risslänge bzw. Länge der Abbruchkante von ≥10 cm. Am Oeconomicum steigt die Schadenshäufigkeit mit zunehmender Durchbiegung dramatisch an (Abb. 4.9a). Während Schäden bei kaum sichtbarer oder konvexer Verbiegung (<1,5 mm/m) an höchstens jeder siebten Platte zu verzeichnen sind, sind in der höchsten Biegeklasse (>13,6 mm/m) 81 % aller Platten geschädigt. Allerdings umfasst diese Schadensklasse lediglich 27 Platten bzw. 1,7 % aller Platten am gesamten Gebäude. Des Weiteren steigt der Anteil der Platten, die sowohl Risse als auch Ausbrüche zeigen, im Bereich ab 7,6 mm/m bis >13,6 mm/m von 1 % bis 31 % extrem an. Am Theologicum (Abb. 4.9b) sind die beiden höchsten Schadensklassen zahlenmäßig kaum vertreten (vgl. Abb. 4.8), so dass die relative Häufigkeit hier statistisch wenig aussagekräftig ist. Der Anteil geschädigter Platten ist im Bereich konvexer Durchbiegungen (negative Werte) höher als am Oeconimicum, ansonsten aber ähnlich verteilt. Am Juridicum (Abb. 4.9c) ist der Anstieg des Schadensanteils schwächer ausgeprägt, wenngleich auch hier die relative Häufigkeit sichtbarer Schäden bei den stärker verbogenen Platten (>7,6 mm/m) um mehr als das doppelte gegenüber kaum verbogener Platten zunimmt.

Entsprechend der niedrigsten mittleren Plattenverbiegung am Theologicum (s. oben) ist der Anteil geschädigter Platten am Gesamtgebäude dort mit 16,7 % ebenfalls etwas niedriger als am Oeconomicum (19,6 %) und Juridicum (20,2 %). Während Risse das dominierende Schadensbild an Oeconomicum und Theologicum darstellen, sind am Juridicum Ausbrüche das häufigste Schadensmerkmal.

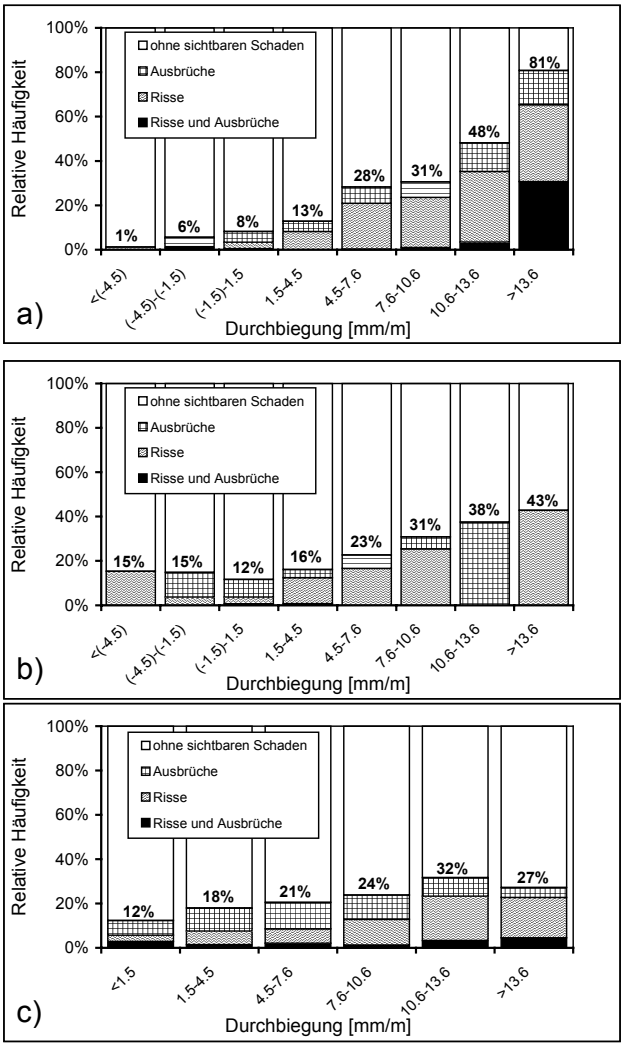


Abb. 4.9: Relative Häufigkeit von sichtbaren Schäden wie Risse und Ausbrüche in Abhängigkeit der Durchbiegung der Marmorplatten an den Gebäuden a) Oeconomicum, b) Theologicum und c) Juridicum.

4.1.3.4 Einfluss der Plattendimension

Die Tatsache, dass am Juridicum ein Viertel aller Platten mit 55 cm Breite schmaler als die Mehrheit der Platten (71 cm Breite) dimensioniert ist, ansonsten aber den gleichen Bedingungen am Gebäude (Exposition, Verankerung) unterliegt, ermöglicht die Untersuchung des Einflusses der Plattenbreite auf den Grad der Verbiegung. Abb. 4.10a zeigt, dass die Durchbiegung an den schmalen Platten insgesamt deutlich reduziert ist. Im Detail ist an der Nordfassade der Unterschied nicht feststellbar, während die Durchbiegungs-Zeilenmittelwerte der schmalen Platten an der Ost- und Südfassade etwa 30 % niedriger im Vergleich zu den breiten Platten sind. An der Westfassade ist die Reduktion mit etwa 10 % geringer.

Um zu überprüfen, ob der relative Anteil sichtbarer Schäden mit dieser Beobachtung konform geht, wurden in Abb. 4.10b die Schadenshäufigkeiten der einzelnen Fassaden gegenübergestellt. Während an der Nordfassade beide Plattendimensionen zu einem annähernd gleichen Anteil von knapp über 13 % geschädigt sind, sind die Schadenshäufigkeiten schmaler Platten an der Ost- und Südfassade deutlich um 7,7 bzw. 8,6 Prozentpunkte reduziert; an der Westfassade lediglich um 2,7 Prozentpunkte.

Insgesamt zeigen die schmalen Platten mit 16,2 % relativer Schadenshäufigkeit um etwa 20 % seltener sichtbare Schäden als die breiteren Platten mit 20,7 % relativer Schadenshäufigkeit am Gesamtgebäude (Abb. 4.10b).

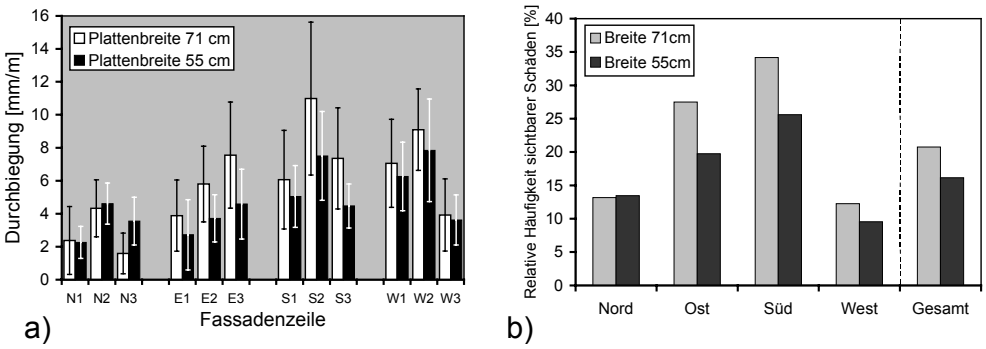


Abb. 4.10: Zusammenhang zwischen Plattenbreite und Schädigungsgrad an den Marmorplatten des Juridicums: a) Zeilenmittelwerte der Durchbiegung in Abhängigkeit der Plattenbreite (die Fehlerindikatoren markieren die Standardabweichung); b) Relative Schadenshäufigkeiten der Fassadenplatten in Abhängigkeit der Plattenbreite.

4.1.3.5 Zusammenhang zwischen Schnittlage und Plattenverbiegung

Es stellt sich die Frage, ob die Schnittrichtung von Fassadenplatten bezogen auf die strukturellen Elemente (in erster Linie die Foliation) Einfluss auf den Grad der Plattenverbiegung hat. Die Marmorverkleidung an der Nordfassade des Oeconomicums ist von allen untersuchten Fassaden am deutlichsten dekoriert, d.h. der metamorphe Lagenbau ist dort am besten sichtbar (Abb. 4.11). Zudem ist aufgrund der Exposition in Richtung Norden der Einfluss der Sonneneinstrahlung als Störeffekt am geringsten, so dass dieser Fassadenbereich für eine qualitative Untersuchung dieser Fragestellung besonders geeignet ist.

Die Marmorplatten, die zu Ensembles von jeweils vier Platten montiert wurden, zeigen innerhalb einer solchen Vierergruppe meist das gleiche Dekor, d.h. sie wurden aus dem gleichen Block hintereinander heraus geschnitten und haben folglich die gleiche Orientierung zum metamorphen Lagenbau. Das Dekor und damit die Raumlage der Foliation bezogen auf die Plattenoberfläche wechselt zwischen den Vierergruppen. Am Beispiel der dritten Fassadenzeile ist in Abb. 4.11 demonstriert, wie der Grad der Verbiegung mit der Schnittlage wechselt und innerhalb der gleichen Schnittlage vergleichbar ist. Da auf den Plattenoberflächen nur die Spur der Foliation sichtbar ist, d.h. das Schnittlinear zwischen Oberfläche und Foliation, und nicht die dreidimensio-

nale Orientierung der Foliation, ist ein Zusammenhang zwischen Makrogefüge und Durchbiegung zwar nur qualitativ zu ermitteln, aber doch deutlich zu erkennen.

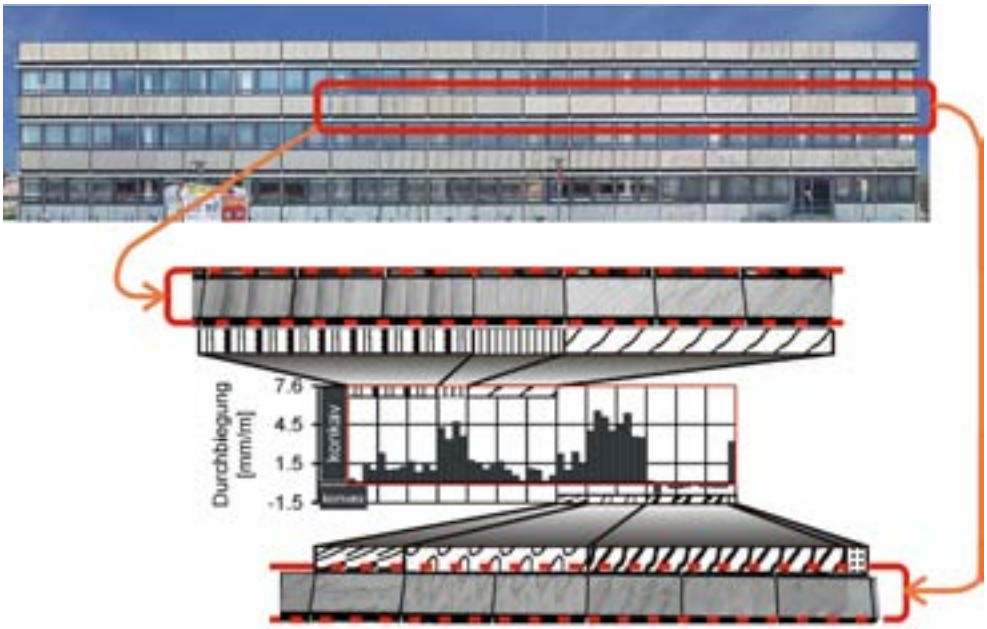


Abb. 4.11: Zusammenhang zwischen der Schnittlage der Fassadenplatten und dem Grad der Verbiegung am Beispiel der dritten Fassadenzeile der Nordfassade des Oeconomicums.

4.1.3.6 Zusammenhang zwischen Mikroklima und Plattenverbiegung

Da bekannt ist, dass die täglichen Temperaturschwankungen maßgeblich Einfluss auf den Grad der Verformung haben (vgl. Kap. 2.2), soll am Beispiel der unteren Fassadenzeilen des Oeconomicums überprüft werden, ob die Unterschiede in der Plattenverbiegung innerhalb dieser Fassadenzeilen auf unterschiedliche Oberflächentemperaturen der Platten zurückgeführt werden können, wie sie z.B. bei der Beschattung durch Bäume, aber auch durch eine unterschiedliche Albedo der Plattenvorderseiten entstehen. Darüber hinaus soll geprüft werden, ob die höhere Verbiegung der jeweils zweiten Fassadenzeile im Vergleich zur ersten (vgl. Anhang 1) auf Temperaturunterschiede zurückzuführen ist.

Zu diesem Zweck wurden die Oberflächentemperaturen in den Plattenzentren mittels eines Raytek® Infrarot-Thermometers (Typ Raynger ST 60; Genauigkeit: ±1 %) an einem heißen wolkenlosen Sommertag zwischen 8 und 18 Uhr im Abstand von eineinhalb Stunden gemessen. Innerhalb der einzelnen Fassadenzeilen sind keine signifikanten Überschneidungen von Verbiegungs- und Temperaturmaxima erkennbar (Abb. 4.12). Weiterhin sind keine Unterschiede in der Variationsbreite der Temperaturen zwischen erster und zweiter Fassadenzeile festzustellen, die die extremen Unterschiede in der Verbiegung beispielsweise innerhalb der Nordfassade (Abb. 4.12a) erklären würden.

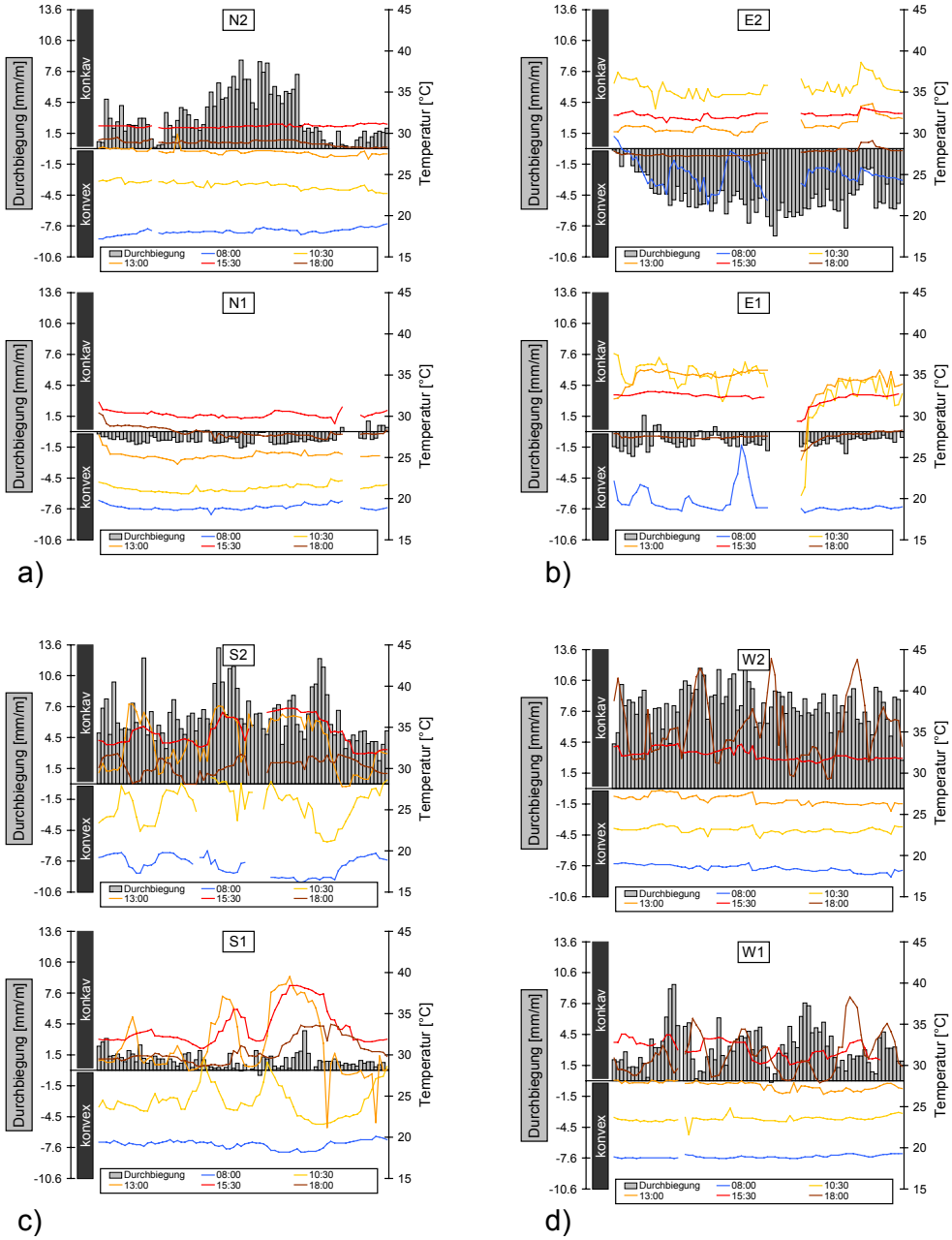


Abb. 4.12: Vergleich zwischen Oberflächentemperatur und Plattenverbiegung jeweils in den unteren beiden Fassadenzeilen der a) Nord-, b) Ost-, c) Süd- und d) Westfassade des Oeconomicums. Die Temperatur wurde an einem sonnigen, wolkenlosen Tag zu fünf verschiedenen Tageszeiten für jede einzelne Fassadenplatte jeweils in der Plattenmitte mit einem Infrarot-Thermometer erfasst.

Selbst die Unterschiede zwischen den Fassaden sind schwer auf den Einfluss der Sonneneinstrahlung zurückführbar. Zum Beispiel sind sowohl die täglichen Temperaturschwankungen als auch die Maximaltemperaturen in der untersten Fassadenzeile der Südfassade höher als an der untersten Zeile der Ostfassade (vgl. Abb. 4.12b,c). Trotzdem ist die mittlere Durchbiegung beider Zeilen mit 1,0±0,8 mm/m und 1,2±0,7 mm/m etwa gleich. Lediglich die niedrige und schwach variierende Temperaturverteilung der beiden untersuchten Zeilen an der Nordfassade geht konform mit der niedrigsten mittleren Durchbiegung verglichen mit anderen Fassadenzeilen der gleichen Höhe am Gebäude. Zusammenfassend ist der Einfluss von Temperaturunterschieden, wie sie durch direkte Sonneneinstrahlung hervorgerufen wird, auf die Plattenverbiegung als gering zu bewerten.

4.2 Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen (SUB)

Der im neoklassizistischen Stil konzipierte zentrale Neubau der Niedersächsischen Staats- und Universitätsbibliothek (SUB; Abb. 4.13a) auf dem Campus der Universität Göttingen wurde 1991 fertig gestellt. Mit 4,5 Mio. Bänden allein im Zentralgebäude und 7 Mio. Bänden insgesamt stellt die SUB die größte deutsche Universitätsbibliothek dar und zählt zu den fünf größten Bibliotheken Deutschlands.

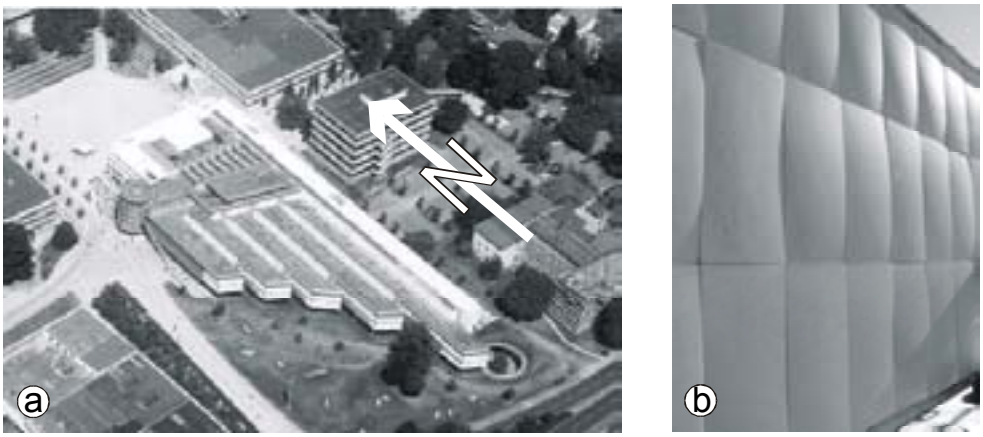


Abb. 4.13: Hauptgebäude der Niedersächsischen Staats- und Universitätsbibliothek (SUB). a) Luftbild. b) Repräsentatives Schadensbild der verbogenen Fassadenplatten auf der Dachebene des SUB-Gebäudes.

4.2.1 Bauwerkscharakteristika

Das dreistöckige 17 m hohe, freistehende Gebäude hat eine Länge von 150 m in N-S-Richtung und 60 m in W-E-Richtung. Die Fassade ist mit weißem Carrara Marmor des Typs „Bianco Carrara Venato Gioia“ verkleidet (ital. bianco = weiß, venato = geadert). Die Fassadenplatten sind unterschiedlich dimensioniert. Die Plattendicke beträgt

40 mm mit Ausnahme des größten Plattenformates auf dem Dach (1,51 m hoch, 0,74 m breit) mit einer Dicke von 50 mm (Abb. 4.13b). Die geläufigste Plattenhöhe beträgt 1,04 m; die häufigsten Breiten sind 0,74 m und 0,45 m. Insgesamt wurden etwa 4000 Marmorplatten als Fassadenverkleidung verbaut; das entspricht einer Gesamtfläche von ca. 3000 m².

Aufgrund der komplexen Architektur der Marmorverkleidung ist es sinnvoll, bei der Suche nach Einflussparametern auf die Plattenverbiegung zwischen drei Fassadenbereichen zu unterscheiden:

- Reguläre Bereiche der Fassade sind vor dem Gebäude stehend sichtbar und umfassen ca. 2700 Platten, deren Plattenoberfläche vom Gebäude weggeneigt ist. Die Fassadenplatten sind hier in 13 Zeilen mit einer Höhe von 1,04 m und einer obersten 14ten Zeile mit einer Höhe von 0,66 m angebracht.
- Nischen der regulären Fassade sind Bereiche, deren Platten sich am Außenbereich der Treppenhäuser oder auf der Rückseite einer Fassadenwand befinden oder die von anderen Fassadenteilen verdeckt sind (ca. 500 Platten).
- Fassadenplatten der Dachebenen (ca. 800 Platten).

Die Platten sind hinterlüftet mit einem Abstand von 20-40 mm zwischen Plattenrückseite und einer ca. 80 mm dicken Lage aus Mineralwolle, die am Mauerwerk befestigt ist. Die ursprüngliche Fugenweite der offenen Fugen war 8±2 mm. Die Platten sind jeweils mit zwei Paar horizontalen oder vertikalen rostfreien Edelstahl-Ankerdornen befestigt. Die Plattenoberflächen sind geschliffen.

Während der Planungsphase wurden seitens des Steinlieferanten keine Bedenken in Bezug auf Plattenverformungen angemeldet; der beauftragte Sachverständige jedoch schloss eine Verbiegung der verwendeten Fassadenplatten nicht aus. Bezüglich der Fugenweite und der Plattengrößen folgte man daher der Empfehlung des Sachverständigen und entschied sich für relativ kleine Plattenformate mit einer Dicke über der üblichen Norm von 30-35 mm, was die Wahrscheinlichkeit von Verbiegungen reduzieren sollte.

4.2.2 Schadensphänomene

Bereits neun bzw. zwölf Jahre nach Fertigstellung des Gebäudes zeigen die Platten der Marmorverkleidung deutliche konvexe Durchbiegungen (Abb. 4.13b), die im oberen Bereich sowie auf der Dachebene stärker ausgeprägt sind. Sichtbare Schäden wie Risse oder Ausbrüche (Abb. 4.14) sind an den regulären Bereichen der Fassade kaum zu verzeichnen, treten aber auf den Dachebenen häufiger auf. Risse sowie Ausbrüche sind in den meisten Fällen von den Ankerdornen initiiert (Abb. 4.14a,b) und selten länger als 5 cm. Auf der Dachebene sind einige der horizontalen Dehnungsfugen zwischen den großformatigen Platten bereits geschlossen, so dass diese in ihrer Seitendehnung gehindert werden.

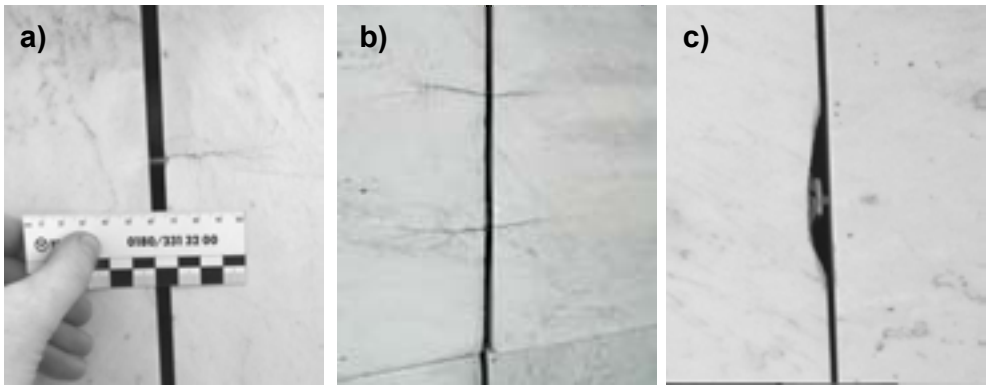


Abb. 4.14: Schadensphänomene an der Marmorfassade des SUB-Gebäudes. a) Am Ankerdorn initiierter Riss. b) An Ankerdornen initiierte Risse setzen sich bei stark verbogenen Platten der Dachebene zur Plattenmitte fort. c) Ausbruch an der Verankerung.

4.2.3 Untersuchungsergebnisse

An der Marmorverkleidung des Gebäudes wurde im Sommer 2003 eine Schadensanalyse zusammen mit einer Schadenskartierung durchgeführt. Dazu wurde mit Hilfe von Hebebühnen die Durchbiegung jeder einzelnen Fassadenplatte gemessen. Der Messabstand L (meist 700 mm und 1000 mm) war von der Größe der jeweiligen Platte abhängig und erfolgte in der Regel über die vertikale Mittellinie, im Falle von Platten, die breiter als hoch waren, auch über die horizontale oder diagonale Mittellinie (vgl. Kap. 3.3.2.2). Diese Durchführung war wegen der großen Anzahl an Platten mit unterschiedlichsten Dimensionierungen zweckmäßig. Da die Mehrheit der Platten konvex nach außen gewölbt ist, werden konvexe Durchbiegungen mit positiven Messwerten und konkave Durchbiegungen mit negativen Messwerten belegt (im Gegensatz zu Kap. 4.1!). Weiterhin wurden die Weiten der horizontalen und vertikalen Fugen zwischen den Platten mit einer Genauigkeit von ±0,2 mm erfasst und den Platten zugeordnet. Mit dem Wissen um die ursprünglichen Fugenweiten von 8±2 mm sollte näherungsweise indirekt die Seitenausdehnung der Platten ermittelt werden. Sichtbare Schäden wurden qualitativ und quantitativ registriert. Der Einfluss verschiedener Parameter auf die Plattenverformung soll mittels der gewonnenen Ergebnisse diskutiert werden. Anhand bereits im Jahre 2000 gewonnener Daten an 232 Platten aus repräsentative Bereichen der regulären Fassade soll das Fortschreiten der Plattenverbiegung skizziert werden.

4.2.3.1 Einteilung in Schadensklassen und Schadenskartierung

Damit die unterschiedlichen Schädigungsintensitäten der Fassadenplatten hinreichend genau quantifiziert werden können, wurden nach den in Kap. 4.1.3.1 genannten Kriterien mit der gegebenen Häufigkeitsverteilung (Abb. 4.15) der Verbiegeintensitäten Schadensklassen mit einer Intervallbreite von 2 mm/m festgelegt. Quasi ebene Platten

mit Durchbiegungen kleiner als 1 mm/m konvexer Durchbiegung sowie konkave Durchbiegungen, die nur sporadisch an 0,6 % aller Platten am Gebäude auftritt, wurden zur Schadensklasse „<1 mm/m“ zusammengefasst; Durchbiegungsgrade größer als 11 mm/m sind in der Schadensklasse „>11 mm/m“ vereint. Daraus resultieren sieben Schadensklassen (s. Legende in Abb. 4.16).

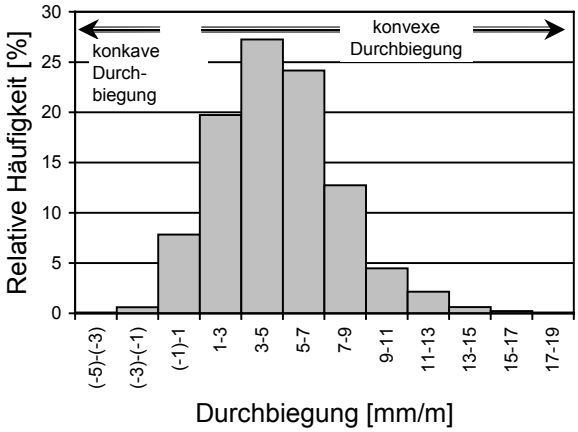


Abb. 4.15: Relative Häufigkeitsverteilung der unterschiedlichen Durchbiegungsgrade der knapp 4000 untersuchten Fassadenplatten am SUB-Gebäude.

Um zum einen die Durchbiegung der Fassadenplatten zu visualisieren, zum anderen um einen ersten Eindruck zu erhalten, welche Einflussparameter Unterschiede in der Durchbiegung verursachen können, wurde eine detaillierte Fassadenkartierung durchgeführt (Abb. 4.16). Den Biegeklassen wurden verschiedene Graustufen zugeordnet von weiß (quasi unverbogen) bis schwarz (stark verbogen).

Die Gebäudekarten zeigen einen höheren Grad der Durchbiegung in den oberen Bereichen, wobei die oberste 14te Zeile mit niedrigeren Platten eine relativ niedrige Durchbiegung aufweist. Weiterhin können Unterschiede zwischen den Himmelsrichtungen beobachtet werden. Nord-, Süd- und Westfassade zeigen vergleichbare Biegeintensitäten, wogegen die Fassadenplatten der Ostfassade deutlich weniger stark verbogen sind.

4.2.3.2 Zusammenhang zwischen Exposition und Plattenverbiegung

Um den Einfluss der Höhe am Gebäude und der Himmelsrichtung zu quantifizieren, wurden die Mittelwerte der Durchbiegung jeder einzelnen Fassadenzeile berechnet (Abb. 4.17). Dabei wurden nur die regulären Bereiche (s. Kap. 4.2.1) berücksichtigt, um die Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten und um Nebeneffekte wie etwa Unterschiede im Mikroklima oder in den bauphysikalischen Besonderheiten so weit wie möglich zu vermeiden.

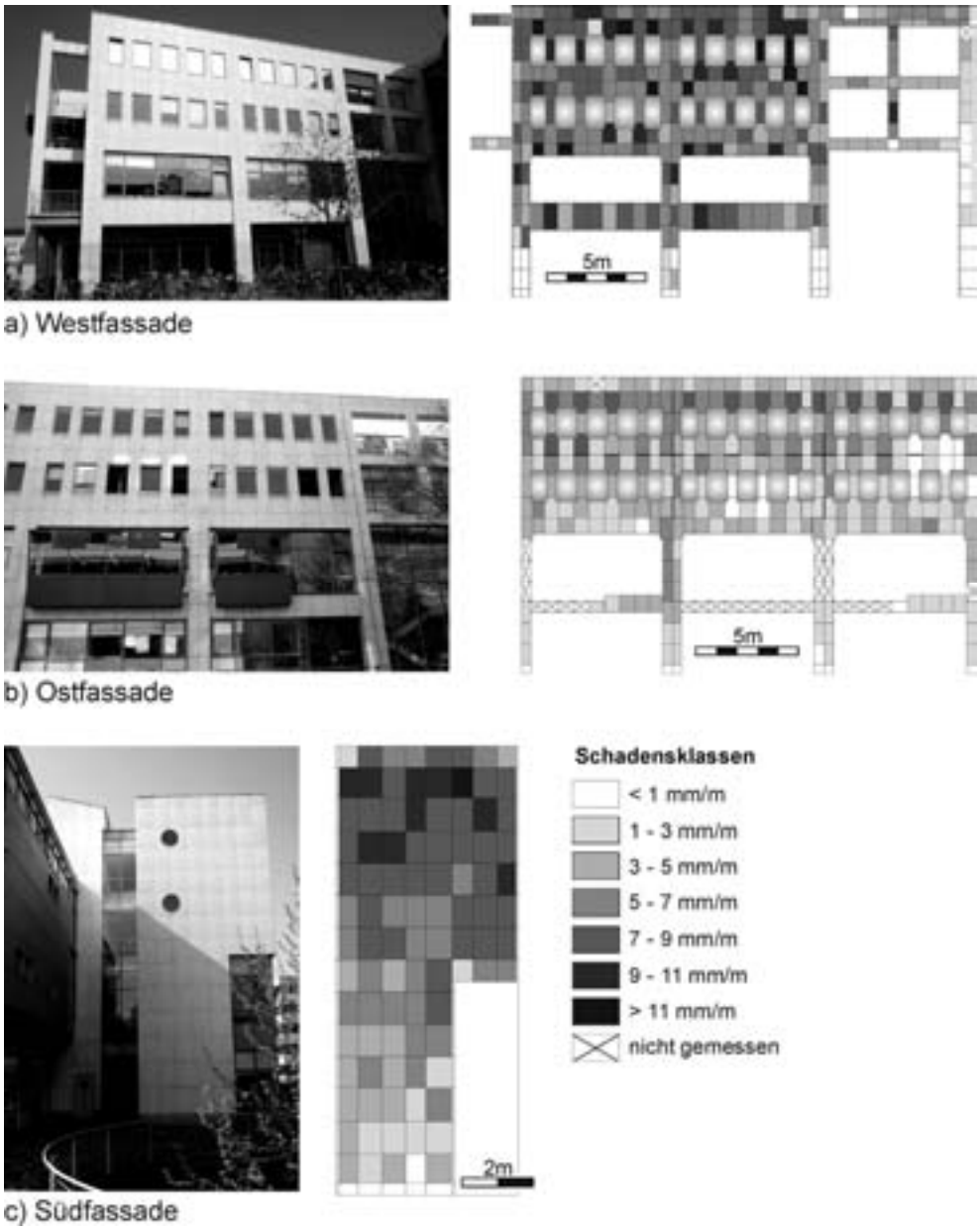


Abb. 4.16: Repräsentative Ausschnitte der Gebäudefassade (links) mit den entsprechenden Schadenskarten (rechs), welche die Durchbiegungsgrade der einzelnen Fassadenplatten mittels unterschiedlicher Grautöne darstellt: a) Westfassade, b) Ostfassade, c) Südfassade.

Die Histogramme in Abb. 4.17 zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Plattendurchbiegung von der Höhe am Gebäude und von der Himmelsrichtung. Die unteren drei Zeilen (Gebäudehöhe bis 3,75 m) haben in allen vier Himmelsrichtungen die gering-

sten Durchbiegungen. Hier variieren die Zeilendurchschnitte zwischen leichter konkaver Durchbiegung (-0.3±1.1 mm/m) und konvexer Durchbiegung (3.8±2.5 mm/m), beide Extreme gemessen an der Westfassade. Von Zeile 4 bis 13 (Gebäudehöhe 3,80 m bis 14,20 m) steigen die mittleren Durchbiegungen an der Nordfassade (4.0-9.0 mm/m) und an der Südfassade (4.5-7.9 mm/m) sehr deutlich an; etwas weniger stark ist der Anstieg an der Westfassade (6.5-8.2 mm/m) und an der Ostfassade (4.2-5.8 mm/m). Der Grad der Verbiegung in der obersten 14ten Zeile entspricht etwa dem Niveau auf mittlerer Gebäudehöhe. Die Zeilendurchschnitte aus allen vier Himmelsrichtungen (mittl. Diagramm Abb. 4.17) spiegeln den Trend der einzelnen Fassadenorientierungen wider. Der Zeilendurchschnitt steigt von 1.5±1.2 mm/m in Zeile 1 und 2 bis 6.8±2.6 mm/m in Zeile 13 an.

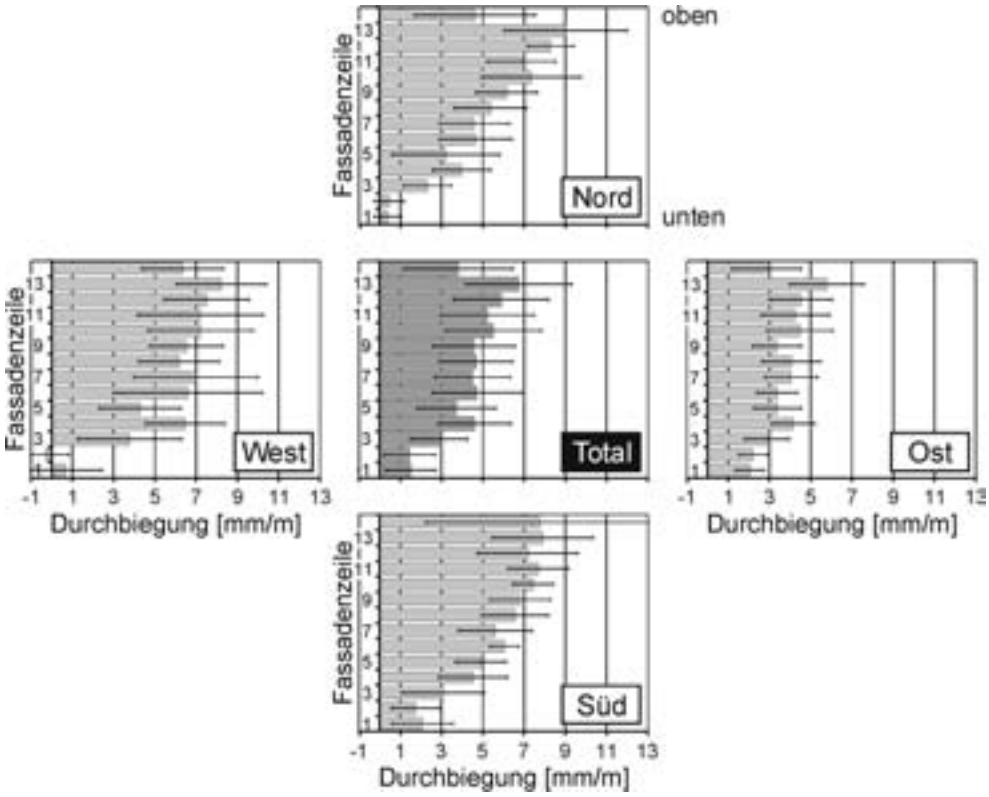


Abb. 4.17: Zeilenmittelwerte der Durchbiegungen der einzelnen Fassadenzeilen in Abhängigkeit der Höhe am Gebäude und der Himmelsrichtung. Die Darstellung umfasst die ca. 2700 Marmorplatten aus den regulären Bereichen der Fassade. Die Fehlerindikatoren markieren die Standardabweichung.

Vergleicht man die mittlere Plattenverbiegung verschiedener Fassadenorientierungen miteinander, weist die Westfassade den höchsten Durchschnittswert auf (6.4±3.0 mm/m), Nord- und Ostfassade rangieren niedriger mit vergleichbaren Inten-

sitäten von 5.8±2.9 mm/m und 5.7±2.6 mm/m, und die Ostfassade ist mit durchschnittlich 4.2±1.7 mm/m am schwächsten verbogen.

4.2.3.3 Relative Häufigkeit sichtbarer Schäden

Erwartungsgemäß sollte der Schädigungsgrad von Marmorplatten mit dem Grad der Verbiegung korrelieren. Als Indikator für die Intensität der Schädigung kann die relative Häufigkeit von sichtbaren Schäden (s. Kap. 4.2.2) herangezogen werden. Es ist zu beobachten, dass der Anteil von Platten, der Risse oder Ausbrüche aufweist, mit dem Betrag der Durchbiegung zunimmt (Abb. 4.18). Nur 0,9 % aller Platten mit einer Durchbiegung <1 mm/m zeigen derartige Schäden, wohingegen an jeder vierten Platte (26,0 %) mit einer Durchbiegung >11 mm/m Risse oder Ausbrüche festzustellen sind. Allerdings ist dies noch nicht als dramatisch anzusehen, da nur 3,1 % der Platten zu dieser höchsten Biegeklasse gehören und zudem überwiegend auf der Dachebene angebracht sind, so dass die verminderte Standfestigkeit der Marmorplatten kein Risiko für Fußgänger darstellt.

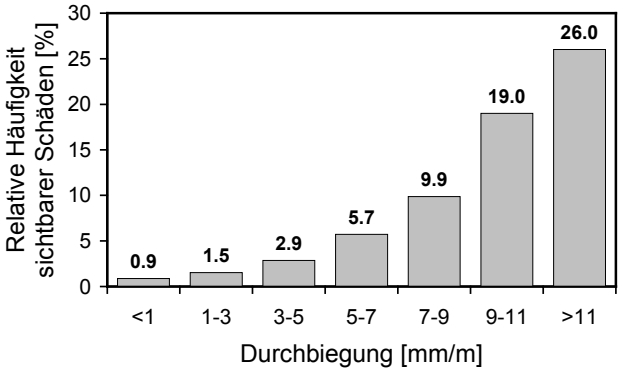


Abb. 4.18: Relative Häufigkeit von sichtbaren Schäden wie Rissen und Ausbrüchen in Abhängigkeit der Durchbiegung der Marmorplatten.

4.2.3.4 Seitenausdehnung versus Durchbiegung

Aus der Literatur (vgl. Kap. 2.2) ist bekannt, dass das Verbiegen von Marmorplatten durch die Entstehung von Mikrorissen, die eine Vergrößerung des Porenraums und damit eine Volumenvergrößerung des Gesteins bewirken, mit einer Seitenausdehnung der Platten einher geht (z.B. Grimm 1999). Da die ursprüngliche Fugenweite (8±2 mm) bekannt ist, ist es möglich, indirekt die Ausdehnung der Platten zu bestimmen. Zu diesem Zweck wurden 87 Platten eines Teils der Südfassade ausgewählt (vgl. Abb. 4.16c), um die Korrelation zwischen Plattenexpansion und Durchbiegung zu ermitteln. Dieser Fassadenteil erschien dafür am besten geeignet, da alle Platten nahezu gleich dimensioniert sind (104 cm hoch, 4 cm dick und 74 oder 78 cm breit) und Störfaktoren weitestgehend ausgeschlossen werden konnten. Es wurde der Mittelwert aus den Weiten der Fugenmitten oberhalb und unterhalb jeder Platte als eine Größe für die vertikale Expansion berechnet und der Durchbiegung der entsprechenden Platte zugeordnet.

In Abb. 4.19a sind die Zeilendurchschnitte der Durchbiegung sowie der Fugenweiten als eine Funktion der Höhe am Gebäude (≈Zeilennummer) dargestellt. Erwartungsgemäß nimmt die Durchbiegung mit der Höhe zu, wobei die Fugenweite im gleichen Verhältnis abnimmt. Werden die Zeilenmittelwerte von Plattenverbiegung und Fugenweite direkt miteinander korreliert, verhalten sich beide Parameter zueinander umgekehrt proportional mit einem hohen Korrelationskoeffizienten von r = -0,95 (Abb. 4.19b). Das bedeutet, dass die Seitenexpansion mit der Durchbiegung der Platten stark korreliert, was nicht notwendigerweise ein lineares Verhältnis zwischen beiden Parametern impliziert. Abb. 4.20a zeigt anstelle der Zeilenmittelwerte die Mittelwerte der Schadensklassen von Durchbiegung und Fugenweite aus dem untersuchten Fassadenteil. Die Regressionskurve verläuft hier als Potenzialfunktion. Bei den schwach verbogenen Platten ist die Fugenweite nahezu die ursprüngliche (8 mm), wogegen sie bei den mittel bis stark verbogenen Platten wesentlich niedriger zwischen 4.9 mm und bis zu 3.7 mm variiert. Der kleinste Fugenweiten-Durchschnitt in der Schadensklasse „7-9 mm/m“ entspricht einer maximalen vertikalen Expansion von etwa

(8,0 mm – 3,7 mm) / 1,04 m = 4,1 mm/m.

Es scheint, dass, sobald ein gewisser Betrag der Expansion erreicht wird, die Durchbiegung weiter ansteigt, ohne dass sich die seitliche Ausdehnung der Platten bzw. die Fugenweite weiter verändern.

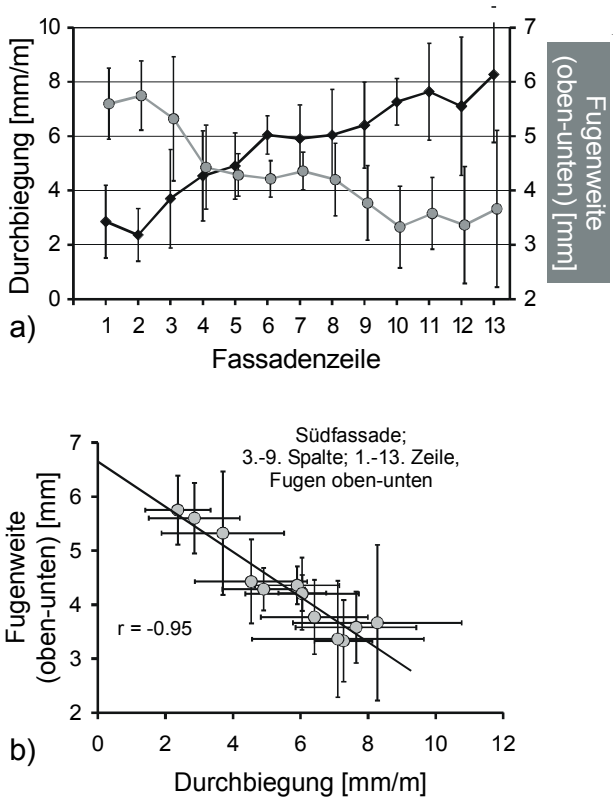


Abb. 4.19: Zusammenhang zwischen Plattenverbiegung und Fugenweite in Abhängigkeit von der Höhe am Gebäude an einem ausgewählten Bereich der Südfassade: a) Durchbiegung (graue Datenpunkte) und Fugenweite (schwarze Datenpunkte) als Funktion der Höhe der Fassadenzeile; b) Korrelation zwischen den Mittelwerten der Durchbiegung und der Fugenweite aus den einzelnen Fassadenzeilen. Eingetragen sind die Regressionsgerade (durchgezogene Linie) und der Korrelationskoeffizient (r). Die Fehlerindikatoren markieren die Standardabweichung.

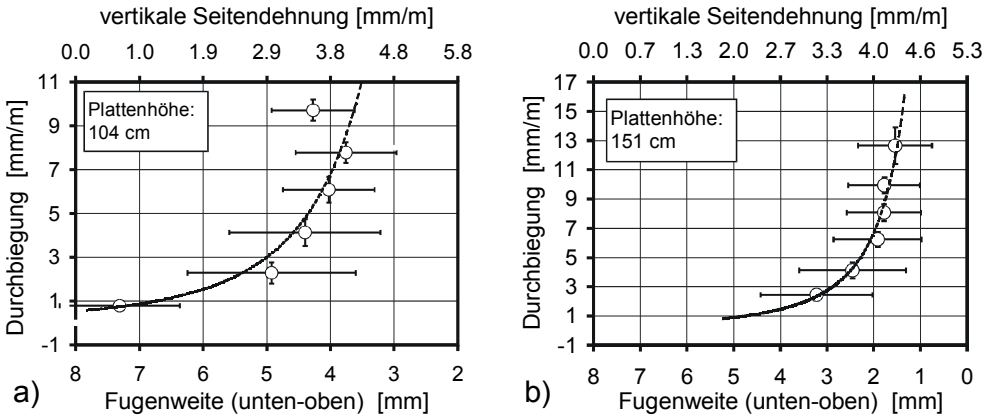


Abb. 4.20: Zusammenhang zwischen Durchbiegung und Fugenweite bzw. vertikaler Seitendehnung a) an einem ausgewählten Bereich der Südfassade und b) an ausgewählten, großformatigen Platten der Dachebene, die nach Westen exponiert sind. Die Datenpunkte stellen die Mittelwerte der Durchbiegung sowie der Fugenweite bzw. der entsprechenden vertikalen Seitendehnung aus den einzelnen Schadensklassen dar (vgl. Kap. 4.2.3.1). Die Fehlerindikatoren markieren die Standardabweichung. Die Regressionskurve (durchgezogene Linie) spiegelt den Verlauf einer Potenzialfunktion wider.

Um diese Annahme zu überprüfen, wurde die Beziehung Durchbiegung versus Fugenweite zusätzlich an den 272 nach Westen orientierten Platten auf der Dachebene ermittelt (Abb. 4.20b), die mit 151 cm Höhe das größte Plattenformat aufweisen (vgl. Kap. 4.2.1). Der Trend einer Potenzialkurve zeigt sich bestätigt, wobei die niedrigste Schadensklasse hier nicht vertreten ist. 65 der 272 Platten gehören der höchsten Schadensklasse (>11 mm/m) an, die eine durchschnittliche Breite der horizontalen Fugen von 1,5±0,8 mm aufweist. Daraus resultiert eine maximale vertikale Expansion von

(8,0 mm – 1,5 mm) / 1,51 m = 4,3 mm/m,

die gut mit der relativen Seitendehnung an der Südfassade übereinstimmt.

4.2.3.5 Einfluss der Plattengröße

Um den Effekt unterschiedlicher Plattenhöhen auf den Grad der Durchbiegung zu ermitteln, wurden die Zeilenmittelwerte der Zeilen 7, 8, 10, 11 und 13 (Abb. 4.21a) an West-, Nord- und Ostfassade jeweils für zwei unterschiedliche Plattenhöhen ermittelt: Die Durchbiegung von i) „kleinen“ Platten mit einer Höhe von 72 cm oder 81 cm wurden mit einem Messabstand von L = 700 mm und die von ii) „großen“ Platten mit einer Höhe von 104 cm wurden mit einem Messabstand von L = 1000 mm gemessen; beide Plattenformate jeweils über die vertikale Mittellinie. Der Vergleich unterschiedlicher Plattengrößen innerhalb derselben Fassadenzeilen schließt einen Einfluss der Gebäudehöhe auf die mittleren Durchbiegungen als Störfaktor aus.

An der Westfassade und weniger ausgeprägt an der Nordfassade zeigen kleine Platten höhere Verbiegungen als große Platten (Abb. 4.21b). Das Verhältnis an der Ostfassade ist dagegen umgekehrt: die großen Platten sind hier stärker verbogen. Der Effekt ist nicht sehr stark, da sich die Linie gleicher Durchbiegung noch im Bereich der Standardabweichung sämtlicher Zeilenmittelwerte befindet (Abb. 4.21b). Jedoch liegen alle Datenpunkte einer Fassade entweder über oder unter (bzw. auch auf) der Linie gleicher Durchbiegung, so dass ein gewisser Trend feststellbar ist.

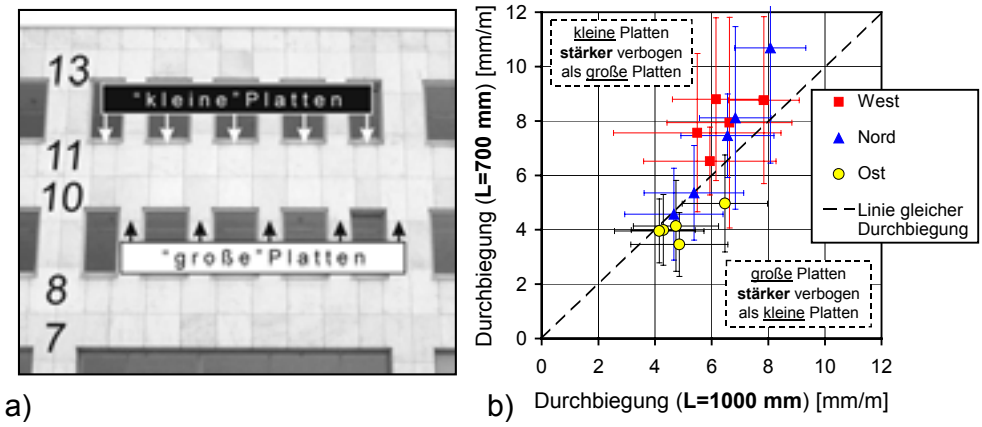


Abb. 4.21: Zusammenhang zwischen Durchbiegung und Plattenformat. a) Aus allen Fassadenzeilen mit Platten unterschiedlicher Höhe (nummerierte Zeilen) wurde jeweils der Zeilenmittelwert der Durchbiegung „kleiner“ und „großer“ Platten (siehe Text) errechnet und in b) einander gegenüber gestellt. Die Fehlerindikatoren markieren die Standardabweichung.

Die oberste 14te Fassadenzeile mit „kleinen“ 66 cm hohen Platten, deren Durchbiegung über die horizontale Mittellinie erfasst wurde, zeigt im Vergleich zu den darunter liegenden Zeilen generell an allen Gebäudeseiten einen niedrigeren Grad der Verbiegung (vgl. Abb. 4.17). Gegenüber der benachbarten Fassadenzeile 13 ist die Durchbiegung in Zeile 14 an der Westfassade um 28 %, an der Nordfassade um 57 % und an der Ostfassade um 43 % reduziert.

Für die Interpretation der Daten ist zu berücksichtigen, dass sämtliche hier untersuchten „kleinen“ Platten seitlich mit horizontalen Ankerdornen befestigt sind, wohingegen „große“ Platten eine Fixierung an der Ober- und Unterseite mit vertikalen Ankerdornen aufweisen (Abb. 4.22). Möglicherweise sind dabei die Platten jeweils in eine Richtung stärker in ihrer Seitendehnung behindert, was die Verbiegung in die entsprechende Richtung verstärken könnte und zumindest einen Teil der Unterschiede erklären würde.

4.2.3.6 Fortschreiten der Plattendurchbiegung

An einer repräsentativen Auswahl von 232 Platten (Tab. 4.3), die im Herbst 2000 untersucht wurden, soll das Fortschreiten der Plattenverbiegung anhand des Vergleichs mit den Daten aus der Messkampagne des Sommers 2003 quantifiziert werden.

Die Biegewerte aus beiden Jahren können direkt miteinander verglichen werden, da die ausgewählten Platten einheitlich über die vertikale Mittellinie mit einem Messabstand von L = 1000 mm vermessen wurden.

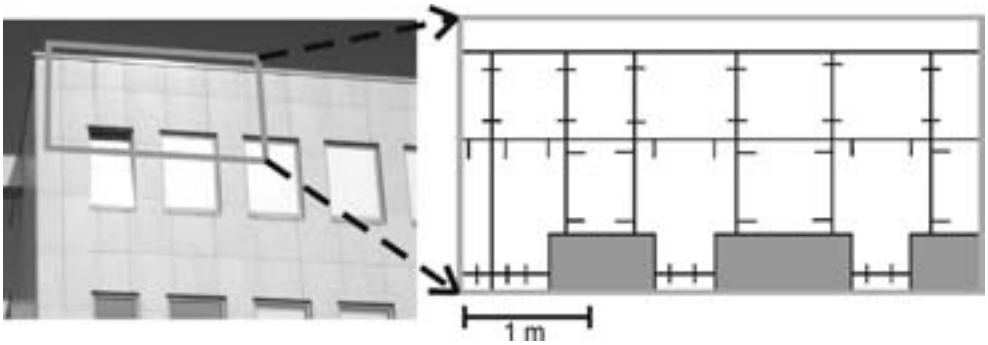


Abb. 4.22: Schematische Darstellung der Position der Ankerdorne (rechts) an einem repräsentativen Ausschnitt der regulären Fassade (links; hier: Westfassade).

Platten-zeile	Anzahl	Fassaden-orientierung	Anzahl
13	32		
12	23	Nord	42
11	18		
10	21	Ost	64
9	15		
8	23	Süd	50
7	10		
6	10	West	76
5	10		
4	36	**Gesamt:**	**232**
3	10		
2	12		
1	12		
Gesamt:	**232**		

Tabelle 4.3: Übersicht über die repräsentative Auswahl von Fassadenplatten, deren Durchbiegung sowohl bereits im Herbst 2000 als auch im Sommer 2003 gemessen wurde. Der Vergleich beider Datensätze ermöglicht die Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Plattenverbiegung am SUB-Gebäude.

Die Zeilenmittelwerte in Abb. 4.23 zeigen in den drei Jahren einen deutlichen Zuwachs von Zeile 3 an aufwärts, der von +0,9 mm/m in Zeile 3 bis +1,6 mm/m in Zeile 13 ansteigt und mit den Zeilenmittelwerten korreliert, d.h. je höher die Verbiegung, desto höher die Zunahme. Entsprechend ist in den unteren beiden Fassadenzeilen kein Zuwachs zu verzeichnen. Weiterhin ist festzustellen, dass die Streuung der Einzelwerte in allen Fassadenzeilen mit Ausnahme der untersten zunimmt. Diese Beobachtungen erscheinen logisch bei Betrachtung der Veränderung aller 232 Einzelwerte in Abb. 4.24. Der Anstieg der Regressionsgeraden mit einen sehr hohen Korrelationskoeffizienten von r = 0,98 zeigt, dass die Biegewerte im Mittel um das 1,22fache zugenommen haben. Im Hinblick auf Langzeitprognosen bedeutet das, dass die Marmorplatten ihre Verformungsgeschwindigkeit beibehalten. Folglich werden kaum gebogene Platten sich auch in Zukunft unter gleichbleibenden Bedingungen kaum weiter verändern, während stark verformte Platten ihre hohe Verformungsrate beibehalten und entsprechend früher einen kritischen Zustand erreichen. Weiterhin muss

auch die Streubreite der Biegewerte einer Plattenpopulation mit der Zeit größer werden.

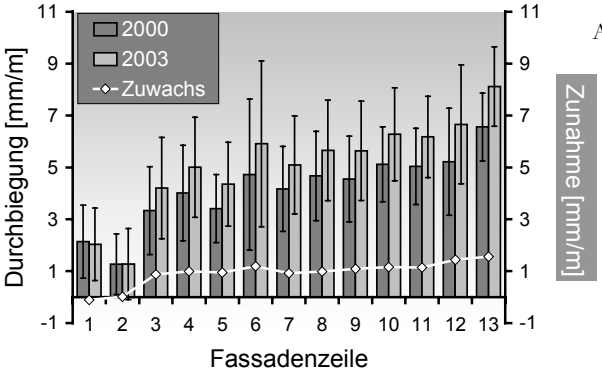


Abb. 4.23: Vergleich der Zeilenmittelwerte der Plattenverbiegung aus allen vier Himmelsrichtungen zwischen Herbst 2000 und Sommer 2003 anhand der repräsentativen Auswahl von 232 Fassadenplatten. Die Fehlerindikatoren markieren die Standardabweichung.

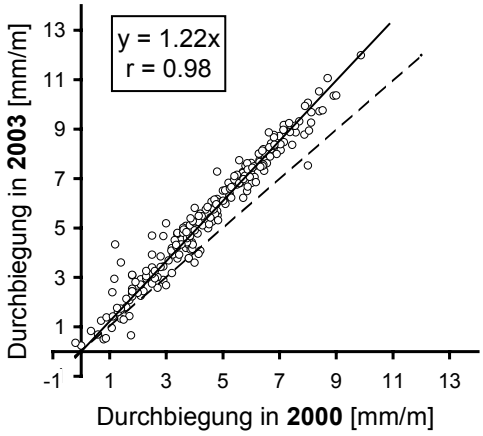


Abb. 4.24: Einzelwerte der Durchbiegung von 232 ausgewählten Fassadenplatten aus dem Jahr 2003, aufgetragen gegen die Werte von 2000. Der Anstieg der Durchbiegung wird durch die Veränderung der Regressionsgeraden (durchgezogene Linie) gegenüber der Linie gleicher Durchbiegung (gestrichelte Linie) deutlich.

Die Veränderung der Mittelwerte aus den vier Fassadenorientierungen (Abb. 4.25) zeigt ins Bild passend ihren größten Zuwachs an Süd- und Westfassade von jeweils +1,2 mm/m, wogegen die Ostfassade mit der geringsten mittleren Durchbiegung auch den kleinsten Zuwachs von +0,8 mm/m verzeichnet. Lediglich die Nordfassade zeigt trotz relativ hoher Ausgangsverformung eine ähnlich niedrige Zunahme der mittleren Durchbiegung von +0,9 mm/m und damit gleichzeitig auch den kleinsten Relativzuwachs von nur 16 % im Vergleich zu 22 % am Gesamtgebäude. Wiederum nimmt die Standardabweichung der einzelnen Fassadenorientierungen zu (Abb. 4.25). Die größte Veränderung weist die Südfassade von 5,2±2,1 mm/m im Jahr 2000 zu 6,4±2,6 mm/m drei Jahre später auf.

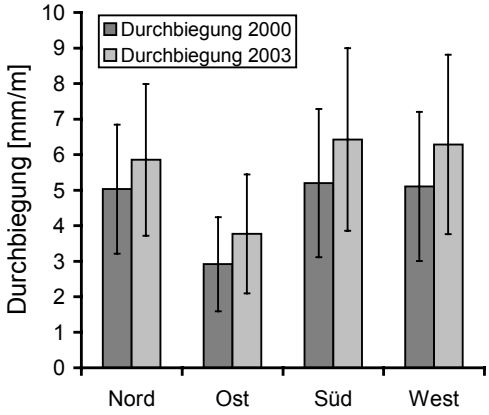


Abb. 4.25: Vergleich der Mittelwerte der Plattenverbiegung aus vier Himmelsrichtungen zwischen Herbst 2000 und Sommer 2003 anhand der repräsentativen Auswahl von 232 Fassadenplatten. Die Fehlerindikatoren markieren die Standardabweichung.

Der Mittelwert der Durchbiegung aus der gesamten Auswahl steigt von 4,5±2,1 mm/m auf 5,5±2,5 mm/m an (Abb. 4.26) und zeichnet einen deutlichen Trend vor. Damit beträgt die durchschnittliche Verbiegungsrate in den ersten neun Jahren bis zum Herbst 2000 0,49 mm/m pro Jahr und sinkt auf 0,38 mm/m pro Jahr von Herbst 2000 bis Sommer 2003.

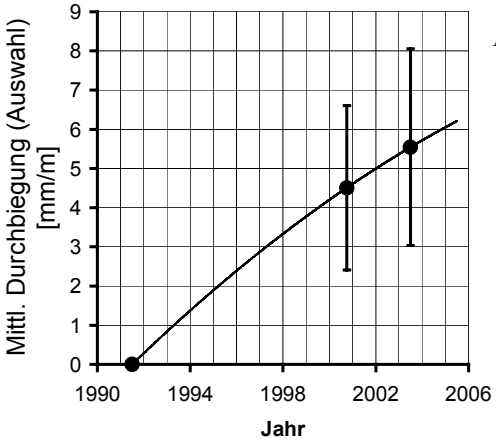


Abb. 4.26: Durchbiegungsmittelwerte der repräsentativen Auswahl von 232 Fassadenplatten als Funktion der Zeit. Die Trendkurve (durchgezogene Linie) ist annähernd linear. Die Fehlerindikatoren markieren die Standardabweichung.

5 Gefügeeigenschaften ausgewählter Marmore

In der vorliegenden Arbeit wurden zwölf verschiedene Marmorproben untersucht mit dem Ziel, den Einfluss des Gefüges auf die Verformung und Entfestigung von Fassadenplatten aus Marmor aufzeigen zu können. Im nachfolgenden Kapitel werden die für den Schädigungsprozess relevanten Gefügeeigenschaften am Beispiel der untersuchten Auswahl von Marmortypen dargestellt.

Die Proben stammen aus Italien, Portugal, der Schweiz und Schweden. Es handelt sich bei allen um handelsübliche Varietäten, die auf dem Natursteinmarkt als Fassadenmaterial Verwendung finden. Vier der Proben wurden dabei vor allem im Hinblick auf Richtungsabhängigkeiten eingehender untersucht.

Es werden sowohl die verschiedenen Gefügeelemente innerhalb der gleichen Probe miteinander in Beziehung gesetzt als auch die Variationsbreite einzelner Gefügeparameter über verschiedene Marmorproben hinweg dargestellt.

5.1 Provenienz und Makrogefüge

Peccia Marmor

Das Abbaugebiet des Peccia Marmor (Abb. 5.1) befindet sich im oberen Val Peccia im Tessin/Schweiz und stellt eines von zwei heute noch aktiven Marmorvorkommen der Schweiz dar. Der Peccia Marmor liegt im Nordpenninikum nahe am Kontakt zum Gotthardmassiv. Er gehört zu einer Zone karbonatischer Gesteine der Trias, die eine steil nach Norden einfallende isoklinale Mulde darstellt und neben Calcitmarmor aus Einfaltungen und Einschuppungen von Kalkglimmerschiefern und Gneisen besteht (Baumer & Eckardt 2000).

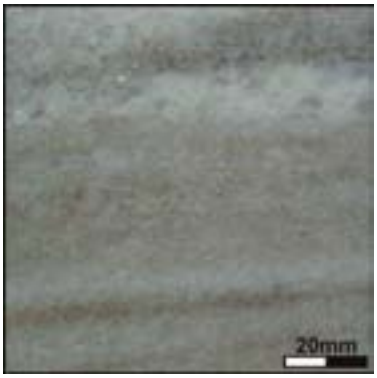


Abb. 5.1:

Makroskopisches Erscheinungsbild des Peccia Marmors. Die Foliationsebene verläuft senkrecht zur Blattebene.

Bei der hier untersuchten Varietät handelt es sich um den Typus „Cristallina Virginio Normal“. Die Zuordnung erfolgt nach subjektiven Kriterien wie Farbe oder Muster. Zur Zeit der Probenahme im Jahr 2002 war diese Varietät bereits seit einigen Jahren aus der laufenden Produktion verschwunden, was aber ein Wiederauffinden im zu-

künftigen Abbau nicht ausschließt (mdl. Mitteilung C. Moretti). Die Probe wurde als formatierter Block aus Lagerbeständen entnommen.

Das äußere Erscheinungsbild ist durch einen deutlichen Lagenbau gekennzeichnet. Die feinerkörnige, dunkelweiße Calcitmatrix wechselt sich mit cm-dicken Lagen oder langgestreckten Linsen aus grobkörnigem Calcit ab, die eine rein weiße Farbe besitzen. Dazwischen verlaufen in straffen Lagen oder leicht wolkig graue oder braune biotithaltige Adern durch das Gestein.

Carrara 1 (Venato Gioia)

Der Carrara Marmor hat seinen Ursprung im NW der Apuanischen Alpen im Norden der Toskana (Italien). Hinsichtlich der Fläche und der Abbaumenge stellt die Carrara-Region die größte Marmor-Lagerstätte der Welt dar. Hinter der Sammelbezeichnung Carrara Marmor verbirgt sich eine Vielzahl von unterschiedlichen Varietäten aus verschiedenen Steinbrüchen, die in Farbe und Struktur voneinander abweichen. In der geologischen Geschichte wurden Sedimente einer Karbonat-Plattform in mehreren Phasen deformiert und unter grünschieferfaziellen Bedingungen metamorph überprägt (Carmignani & Kligfield 1990). Resultierend erfuhr der Carrara Marmor postdeformativ eine statische Rekristallisation, wodurch das Gestein sein typisch polygonales Gefüge erhalten hat (Molli & Heilbronner 1999).

Die beiden Teilproben Carrara 1a und 1b der Varietät „Bianco Venato Gioia“ („bianco“ = weiß; „venato“ = geadert; Abb. 5.2) stammen aus dem Gebiet um Cima di Gioia, wobei erstere als kleiner bruchfrischer Block aus der Abfallproduktion entnommen wurde und letztere aus einem Block aus der laufenden Produktion stammt. Das Gestein ist weiß und wird in unterschiedlicher Intensität von meist mm-dicken grauen Pigmenteinlagerungen, Schlieren und wolkenartigen Bändern durchzogen, die zu einem Netzwerk herausgebildet sein können. Eine Foliation ist schwer erkennbar.

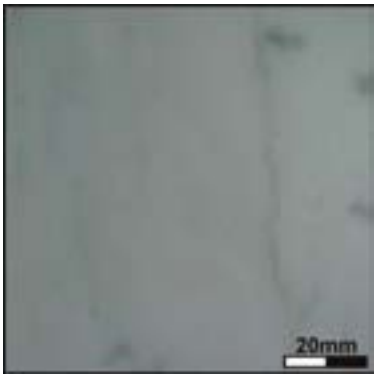


Abb. 5.2:

Makroskopisches Erscheinungsbild des Carrara Venato Gioia Marmors (Probe Carrara 1).

Ruivina

Die Probe des Ruivina Marmors (Abb. 5.3) wurde als formatierter Block einem Steinbruch bei Vila Vicosa/Portugal entnommen. Das Vorkommen aus dem Unterkambrium liegt in einem von mehreren größeren Marmor-Abbaugebieten, welche die so genannte Marmorzone („Marble Zone“) bilden und Teil der NW-SE-streichenden

Estremoz-Borba-Vila Vicosa-Antiklinale sind (IGM 2000; Fale et al. 2004). Diese ist Teil der übergeordneten tektono-stratigraphischen Einheit der Ossa-Morena-Zone im Süden Portugals (vgl. Oliveira et al. 1991).

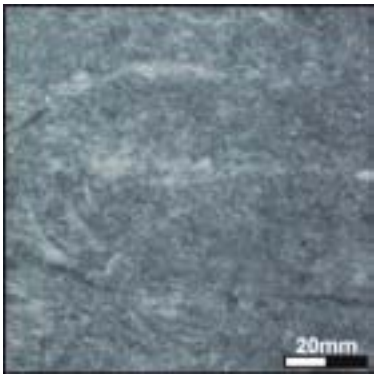


Abb. 5.3:

Makroskopisches Erscheinungsbild des Ruivina Marmors. Die Foliationsebene verläuft senkrecht zur Blattebene.

Der feinkörnige Ruivina Marmor zeigt einen engständigen Wechsel von hellen und dunkelgrauen Lagen im mm-Bereich, so dass das Gestein insgesamt homogen mittelgrau erscheint. Sehr vereinzelt sind weiße Calcitlagen mehrere mm dick und zungenförmig bis zu dm gelängt. Die straffen Lagen definieren die Foliationsebene. In cm-Abständen verlaufen bis zu dm-lange versiegelte Risse mit einer Weite unter 1 mm foliationsparallel durch das Gestein.

Rosa Estremoz

Die Probe wurde als formatierter Block einem Steinbruch bei Estremoz/Portugal entnommen. Wie der Ruivina Marmor gehört das Vorkommen des Rosa Estremoz Marmors zur Estremoz-Borba-Vila Vicosa-Antiklinale und liegt in der lithologischen Einheit des Vulkano-sedimentären Karbonatkomplex von Estremoz („Complexo Vulcano-Sedimentar Carbonatado de Estremoz"; Oliveira et al. 1991).

Der feinkörnige Marmor ist weitgehend homogen weiß bis licht rosa (Abb. 5.4). Teilweise ist eine Foliation anhand von bräunlich-roten, mit Hämatit angereicherten Schlieren oder Bänder nachgezeichnet.

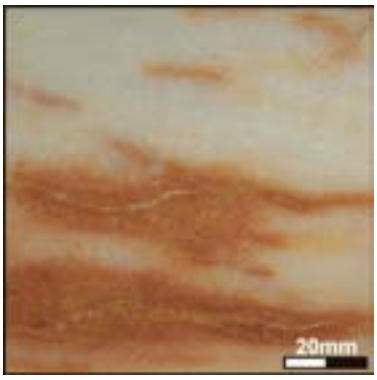


Abb. 5.4:

Makroskopisches Erscheinungsbild des Rosa Estremoz Marmors. Die Foliationsebene verläuft senkrecht zur Blattebene.

Trigaches

Der Trigaches Marmor (Abb. 5.5) wurde einem Steinbruch bei Beja im Süden Portugals entnommen. Das Vorkommen aus dem Silur liegt im Aufschlussgürtel der Trigaches Marmore in der so genannten Sao Brissos-Zone (schriftl. Mitteilung Technologisches Zentrum CEVALOR, Portugal).

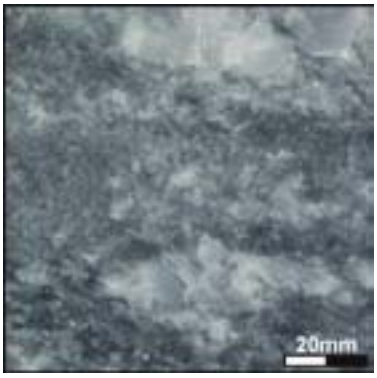


Abb. 5.5:

Makroskopisches Erscheinungsbild des Trigaches Marmors. Die Foliationsebene verläuft senkrecht zur Blattebene.

Der heterogen erscheinende Marmor zeichnet sich durch eine breite Korngrößenverteilung aus. Mittelkörnige Bereiche sind durch Graphit dunkelgrau gefärbt, wogegen grobkörnige Bereiche mit Korngrößen >1 cm hellgrau bis weiß erscheinen (Abb. 5.5). Die unterschiedlichen Korngrößenbereiche sind in Adern oder wolkig verteilt und markieren die Foliationsebene. Frisch gebrochen verbreitet das Gestein einen typischen üblen Geruch, der auf einen gewissen Anteil organischer Substanzen schließen lässt.

Verde Viana

Der Verde Viana Marmor (Abb. 5.6) stammt aus der Region um Viana do Alentejo bei Evora/Portugal. Geologisch betrachtet befindet sich das Vorkommen aus dem Kambrium in der Viana do Alentejo Antiklinale, die sich vornehmlich aus kambrischen bis ordovizischen Karbonatgesteinen zusammensetzt. Nach mesozonaler Kontaktmetamorphose durch Intrusion von Magmatiten gabbro- und dioritischer Zusammensetzung wurde dieser Bereich im Laufe seiner geologischen Geschichte noch von zwei Phasen duktiler Deformation sowie einer Phase bruchhafter Deformation geprägt (schriftl. Mitteilung Technologisches Zentrum CEVALOR, Portugal).

Der Marmor zählt zu den Ophicalciten bzw. Kalksilikat-Marmoren, die über Calcit oder Dolomit hinaus einen gewissen Anteil Silikatminerale enthalten. Charakteristisch ist seine grünliche Färbung, der das Gestein seinen Namen verdankt („verde“ = grün). Der heterogene Marmor ist grünlich dunkelgrau bis weiß. Lagen wechselnder Korngröße von mittel- bis grobkörnig und unterschiedlicher Farbnuancen definieren die Foliationsebene. Einzelne Calcitkristalle erreichen Durchmesser >1 cm.

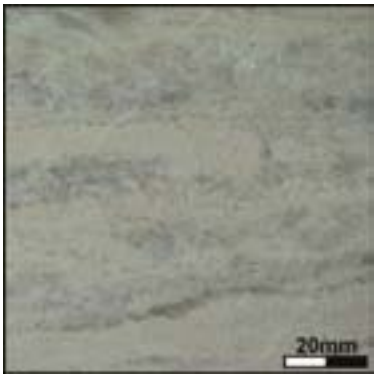


Abb. 5.6:

Makroskopisches Erscheinungsbild des Verde Viana Marmors. Die Foliationsebene verläuft senkrecht zur Blattebene.

Carrara 2 bis Carrara 6

Für die Herkunft der Carrara-Varietäten (Abb. 5.7) gilt das gleiche wie unter Carrara 1 beschrieben. Neben den typischen statisch rekristallisierten Carrara-Marmoren (Carrara 3; Abb. 5.7b) sind etliche Varietäten an Scherzonen gebunden, so dass das ursprünglich equilibrierte Korngefüge nochmals durch dynamische Rekristallisation überprägt wurde (Carrara 2, 4, 5 und 6; Molli & Heilbronner 1999).

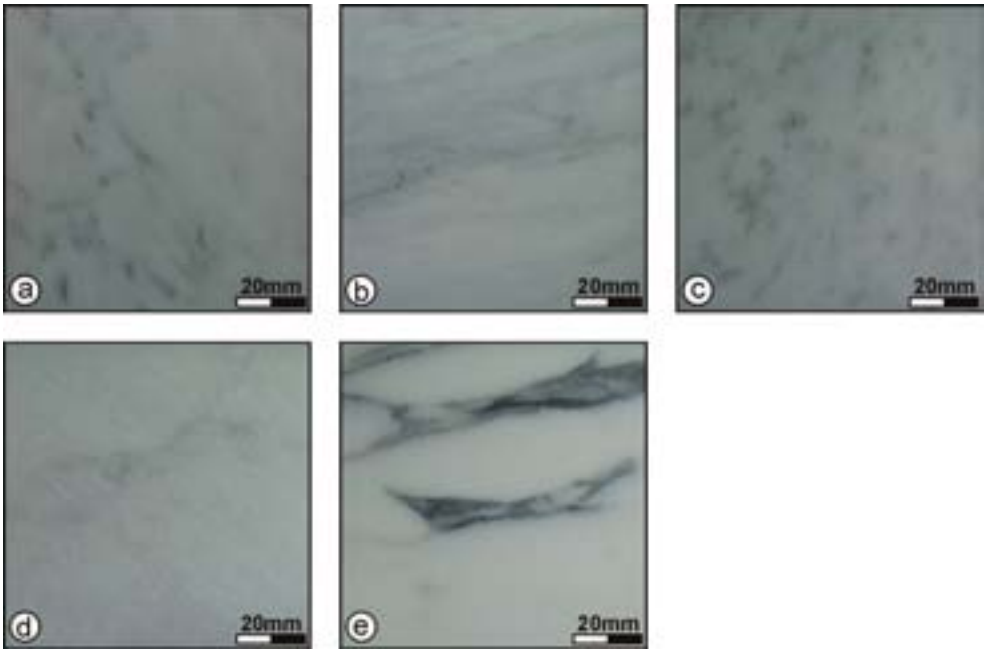


Abb. 5.7: Makroskopisches Erscheinungsbild unterschiedlicher Varietäten des Carrara Marmors: a) Carrara 2 (Arabescato Cervaiole), b) Carrara 3 (Bianco Tre Fiumi), c) Carrara 4 (Canaloni), d) Carrara 5 (Bianco Buca), e) Carrara 6 (Arabescato Corchia).

Die Proben Carrara 2 und Carrara 3 sind als kleine bruchfrische Blöcke aus der Abfallmasse zweier aktiver Steinbrüche entnommen worden. Carrara 4 bis 6 stammen aus

Blöcken der laufenden Produktion. Alle Proben weisen dunkel- bis mittelgraue Einlagerungen von Graphit auf, die als Schlieren, feine Bänder oder wolkig ausgeprägt sind. Die Proben Carrara 2 und vor allem Carrara 6 werden aufgrund ihrer flammenartigen, scharf begrenzten Musterung als „Arabescato“ (= flammenartig) bezeichnet. Eine Foliation ist bei den hier untersuchten Varietäten entweder nicht erkennbar oder nur unscharf ausgebildet (Carrara 6).

Ekeberg

Der Ekeberg Marmor (Abb. 5.8) hat seinen Ursprung in Südschweden E‘ von Orebro am NW‘ Ufer des Hjälmarensees. Es handelt sich hierbei um einen Dolomitmarmor, der von wolkenartigen Schlieren durchzogen ist, die dem Gestein eine leicht grünliche bis gelbliche Färbung verleihen. Die Probe stammt als Block aus der laufenden Produktion. Eine Foliation ist nicht zu identifizieren.

Abb. 5.8:

Makroskopisches Erscheinungsbild des Ekeberg Marmors.

5.2 Mikrogefüge

Die Auswahl der zwölf untersuchten Marmortypen stellt eine große Variationsbreite hinsichtlich verschiedener Gefügeelemente dar (Tab. 5.1). Die einzelnen Gefügeeigenschaften sind von Bedeutung, da sie Einfluss auf verwitterungssensible petrophysikalische Eigenschaften der Marmore haben und somit den Verwitterungsprozess stark beeinflussen können (z.B. Siegesmund et al. 2000a, Zeisig et al. 2002, Koch & Siegesmund 2002, 2004b).

Die mittlere Korngröße reicht vom feinkörnigen Bereich (Carrara Marmore) über kleinkörnige (Ruivina, Rosa Estremoz, Ekeberg) bis hin zu mittel- bis grobkörnigen Marmortypen (Peccia, Trigaches, Verde Viana). Das Korngefüge lässt sich hier in zwei Hauptgruppen zusammenfassen: dem equigranularen polygonalen oder granoblastischen Korngefügetypen, zu denen eigentlich nur die beiden Proben der Varietät Carrara 1 gerechnet werden können, und dem inequigranularen bis seriaten interlobaten Korngefügetypen, der alle anderen untersuchten Marmortypen umfasst. Letzterer tritt in unterschiedlicher Ausprägung auf und reicht in einem fließenden Übergang vom nahezu granoblastischen Korngefüge mit eher glatten Korngrenzen (Rosa Estremoz, Trigaches) bis hin zum heterogenen Korngefüge mit großen reliktischen Altkörnern und randlich umgebenden feinkörnigen Rekristallisaten (Carrara 2, Ekeberg).

Die Kornformregelung, welche mit der Korngrenzenregelung korrespondiert, hat neben der Textur Einfluss auf die Anisotropie zahlreicher gesteinsphysikalischer Eigenschaften (Siegesmund et al. 1999, Weiß et al. 1999, Zeisig et al. 2002, Rüdrich 2003, Koch & Siegesmund 2004b). Eine deutliche bis ausgeprägte Kornformregelung weisen die Proben Peccia, Ruivina, Rosa Estremoz und Carrara 6 auf, was hier eine Richtungsabhängigkeit der entsprechenden Eigenschaften erwarten lässt.

Die Intensität der Textur stellt einen wichtigen Einflussparameter insbesondere auf die Anisotropie der thermischen und elastischen Eigenschaften der Marmore dar (Weiß et al. 2002a, Zeisig et al. 2002). Hierbei zeigen die Carrara-Varietäten sowie der Trigaches und der Ekeberg Marmor relativ schwache bis moderate Intensitäten, wogegen die Marmore Peccia, Ruivina, Rosa Estremoz und Verde Viana ein ausgeprägtes c-Achsenmaximum besitzen. Ähnlichen Einfluss hat der Formfaktor, der die Geometrie der kristallographischen Vorzugsregelung zum Ausdruck bringt (vgl. Kap. 3.2.2).

Bezüglich der mineralogischen Zusammensetzung handelt es sich bei den untersuchten Gesteinen mit Ausnahme des Verde Viana (Ophicalcit) und des Ekeberg Marmors (Dolomitmarmor) um Calcitmarmore.

Peccia Marmor

Der Peccia Marmor ist ein mittel- bis grobkörniger Calcit-Marmor mit Gefügemerkmalen einer späten, kaltplastischen Deformationsphase. Quarz, Muskovit und Biotit sind als Nebengemengteile oder Akzessorien vorhanden.

Tabelle 5.1: Übersicht über die untersuchten Marmortypen und ihre wichtigsten Gefügemerkmale. mrd: multiples of random distribution (Vielfache der Gleichverteilung). -: keine, (+): leichte, +: deutliche, ++: ausgeprägte Korngrenzenregelung. cc: Calcit, oph: Ophicalcit, do: Dolomit. Spalte „Korngröße“: Obere Werte geben jeweils den Korngrößenbereich an, untere Werte in Klammern die mittlere Korngröße.

	Marmortyp				Mikrogefüge					
									Textur	
	Bezeichnung	Abk.	Makroskopische Foliation	Hauptkomponente	Korngröße [mm]	Korngefüge	Korngrenzengeometrie	Korngrenzenregelung	Intensität c-Achsenmax. [mrd]	Formfaktor
auf Richtungsabhängigkeiten eingehend untersuchte Proben	Peccia	PE	ja	cc	0,4 - 5 (2,35)	seriat - interlobat	buchtig; sonst glatt - geschwungen	+	2.7	-0.27
	Carrara 1a	C1a	nein	cc	0,1 - 0,5 (0,30)	equigranular-polygonal	glatt	(+)	1.3	0.17
	Carrara 1b	C1b	nein	cc	0,1 - 0,4 (~0,2)	equigranular-polygonal	glatt	-	1.2	0.44
	Ruivina	RU	ja	cc	0,15 - 0,60 (0,41)	seriat - interlobat	geschwungen - gezackt	++	3.0	-0.42
	Rosa Estremoz	RE	ja	cc	0,4 - 1 (0,64)	inequigranular - polygonal/interlobat	glatt - buchtig lokal verzahnt	++	2.9	-0.37
	Trigaches	TR	ja	cc	0,2 - 5 (~1)	seriat - interlobat	glatt - buchtig	(+)	1.6	0.41
	Verde Viana	VV	ja	oph	0,4 - 8 (1 - 2)	seriat - interlobat	geschwungen - buchtig	(+)	4.2	-0.73
	Carrara 2	C2	nein	cc	< 0,4 (~0,2)	inequigranular - interlobat	buchtig	-	1.3	-0.18
	Carrara 3	C3	nein	cc	< 0,3 (0,1 - 0,15)	seriat - interlobat	geschwungen - buchtig	-	2.3	-0.30
	Carrara 4	C4	nein	cc	< 0,3 (~0,15)	seriat - interlobat	buchtig - amöboid	-	1.4	-0.13
	Carrara 5	C5	nein	cc	< 0,6 (~0,2)	inequigranular - interlobat	buchtig; verzahnt	-	1.4	0.66
	Carrara 6	C6	ja	cc	< 0,6 (0,1 - 0,2)	seriat - interlobat	glatt - geschwungen	+	1.6	-0.45
	Ekeberg	EK	nein	do	< 2 (~0,4)	seriat - interlobat	geschwungen - buchtig	-	1.4	-0.05

Das Korngefüge zeichnet sich durch eine breite Korngrößenverteilung aus mit Korndurchmessern der Calcitkörner von 0,4-5 mm bei einer Durchschnittsgröße von 2,35 mm. Grobkörnige Domänen zeigen meist buchtige und nicht selten glatte bis geschwungene Korngrenzen (Abb. 5.9b). Kleinere Calcitkörner sind auch teilweise miteinander verzahnt. Vereinzelt auftretende Kornaggregate aus feinkörnigem Quarz und Biotit erreichen Durchmesser bis 2 mm (Abb. 5.9a). Akzessorisch auftretender Muskovit (0,2-0,5 mm) und Quarz (0,2 mm) kommen vereinzelt an Korngrenzen oder als Einschlüsse vor.

Die meisten Calcit-Kristalle sind polysynthetisch verzwillingt. Rekristallisationsgefüge treten häufig in Form von verbogenen Zwillingslamellen, Subkornbildung, Korngrenzenmigration („bulging“) und undulöser Auslöschung, welche vornehmlich in XZ- und YZ-Schnittlagen senkrecht zur Foliation ausgebildet ist, auf. Korngrenzen haben eine moderate Vorzugsorientierung parallel zur Foliation (XY-Ebene), was mit einer leicht oblaten Kornform der Calcitkörner einher geht.

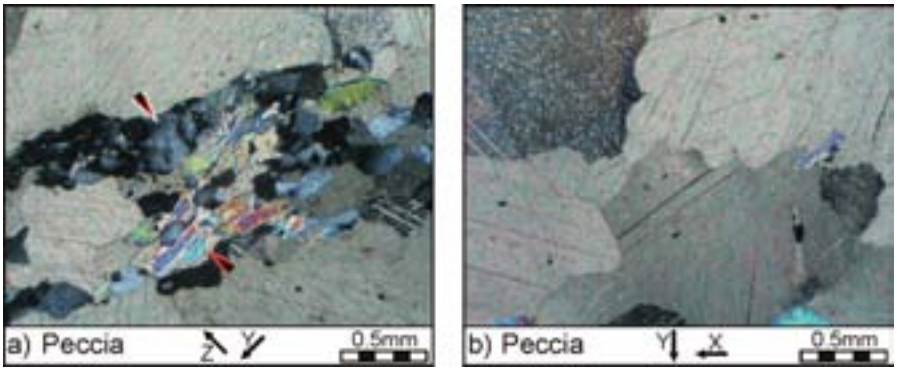


Abb. 5.9: Seriat-interlobates Korngefüge des Peccia Marmors (gekreuzte Polarisatoren). a) Feinkörnige Verwachsung von Quarz (Pfeil oben) und Biotit (Pfeil unten). Biotit ist (sub)parallel zur Foliation (XY-Ebene) orientiert. b) Buchtige Korngrenzengeometrie der Calcitkristalle.

Carrara 1a und 1b

Diese Varietät des Carrara Marmors ist ein fein- bzw. kleinkörniger Calcitmarmor und weist typische Merkmale einer statischen Rekristallisation auf, welche sich durch ein granoblastisches Korngefüge auszeichnet. Dunkelgraue Bereiche, die das Gestein netzartig in Lagen oder fleckenhaft durchziehen (vgl. Abb. 5.2), sind feinstkörnige Verwachsungen von Dolomit und Calcit.

Die Korngröße der Calcitkristalle von durchschnittlich 0,3 mm rangiert in einem engen Bereich zwischen 0,1 mm bis maximal 0,5 mm und ist somit als equigranular zu bezeichnen (Abb. 5.10a). Die Probe „Carrara 1b“ weist mit einem mittleren Durchmesser von etwa 0,2 mm etwas kleinere Körner auf. Gerade bis leicht geschwungene Korngrenzen mit 120° triple junctions („foam structure“) zeigen ein equilibriertes Korngefüge an, das einen Erholungsprozess durch Reduktion der Korngrenzenflächen („grain boundary area reduction“) durchlaufen hat (Abb. 5.10b). In mm- bis cm-Abständen treten fleckenhaft vereinzelt oder netzartig verbundene Aggregate aus

feinstkörnigen Verwachsungen von Dolomit und Calcit auf, die teilweise Durchmesser über 10 mm erreichen können.

Die Calcitkristalle zeigen keine undulöse Auslöschung und so gut wie keine Verzwillingungen. Die rundlichen bis länglichen Körner der Probe „Carrara 1a“ haben in XZ- und YZ-Schnittlagen eine leichte Vorzugsorientierung subparallel in Richtung Z, was auf eine leicht elliptische prolate Kornform schließen lässt. Die Calcitkörner der Probe „Carrara 1b“ zeigen keine Kornformregelung.

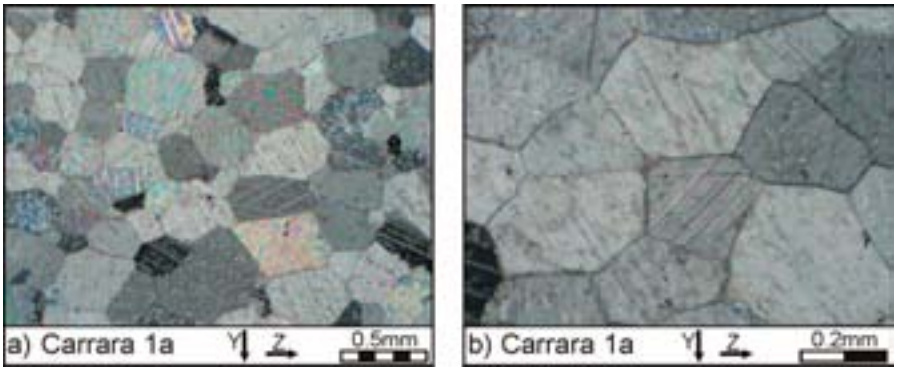


Abb. 5.10: Equigranular-polynonales (granoblastisches) Korngefüge der fein- bis kleinkörnigen Probe Carrara 1 (gekreuzte Polarisatoren). a) Übersicht. b) Gerade bis leicht geschwungene Korngrenzen mit typischen „120° triple junctions“.

Ruivina Marmor

Das Gestein ist ein fein- bis mittelkörniger Calcitmarmor, der akzessorisch neben Quarz auch Graphit enthält, welcher für die dunkelgraue Färbung verantwortlich ist. Der Kornverband weist Merkmale eines teilweise rekristallisierten Gefüges auf.

Der Marmor zeigt eine seriate Korngrößenverteilung mit Korndurchmessern zwischen 0,15 mm und 0,6 mm bei einer Durchschnittsgröße von etwa 0,4 mm (Abb. 5.11). In X-Richtung erreichen Calcitkörner Längen von bis zu über 3 mm, in Y-Richtung bis maximal 1,2 mm. Kleine wie große Körner zeigen irreguläre Korngrenzen, d.h. geschwungene bis gezackte Korngrenzen, die sehr selten auch glatt ausgebildet sind. Quarz tritt akzessorisch mit Korndurchmessern um 0,06 mm bevorzugt an Korngrenzen auf.

Das Gefüge weist typische Merkmale einer teilweise dynamischen Rekristallisation auf (Abb. 5.11a). Große Altkörner mit unregelmäßig gezackten Korngrenzen zeigen undulöse Auslöschung sowie Subkorngrenzen bis hin zur Bildung von Neukörnern durch Subkornrotation und Korngrenzenmigration (bulging). Die Calcitkörner sind häufig verzwillingt. Es sind ausschließlich gerade Zwillingslamellen zu beobachten. In Abständen von wenigen cm treten transgranulare versiegelte Risse auf (Abb. 5.11b), die in etwa parallel zur Foliationsebene (XY) verlaufen und eine Dicke bis 1 mm erreichen können. Sie sind mit sehr feinkörnigem bis dichtem Material (<0,02 mm), vermutlich Calcit und Quarz, verfüllt. Die einzelnen Risse verlaufen im Skalenbereich eines Dünnschliffes penetrativ durch das Gestein und dürften somit nicht unerheblich Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften des Gesteins ausüben.

Der Ruivina Marmor lässt eine ausgeprägte Vorzugsorientierung nach der Kornform erkennen (Abb. 5.11a,c). Sie ist in der XZ-Ebene am stärksten ausgeprägt, wo die Calcitkörner in X-Richtung mehr als doppelt so lang sind als in Z-Richtung. In der XY-Ebene sind die Körner ebenfalls in X-Richtung gelängt; in YZ-Schnitten sind die Körner bevorzugt in Y-Richtung orientiert. Daraus resultiert eine ellipsoide Kornform, deren Hauptachsenlängen im Verhältnis X > Y > Z zueinander stehen.

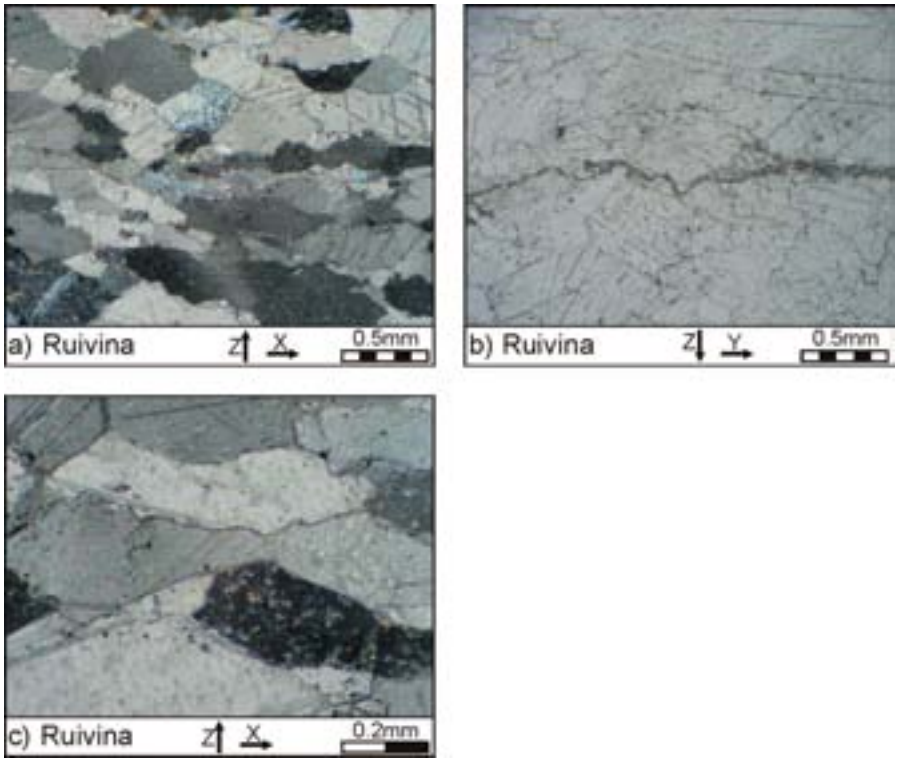


Abb. 5.11: Seriates interlobates Korngefüges des fein- bis kleinkörnigen Ruivina Marmors. a) Deutliche Vorzugsorientierung der länglichen Calcitkörner parallel zur X-Richtung sowie undulöse Auslöschung (Mitte unten) als Merkmale dynamischer Rekristallisation (gekreuzte Polarisatoren). b) Transgranularer Riss verfüllt mit feinstkörnigem Material verläuft parallel zur Foliationsebene (XY; Durchlicht). c) Überwiegend geschwungene Korngrenzengeometrien (gekreuzte Polarisatoren).

Rosa Estremoz Marmor

Der Rosa Estremoz Marmor ist ein fein- bis mittelkörniger Calcitmarmor, der Quarz, Hellglimmer und Hämatit als Akzessorien enthält. Letzterer ist für seine rosa Färbung verantwortlich. Das teilweise dynamisch rekristallisierte Gefüge ist dem des Ruivina Marmors ähnlich.

Die Korngrößen des Calcits weisen eine bimodale bis seriate Verteilung auf. Altkörner mit einer Durchschnittsgröße von etwa 1 mm erreichen Längen von bis zu 2 mm. Kleinere Körner sind etwa 0,4 mm bis selten unter 0,2 mm groß (Abb. 5.12a). Hämatit

ist in mm- bis cm-dicken Lagen oder Bändern angereichert. Er erscheint im Durchlicht hellbraun und tritt fast ausschließlich als länglicher Mineraleinschluss entlang von Zwillingslamellen mit durchschnittlich 0,1 mm Länge auf. Damit einhergehend sind in diesen Lagen feinstkörnige, opake Mineraleinschlüsse zu beobachten, die mit zur Färbung des Gesteins beitragen. Muskovit als weiteres akzessorisches Mineral tritt als Anhäufung einzelner Glimmerplättchen mit Längen um 1 mm entlang von Korngrenzen gebogen auf und ist etwa parallel zur Foliationsebene (XY) orientiert. Quarz ist als Einschluss oder entlang von Korngrenzen entweder vereinzelt oder fleckenweise gehäuft mit rundlicher Kornform und einer Größe von etwa 0,1 mm zu beobachten.

Die Calcitkristalle zeigen mit mittlerer Intensität undulöse Auslöschung. Diese ist im Zuge kaltplastischer Deformation oftmals über Kleinwinkelkorngrenzen und Subkörnern bis hin zu kleineren Neukörnern weiterentwickelt. Lokal verzahnte Korngrenzen und „bulging“ lassen Korngrenzenmigration-Rekristallisation als Mechanismus erkennen. Die Korngrenzen sind ansonsten meist glatt bis buchtig ausgeprägt (Abb. 5.12b). Das Gestein ist als Übergangstyp zu bezeichnen, da sowohl Merkmale statischer sowie dynamischer Rekristallisation ausgebildet sind. Nahezu alle Körner zeigen eine ausgeprägte Verzwillingung. Sie verlaufen gerade und vollständig durch die einzelnen Calcit-Kristalle und sind bisweilen zerfranst oder sich verjüngend ausgebildet. Leicht verbogene Lamellen sind kaum zu beobachten.

Der Rosa Estremoz Marmor hat eine ausgeprägte Kornform-Regelung (Abb. 5.12a). Die diskusförmig geplätteten Körner (oblate Kornform) sind in Schnitten quer zur Foliation länglich in der XY-Ebene eingeregelt und zeigen entsprechend in XY-Schliffen keine Vorzugsorientierung.

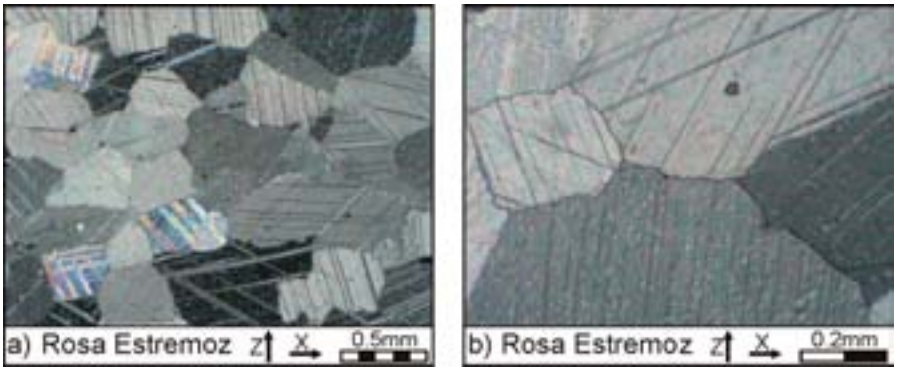


Abb. 5.12: Inequigranulares polygonales bis interlobates Korngefüge des fein- bis mittelkörnigen Rosa Estremoz Marmors (gekreuzte Polarisatoren). a) Ausgeprägte Verzwillingung sowie deutliche Vorzugsorientierung der länglichen Calcitkörner parallel zur X-Richtung. b) Gerade bis geschwungene Korngrenzengeometrien.

Trigaches Marmor

Der Trigaches Marmor ist ein mittel- bis grobkörniger Calcitmarmor. Als akzessorische Mineralphase ist fein verteilter Graphit für die graue Färbung des Gesteins verantwortlich. Es dominieren Merkmale einer statischen Rekristallisation.

Das seriate Korngefüge besteht zum einen aus einer Matrix meist rundlicher Calcitkörner mit einer durchschnittlichen Korngröße um 1 mm, in der einzelne Individuen auch 0,2 mm und kleiner sein können (Abb. 5.13a). Dazwischen erreichen einzelne Calcitkristalle eine Größe von 5 mm und darüber. In grobkörnigen Domänen, die makroskopisch weiß erscheinen, kann die Größe 10 mm überschreiten. Die Korngrenzen sind teilweise gerade, teilweise schwach konkav oder konvex geschwungen bis buchtig (Abb. 5.13c). Nur vereinzelt sind „bulging" oder verzahnte Korngrenzen zu beobachten. Graphit in Form von meist länglichen hypidiomorphen opaken Kristallen mit etwa 0,05 mm Länge konzentriert sich auf die Korngrenzen von fein- bis kleinkörnigen Calcitkristallen und ist in geringerem Umfang als Einschluss vorhanden (Abb. 5.13b).

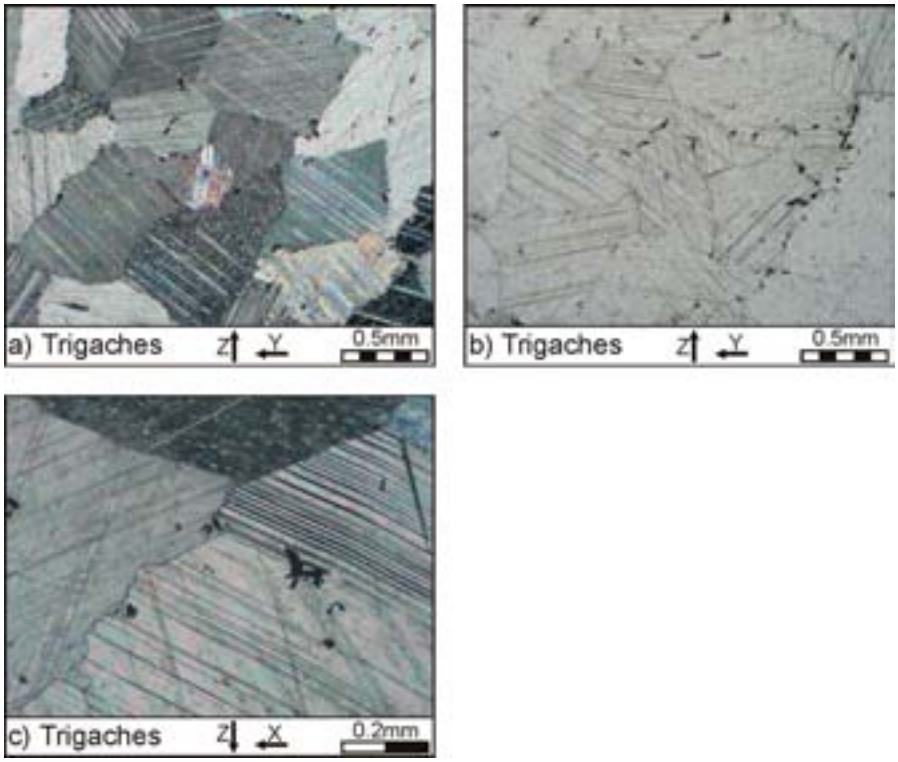


Abb. 5.13: Seriates interlobates Korngefüge des mittel- bis grobkörnigen Trigaches Marmors. a) Übersicht über einen gleichkörnigen Ausschnitt mit häufiger Zwillingsbildung (gekreuzte Polarisatoren). b) Bevorzugt entlang von Korngrenzen auftretender Graphit (opake Mineralphase rechte Bildhälfte; Durchlicht). c) Gerade bis buchtige Korngrenzen (gekreuzte Polarisatoren).

Undulöse Auslöschung ist nur schwach ausgebildet und tritt vornehmlich bei Körnern im mittleren Korngrößenspektrum auf. Zwillinge treten häufig in Erscheinung und zeigen eng-ständige, gerade und durchlaufende Lamellen. Nur vereinzelt sind Zwillingslamellen verbogen. Ebenso vereinzelt ist Korngrenzenmigration-Rekristallisation durch Sub- und Neukornbildung zu beobachten. Zusammen mit den überwiegend glatten bis geschwungenen Korngrenzen deuten diese Merkmale darauf hin, dass das Gefüge dominierend vom Prozess der statischen Rekristallisation geprägt ist, bei

welchem Calcit unter Glättung der Korngrenzen wächst und kleine Körner verschwinden. Eine Kornformregelung ist nur schwach in YZ-Schnittlagen subparallel zur Y-Richtung erkennbar.

Verde Viana Marmor

Der klein- bis grobkörnige Ophicalcit mit einem breiten Korngrößenspektrum zeigt ein inhomogenes Korngefüge. Als Nebengemengteile treten Quarz und Diopsid auf. Es überwiegen Merkmale eines teilweise dynamisch rekristallisierten Gefüges.

Der Verde Viana Marmor zeigt eine bi- bis polymodale Korngrößenverteilung (Abb. 5.14a). In den feinerkörnigen Bereichen dominieren meist längliche Calcitkristalle mit einer Korngröße von etwa 0,4 mm bis 1 mm. Gröberkörnige Bereiche weisen Korndurchmesser von 1 mm bis 8 mm auf. Diopsid mit einem Volumenanteil von einigen Prozent zeigt Korngrößen zwischen 0,05 mm und 0,3 mm. Er tritt meist einzeln oder auch in kleinen Anhäufungen entlang von Korngrenzen auf oder ist als Einschluss anzutreffen (Abb. 5.14a). Quarz ist im etwa gleichen Anteil etwas feinkörniger und bevorzugt in Anhäufungen entlang von Korngrenzen der Calcitkristalle zu beobachten (Abb. 5.14a).

Die Korngrenzen der Calcitkristalle sind meist leicht geschwungen bis buchtig (Abb. 5.14b). Korngrenzenmigration in Form von bulging ist häufig zu beobachten. Zwillinge sind eher selten. Als kaltplastisches Verformungsmerkmal ist undulöse Auslöschung oftmals ausgebildet. Darüber hinaus sind gelegentlich Deformationsbänder sowie Sub- und Neukörner zu beobachten, die dynamische Rekristallisation als gefügebildenden Prozess anzeigen. Calitkristalle enthalten häufig Bahnen aus feinsten Fluid-Einschlüssen. Insbesondere die klein- bis mittelkörnigen Bereiche zeigen eine leichte Kornformregelung parallel zur Foliation (XY-Ebene), welche in XZ- und YZ-Schnittlagen sichtbar ist.

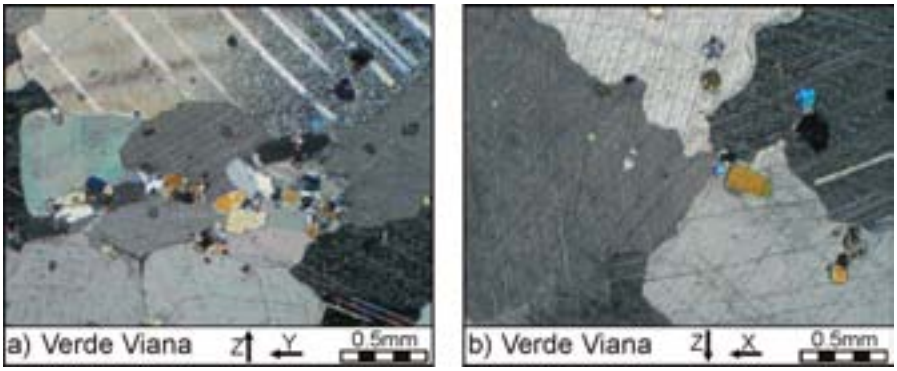


Abb. 5.14: Seriates interlobates Korngefüge des klein- bis grobkörnigen Verde Viana Marmors (gekreuzte Polarisatoren). a) Anhäufung von feinkörnigem Diopsid und Quarz bevorzugt entlang von Korngrenzen der gröberkörnigen Calcitkristalle. b) Geschwungene bis buchtige Korngrenzengeometrien.

Carrara 2 (Arabescato Cervaiole)

Die Probe Carrara 2 ist ein fein- bis kleinkörniger Calcitmarmor mit einem teilweise dynamisch rekristallisierten Korngefüge.

Das Korngefüge zeigt eine inequigranulare Korngrößenverteilung mit einer durchschnittlichen Korngröße von etwa 0,2 mm bis maximal 0,5 mm (Abb. 5.15a). Größere Körner sind randlich mit sehr feinkörnigen Rekristallisaten dekoriert und weisen überwiegend buchtige Korngrenzen auf (Abb. 5.15b).

Sie löschen zum Teil undulös aus. Sub- und Neukornbildung sowie bulging sind als weitere Rekristallisationsmerkmale zu beobachten und sind für die typisch bimodale Korngrößenverteilung eines teilweise dynamisch rekristallisierten Gefüges verantwortlich. Ein Teil der Körner zeigt Zwillingslamellen, die größtenteils breit ausgebildet sind. Die Körner haben keine bevorzugte Orientierung nach der Kornform.

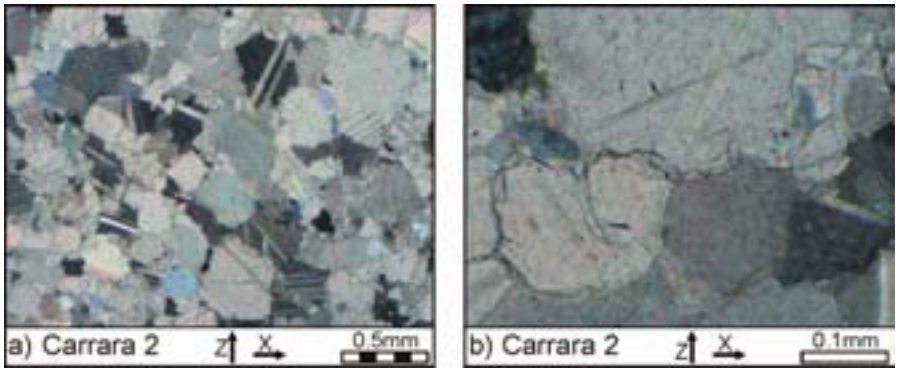


Abb. 5.15: Inequigranulares interlobates Korngefüge der fein- bis kleinkörnigen Probe Carrara 2 (gekreuzte Polarisatoren). a) Große Calcitkörner mit randlich feinkörnigen Rekristallisaten. b) Buchtige Korngrenzengeometrien.

Carrara 3 (Bianco Tre Fiumi)

Bei der Probe Carrara 3 handelt es sich um eine feinkörnige Varietät des Carrara-Marmors mit überwiegend Merkmalen einer statischen Rekristallisation.

Die Calcitkristalle weisen mit Durchschnittskorngrößen zwischen 0,1 und 0,15 mm und Maximaldurchmessern bis 0,3 mm eine nur leicht seriate Korngrößenverteilung auf, die einem equigranularen Korngefüge nahe ist (Abb. 5.16a). Die Korngrenzen sind überwiegend geschwungen und bisweilen auch glatt oder buchtig herausgebildet (Abb. 5.16b). Das Korngefüge weist im Vergleich zu den ausgeprägt seriat-interlobaten Typen deutliche Merkmale von statischen Erholungsprozessen durch Kornwachstum unter Glättung der Korngrenzen auf („grain boundary area reduction“).

In diese Beobachtung passt, dass bei auffallend wenigen Körnern undulöse Auslöschung festzustellen ist. Des Weiteren sind Sub- und Neukornbildungen weniger häufig herausgebildet als beispielsweise bei der ebenfalls ungleichkörnigen interlobaten

Probe Carrara 2. Zwillinge treten selten auf. Eine Vorzugsorientierung der größtenteils rundlichen Körner ist nicht gegeben.

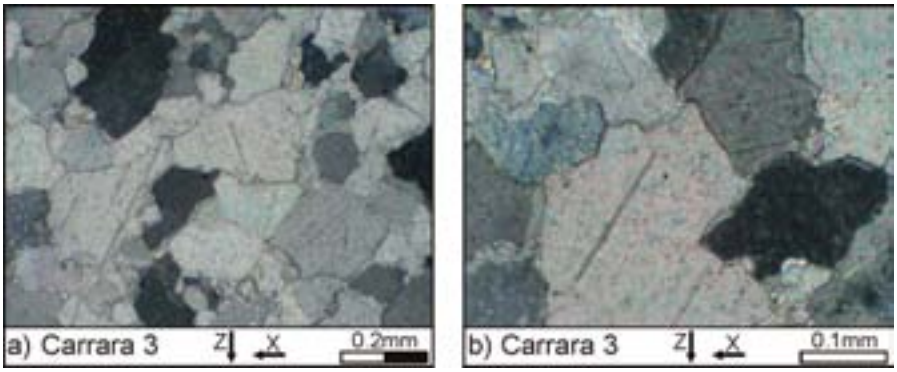


Abb. 5.16: Seriates interlobates Korngefüge der feinkörnigen Probe Carrara 3 (gekreuzte Polarisatoren). a) Übersicht. b) Geschwungene bis buchtige Korngrenzen.

Carrara 4 (Canaloni)

Der Carrara Marmor aus der Gegend um Canaloni ist feinkörnig und zeigt Merkmale kaltplastischer Verformung, die auf eine teilweise dynamische Rekristallisation hindeuten.

Die Calcitkörner sind durchschnittlich 0,15 mm bis maximal 0,3 mm groß und zeigen eine tendenziell seriate Korngrößenverteilung (Abb. 5.17a). Die Korngrenzen sind buchtig bis amöboid verzahnt (Abb. 5.17b). Zwischen den meist rundlichen Körnern sind oftmals feinstkörnige Aggregate zu beobachten, bei denen es sich vermutlich um Verwachsungen von Calcit, Dolomit und Graphit handelt.

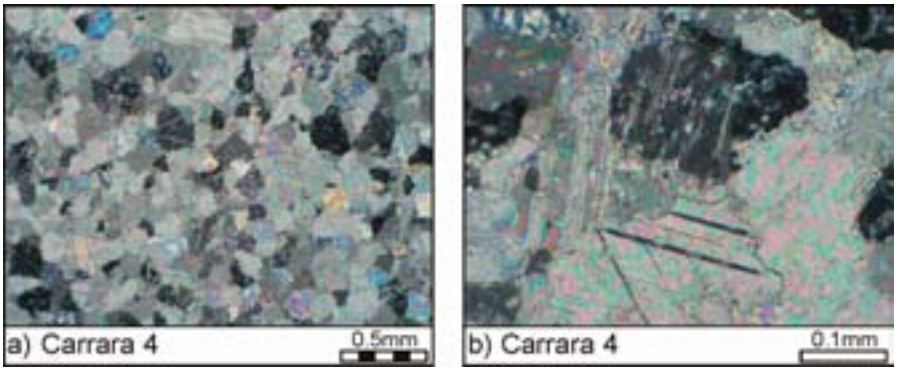


Abb. 5.17: Seriates interlobates Korngefüge der feinkörnigen Probe Carrara 4 (gekreuzte Polarisatoren). a) Übersicht. b) Buchtige bis verzahnte Korngrenzengeometrien.

Undulöse Auslöschung tritt häufig in Erscheinung. Korngrenzenmigration ist vorherrschender Mechanismus der Rekristallisation. Polysynthetische Zwillinge verlaufen durchgehend gerade durch die Calcitkristalle. Sie sind eher breit und zum Teil sich

verjüngend oder verbogen ausgebildet. Fluideinschlüsse im Calcit sind zahlreich. Die Körner zeigen keine Kornformregelung.

Carrara 5 (Bianco Buca)

Die Probe Carrara 5 ist ein fein- bis kleinkörniger Calcitmarmor mit schwach ausgeprägten Merkmalen einer dynamischen Rekristallisation.

Die rundlichen Calcitkörner zeigen mit einer durchschnittlichen Korngröße von 0,2 mm, die bis 0,6 mm reicht, eine inequigranulare bis seriate Korngrößenverteilung (Abb. 5.18a). Teilweise sind größere Altkörner von einer Matrix aus rekristallisierten Altkörnern umgeben. Die Korngrenzen sind überwiegend buchtig (Abb. 5.18b) und zum Teil verzahnt.

Ein Teil der Körner hat schmale Zwillingslamellen ausgebildet, die oftmals spitz zulaufen und vereinzelt verbogen sind. Als weiteres Merkmal intrakristalliner Deformation tritt undulöse Auslöschung häufig auf. Eine Kornformregelung ist nicht vorhanden.

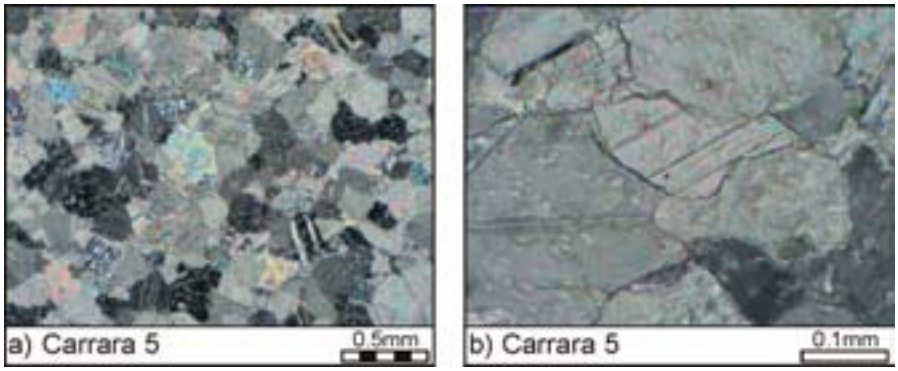


Abb. 5.18: Inequigranulares interlobates Korngefüge der fein- bis kleinkörnigen Probe Carrara 5 (gekreuzte Polarisatoren). a) Übersicht. b) Bereich mit überwiegend buchtigen Korngrenzengeometrien.

Carrara 6 (Arabescato Corchia)

Diese feinkörnige Variante des Carrara Marmors enthält als Nebengemengteile Feldspat, Muskovit und Graphit. Sie zeichnet sich durch eine deutliche Präsenz kaltplastischer Verformungsmerkmale aus.

Das Gestein hat ein seriates Korngefüge mit einer durchschnittlichen Größe der meist länglichen Calcitkörner von 0,1 mm bis 0,2 mm (Abb. 5.19a). Reliktische Altkörner können eine Länge bis 0,6 mm erreichen. Das Korngefüge lässt sich in zwei Bereiche unterteilen (Abb. 5.19a), die sich makroskopisch in den Farben weiß und dunkelgrau unterscheiden (vgl. Abb. 5.7e). Feldspat (Abb. 5.19b) kommt in beiden Bereichen als Nebengemengteil vor und ist unregelmäßig verteilt. Er ist im Durchschnitt etwas größer als Calcit ausgebildet, erreicht im Maximum aber nur 0,4 mm Länge. Längliche Muskovitplättchen sind nur in dunklen Lagen anzutreffen (Abb. 5.19b). Sie erscheinen gewellt mit zahlreichen opaken Einschlüssen und erreichen eine Länge bis zu 20 mm.

Graphit dürfte maßgeblich für die Dunkelfärbung verantwortlich sein und erreicht nicht selten über 0,2 mm Durchmesser (Abb. 5.19b). Die dunklen Bereiche bestehen substanziell aus langgestrecketen Aggregaten feinstkörniger Verwachsungen von Calcit und Graphit, die sich miteinander verzweigen oder ganze Lagen bilden.

Calcit hat meist glatte bis geschwungene, bisweilen auch buchtige Korngrenzen (Abb. 5.19c). Er zeichnet sich durch eine stark ausgeprägte undulöse Auslöschung aus. Polysynthetische Zwillinge im Calcit verlaufen gerade und weitständig. Sie sind mitunter breit ausgebildet und zum Teil stark verbogen. Schmale Lamellen sind an den Enden spitz zulaufend. Calcit, Muskovit und die langgestreckten Aggregate zeigen eine deutliche Vorzugsorientierung und markieren die Foliation.

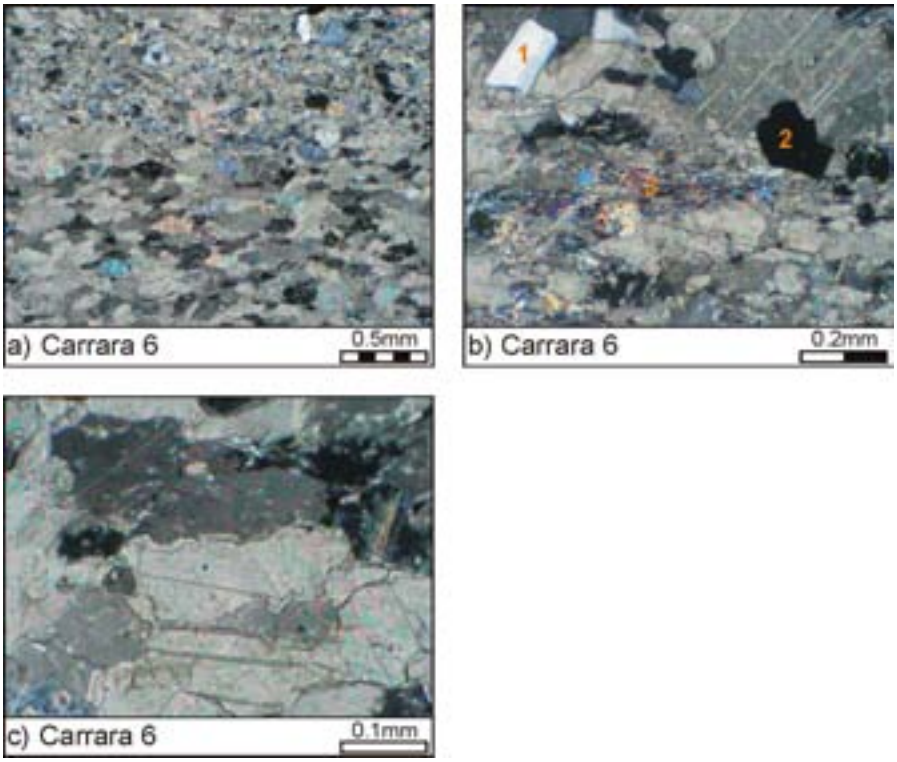


Abb. 5.19: Seriates interlobates Korngefüge der feinkörnigen Probe Carrara 6 (gekreuzte Polarisatoren). a) Untere Bildhälfte mit makroskopisch weiß erscheinendem Bereich aus Calcit, obere Bildhälfte mit feinstkörnigen Verwachsungen aus Calcit und Graphit mit einzelnen Feldspäten. b) Ausschnitt aus dunklem Bereich mit Feldspat (1), Graphit (2) und Muskovit (3). c) Geschwungene bis buchtige Korngrenzengeometrien.

Ekeberg Marmor

Es handelt sich um einen kleinkörnigen Dolomitmarmor mit seriater Korngrößenverteilung (Abb. 5.20a). Es treten Phlogopit und Tremolit als Nebengemengteile auf. Das Gestein zeigt Merkmale einer Korngrenzenmigration-Rekristallisation.

Die Korngröße beträgt durchschnittlich etwa 0,4 mm, wobei einzelne Körner eine Länge bis zu 2 mm erreichen können. Die Korngrenzen sind überwiegend geschwungen bis buchtig und nur teilweise verzahnt (Abb. 5.20b). Punktuell sind mm-große Muskovitstapel zu beobachten, die keine Vorzugsorientierung aufweisen und teilweise mit Chlorit verwachsen sind.

Im Calcit ist keinerlei undulöse Auslöschung erkennbar. Es sind zahlreich Indikatoren einer Korngrenzenmigration während dynamischer Rekristallisation sichtbar wie zum Beispiel „bulging“ oder „left-over grains“ (Jessell 1987). Zwillingslamellen sind breit, engständig und zerfranst ausgebildet. Die tendenziell rundlichen Körner zeigen keine bevorzugte Orientierung.

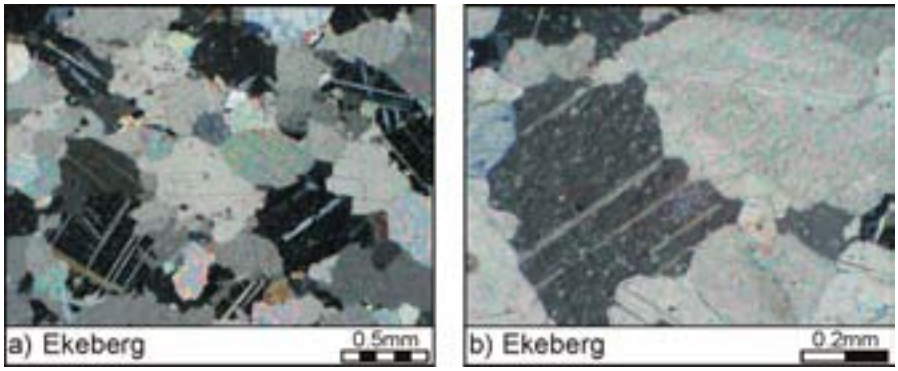


Abb. 5.20: Seriates interlobates Korngefüge des kleinkörnigen Ekeberg Marmors (gekreuzte Polarisatoren). a) Übersicht. b) Überwiegend buchtige Korngrenzengeometrien.

5.2.1 Korngrenzenorientierung an ausgewählten Beispielen

Die vier erstgenannten Marmortypen Peccia, Carrara 1, Ruivina und Rosa Estremoz eignen sich im besonderen Maße, den gefügeabhängigen Einfluss auf verwitterungsrelevante petrophysikalische Eigenschaften aufzuzeigen. Um diese Beziehung in den nachfolgenden Kapiteln darzulegen, soll an den vier Marmoren exemplarisch das Korngefüge als wichtiger Gefügeparameter vergleichend dargestellt (Abb. 5.21) und die Vorzugsorientierung der Korngrenzen quantifiziert werden (Abb. 5.22).

Hinsichtlich des Korngefüges sind sich die Marmore Ruivina und Rosa Estremoz relativ ähnlich (Abb. 5.21c,d), wobei der Ruivina Marmor feinkörniger ist und tendenziell stärker verzahnte Korngrenzen hat. Der Peccia Marmor zeigt ebenfalls ein seriat-interlobates Korngefüge, ist jedoch wesentlich grobkörniger (Abb. 5.21a). Dagegen unterscheidet sich die Probe Carrara 1a mit den vergleichsweise kleinsten Korndurchmessern als einziger Marmor mit granoblastischem Korngefüge wesentlich von den anderen drei (Abb. 5.21b). Glatte Korngrenzen wirken sich auf die Kohäsion des Kornverbandes ungünstig aus, was entsprechenden Einfluss auf die Schädigungsresistenz dieser Probe erwarten lässt.

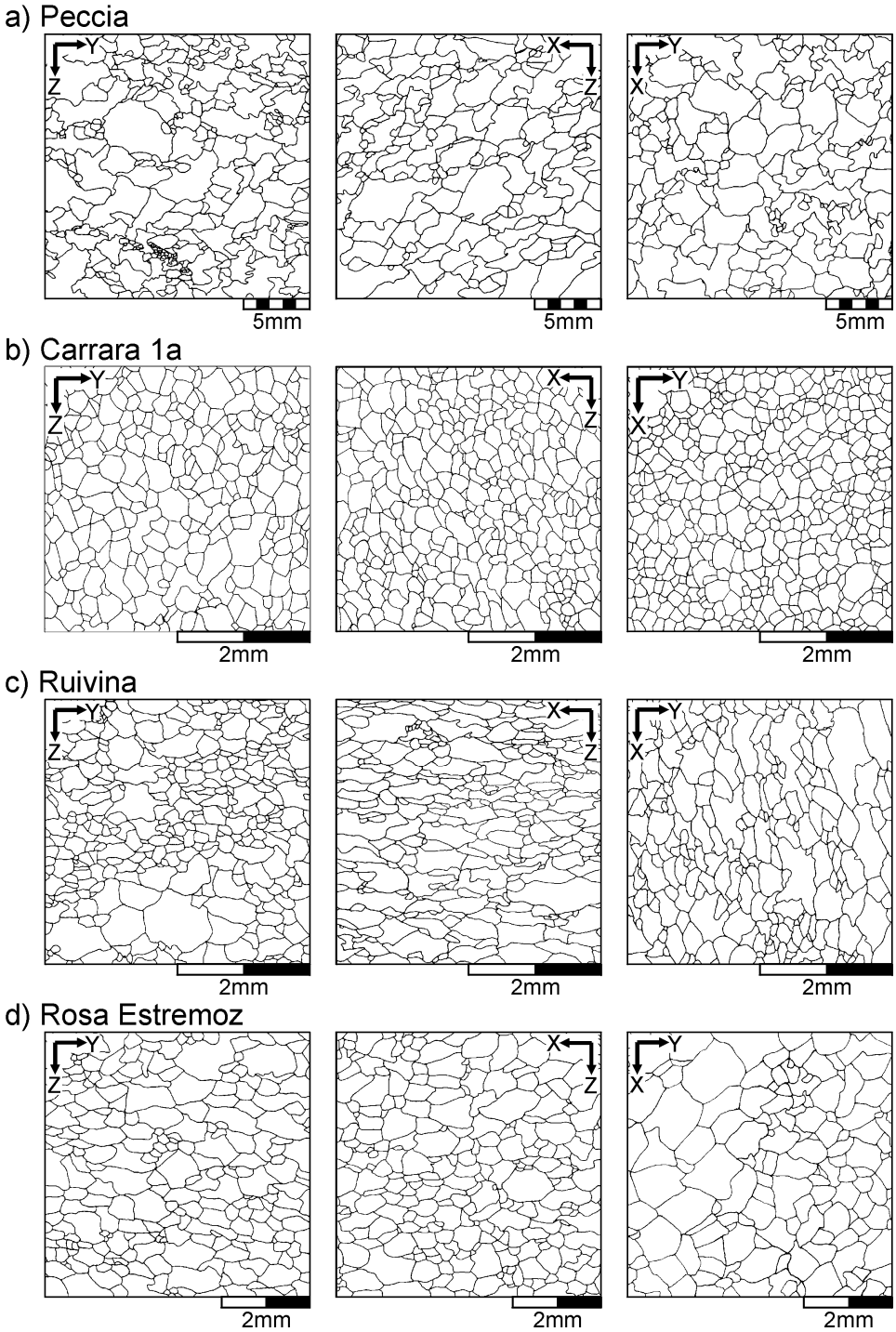


Abb. 5.21: Korngefüge in jeweils drei orthogonalen Schnittlagen der Marmore a) Peccia, b) Carrara 1a, c) Ruivina und d) Rosa Estremoz.

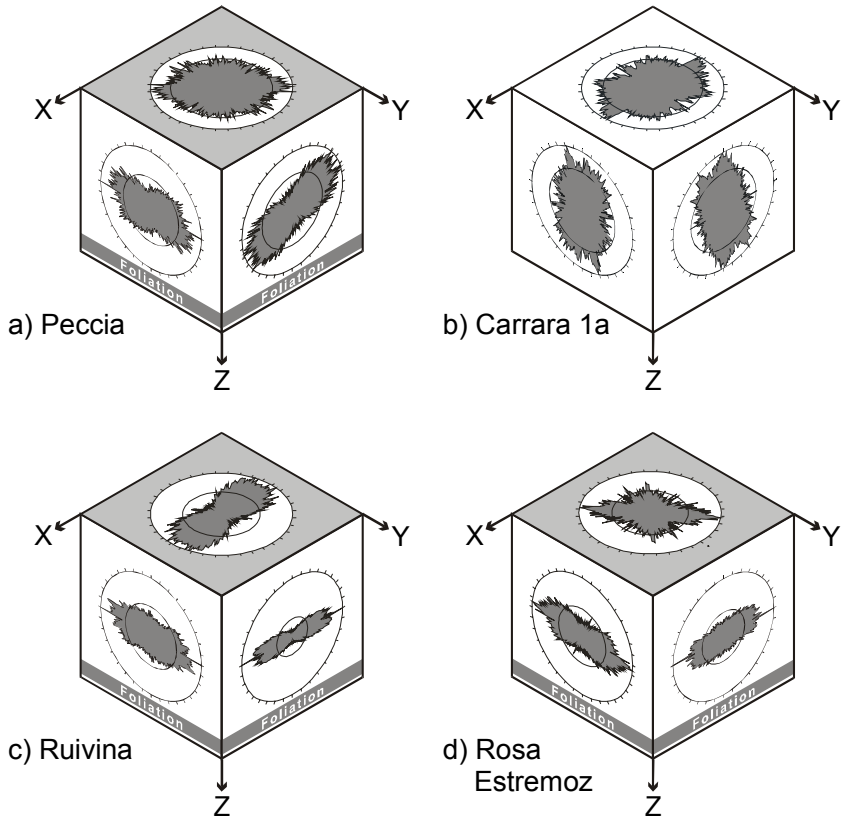


Abb. 5.22: Statistische Verteilung der Korngrenzenorientierung in jeweils drei orthogonalen Schnittlagen der Marmore a) Peccia, b) Carrara 1a, c) Ruivina und d) Rosa Estremoz. Die Innenkreise markieren die Gleichverteilung.

Alle vier Marmore weisen eine Korngrenzenregelung auf (Abb. 5.22). Während die Probe Carrara 1a als einziger Marmor keine Foliation und nur eine schwache Korn-Vorzugsorientierung parallel zur Z-Richtung zeigt, sind die Korngrenzen der anderen drei Proben jeweils sehr deutlich parallel zur Foliationsebene (XY) orientiert. Dabei sind der Peccia sowie der Rosa Estremoz Marmor durch eine oblate Kornform charakterisiert (Abb. 5.21a,d und 5.22a,d). Der Rosa Estremoz Marmor unterscheidet sich jedoch im stärkeren Regelungsgrad, der kleineren Korngröße und dem stärker equilibrierten Korngefüge mit glatteren Korngrenzen. Im Vergleich dazu zeigt der Ruivina Marmor die stärkste Korngrenzenregelung (Abb. 5.22c). Er ist durch eine ellipsoide prolate Kornform mit starker Längung in X-Richtung gekennzeichnet. Die Probe Carrara 1a weist ebenfalls eine elliptische Kornform auf, die jedoch nur leicht in Z-Richtung gelängt ist (Abb. 5.22b).

5.2.2 Korngrößenverteilung an ausgewählten Beispielen

In der Literatur wird vielfach die Bedeutung der Korngröße eines Marmors für seine Materialeigenschaften und sein Verwitterungsverhalten hervor gehoben (vgl. Kap. 2.2). Die Korngröße bzw. Korngrößenverteilung eines Marmors ist insofern von Bedeutung, als sie die Häufigkeit von Korngrenzen und somit von mechanischen Schwachstellen bedingt, die das Schädigungspotenzial heraufsetzen können.

Im Vergleich der vier ausgewählten Beispiele Peccia, Carrara 1a, Ruivina und Rosa Estremoz Marmor (Abb. 5.23) rangiert das Häufigkeitsmaximum der Korngröße zwischen dem feinkörnigen (Carrara 1a) und dem mittelkörnigen Bereich (Peccia). Analog dazu unterscheiden sich die mittleren Korngrößen. Während Carrara 1a mit 0,30 mm den kleinsten mittleren Korndurchmesser aufweist, liegt dieser beim Peccia Marmor mit 2,35 mm eine Größenordnung darüber. Der Ruivina Marmor ist mit durchschnittlich 0,41 mm Korndurchmesser ähnlich feinkörnig wie der Carrara 1a Marmor, zeigt jedoch im Gegensatz zu dessen equigranularem Korngefüge eine breitere, nämlich seriate Korngrößenverteilung. Etwas grobkörniger ist der Rosa Estremoz Marmor mit 0,64 mm mittlerem Korndurchmesser; die Breite seines Korngrößenspektrums rangiert zwischen der des Carrara 1a und des Ruivina Marmors.

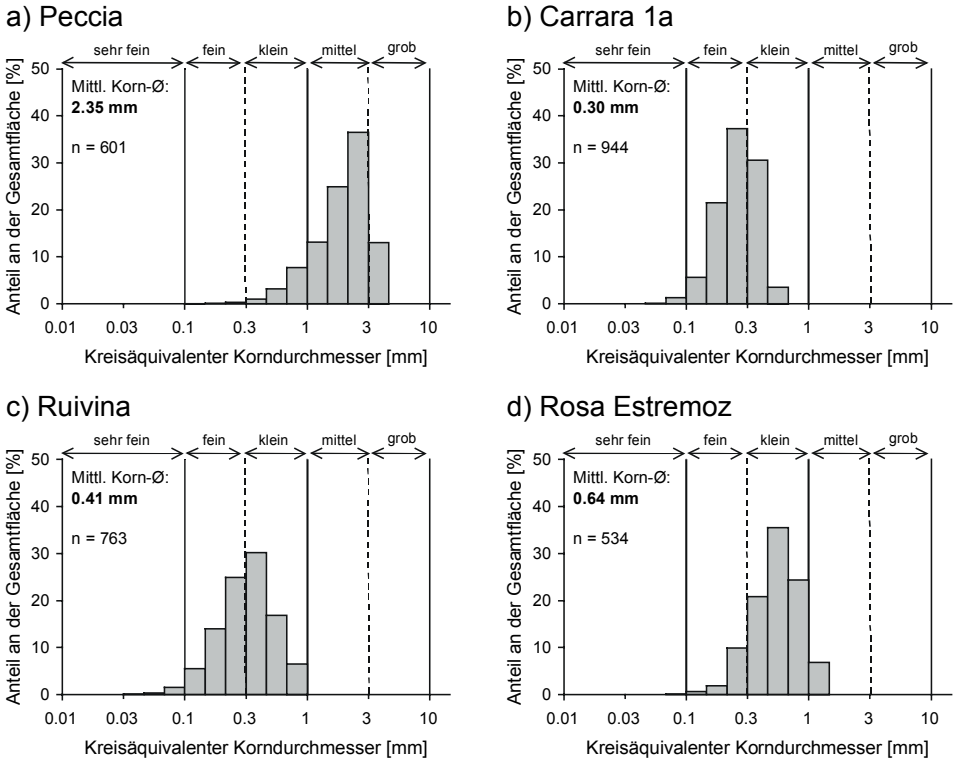


Abb. 5.23: Korngrößenverteilung der Marmore a) Peccia, b) Carrara 1a, c) Ruivina und d) Rosa Estremoz. Die Korndurchmesser sind im logarithmischen Maßstab aufgetragen. Die Korngrößenbezeichnung „sehr fein“ bis „grob“ erfolgte nach Wimmenauer 1985 (vgl. Tab. 2.1).

Die drei feinerkörnigen Proben weisen in der logarithmischen Korngrößenskala eine annähernd symmetrische Korngrößenverteilung auf (Abb. 5.23b-d), wogegen der Peccia Marmor durch eine rechtssteile Verteilungsform gekennzeichnet ist, das heißt das Häufigkeitsmaximum der Korngröße liegt über dem mittleren Korndurchmesser und damit im Histogramm rechts von diesem (Abb. 5.23a).

5.2.3 Textur

Die Textur der Calcitkristalle eines Marmors hat maßgeblichen Einfluss auf die Intensität und Richtungsabhängigkeit petrophysikalischer Eigenschaften wie z.B. die thermische Dehnung oder die Kompressionswellengeschwindigkeit (Leiss & Ullemeyer 1999) sowie indirekt auch auf Schädigungsprozesse. Daher ist es notwendig, die Textur zu quantifizieren und ihr räumliches Verteilungsmuster zu charakterisieren. In erster Linie dient dazu die räumliche Beschreibung der kristallographischen c- und a-Achsen, weil sie zum einen die beiden Extrema anisotroper physikalischer Eigenschaften markieren (vgl. Kap. 2.1.2) und sich zum anderen die Position aller anderen Kristallflächenpole (e {018}, r {104} und f {012}) an ihnen orientiert.

Peccia: Die Textur stellt einen c-Achsenfasertypen dar, dessen relativ starkes Maximum (2,7 mrd) senkrecht zur Foliationsebene orientiert und leicht in der YZ-Ebene ausgelängt ist (Abb. 5.24a). Aus der zu den c-Achsen orthogonalen Orientierung der a-Achsen ergibt sich ein a-Achsenmaximum in X-Richtung.

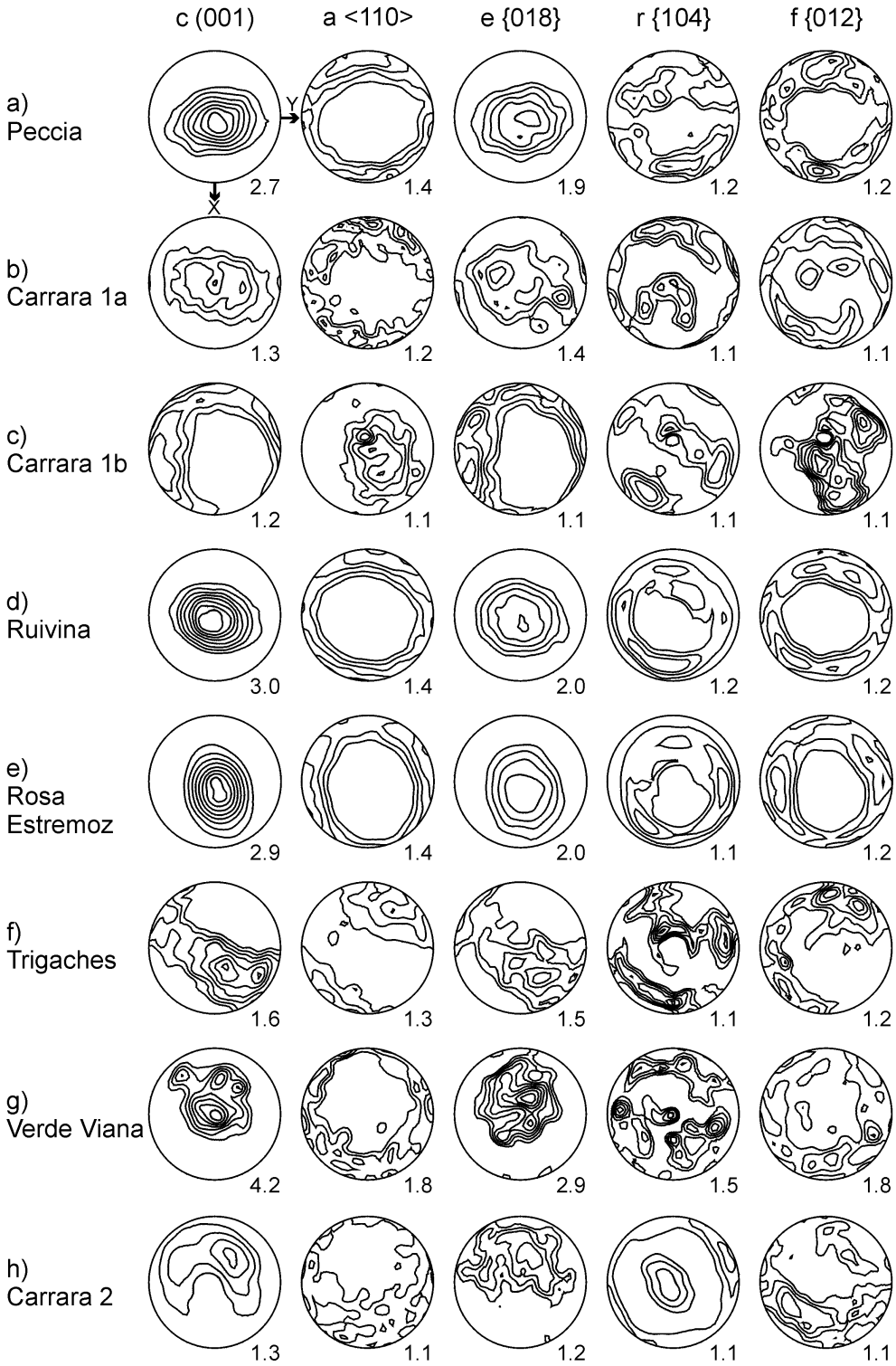
Carrara 1a: Die Textur repräsentiert einen intermediären Fasertypen und ist relativ schwach ausgebildet (Abb. 5.24b). Das c-Achsenmaximum (1,3 mrd) ist in der YZ-Ebene ausgelängt, woraus ein schwaches Submaximum der a-Achsen in X-Richtung resultiert.

Carrara 1b: Stellt einen a-Achsenfasertyp dar mit entsprechend gürtelartiger c-Achsenverteilung, dessen c-Achsenmaximum mit 1,2 mrd nur schwach ausgebildet ist (Abb. 5.24c).

Ruivina: Die Textur (Abb. 5.24d) korrespondiert mit der Kornform in einer Weise, dass die Kornlangachsen parallel zu den kristallographischen a-Achsen [110] (= X-Richtung) und die Kornkurzachsen (Richtung der kurzen Hauptachse der Kornellipsoide) parallel zu den c-Achsen [001] bevorzugt orientiert sind (vgl. Abb. 5.21c und 5.22c). Die Probe zeigt entsprechend mit einem c-Achsenmaximum in Z-Richtung von 3,0 mrd eine relativ starke Intensität der Textur.

Rosa Estremoz: Die kristallographische Vorzugsorientierung ist mit einem c-Achsenmaximum in Z-Richtung von 2,9 mrd ebenfalls stark ausgeprägt, wobei das Punktmaximum in der XZ-Ebene ausgelängt ist (Abb. 5.24e). Damit verbunden ist ein a-Achsen-Submaximum in Y-Richtung ausgebildet.

Trigaches: Ist durch einen a-Achsenfasertypen gekennzeichnet, der ein a-Achsen-Punktmaximum im spitzen Winkel zur X-Richtung aufweist (Abb. 5.24f). Die Intensität des c-Achsenmaximums ist mit 1,6 mrd mittelstark ausgeprägt.


c (001)
a <110>
e {018}
r {104}
f {012}
a)
Peccia
2.7
1.4
1.9
1.2
1.2
Y
X
b)
Carrara 1a
1.3
1.2
1.4
1.1
1.1
c)
Carrara 1b
1.2
1.1
1.1
1.1
1.1
d)
Ruivina
3.0
1.4
2.0
1.2
1.2
e)
Rosa
Estremoz
2.9
1.4
2.0
1.1
1.2
f)
Trigaches
1.6
1.3
1.5
1.1
1.2
g)
Verde Viana
4.2
1.8
2.9
1.5
1.8
h)
Carrara 2
1.3
1.1
1.2
1.1
1.1

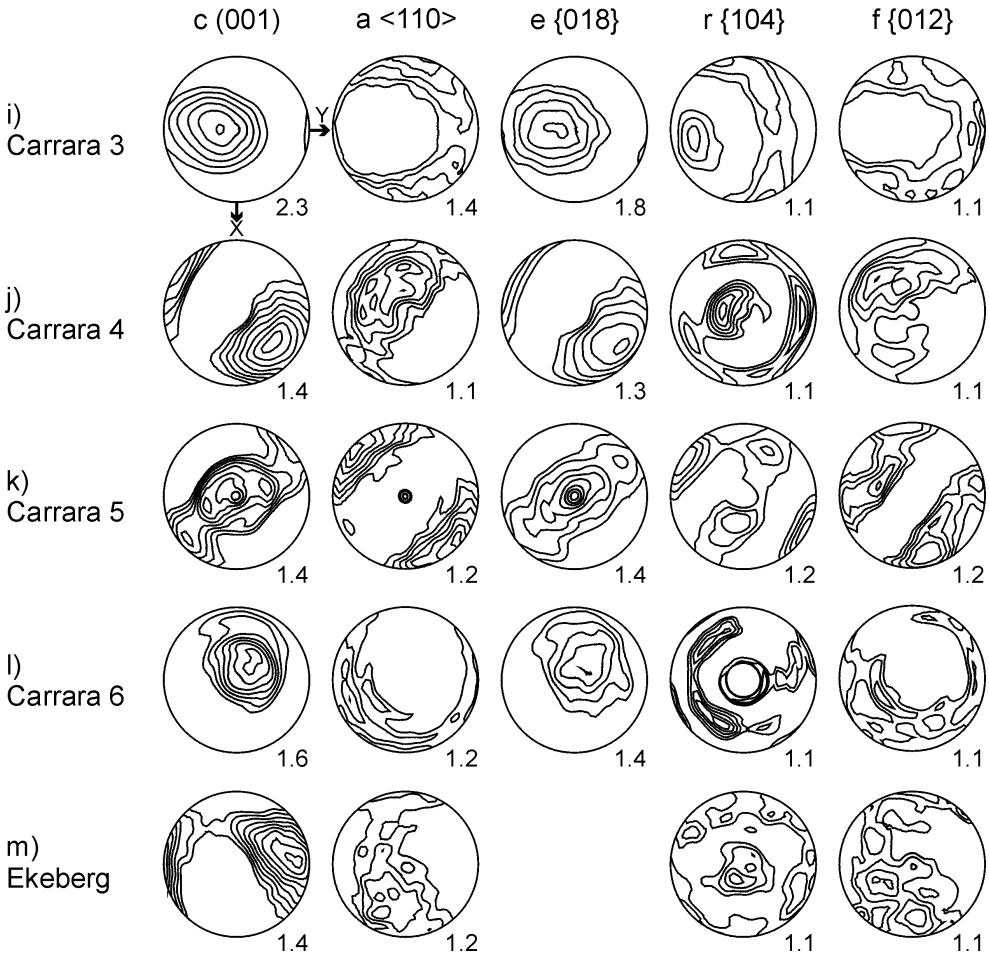


Abb. 5.24: Textur (kristallographische Vorzugsorientierung) der untersuchten Marmore a) Peccia, b) Carrara 1a, c) Carrara 1b, d) Ruivina, e) Rosa Estremoz, f) Trigaches, g) Verde Viana, h) Carrara 2, i) Carrara 3, j) Carrara 4, k) Carrara 5, l) Carrara 6 und m) Ekeberg (untere Halbkugel; Schmidtnetz-Projektion; die niedrigste Konturlinie entspricht dem 1,0-fachen der Gleichverteilung). Gegeben sind jeweils die Polfiguren der Basisfläche (006), der a-Achse <110>, der Zwillingsfläche {018}, der Spaltrhomboederfläche {104} und der Versetzungsgleitfläche {012}. Die Orientierung ist in der Polfigur links oben markiert. Die Z-Richtung steht senkrecht zur Papierebene. Die Zahlen an den Polfiguren markieren das relative Textur-Maximum als Vielfache der Gleichverteilung (= mrd: „multiples of random distribution").

Verde Viana: Die Textur ist mit einem starken punktförmigen c-Achsenmaximum von 4,2 mrd in Z-Richtung ausgebildet (Abb. 5.24g). Entsprechend sind die a-Achsen in einem Gürtel parallel zur XY-Ebene orientiert.

Carrara 2: Stellt eine intermediäre Achsenverteilung dar mit jeweils mehreren Submaxima der c- und a-Achsen (Abb. 5.24h). Entsprechend ist das c-Achsen-Hauptmaximum mit 1,3 mrd nur schwach ausgeprägt.

Carrara 3: Die Textur stellt einen c-Achsenfasertypen dar, die mit einem Punktmaximum im spitzen Winkel zur Z-Richtung von 2,3 mrd die stärkste kristallographische Vorzugsorientierung aller untersuchten Carrara-Varietäten aufweist (Abb. 5.24i).

Carrara 4: Die kristallographische Vorzugsorientierung ist mit einem langgestreckten Punktmaximum der c-Achsen von 1,4 mrd moderat ausgeprägt (Abb. 5.24j).

Carrara 5: Die Textur repräsentiert einen a-Achsenfasertyp mit moderater Intensität des c-Achsenmaximums von 1,4 mrd (Abb. 5.24k).

Carrara 6: Einhergehend mit einer Kornformregelung und einer Vorzugsorientierung der dunkelgrauen Musterung ist die Textur für einen Carrara Marmor verhältnismäßig stark ausgeprägt (Abb. 5.24l). Das punktförmige c-Achsenmaximum hat eine Intensität von 1,6 mrd.

Ekeberg: Die Textur ist mit einem langgestreckten c-Achsenpunktmaximum von 1,4 mrd moderat ausgeprägt und stellt eine intermediäre Achsenverteilung dar (Abb. 5.24m).

Um die Texturen aller zwölf untersuchten Proben vergleichend zu charakterisieren, ist der Formfaktor T in Abb. 5.25 gegen die Intensität des c-Achsenmaximums aufgetragen. Er beschreibt die c-Achsenkonzentrationen mit Werten zwischen –1 und 1, wobei -1 dem idealen c-Achsenfasertypen mit gürtelartiger a-Achsenverteilung und 1 dem idealen a-Achsenfasertypen mit gürtelartiger c-Achsenverteilung entspricht (vgl. Kap. 3.2.1).

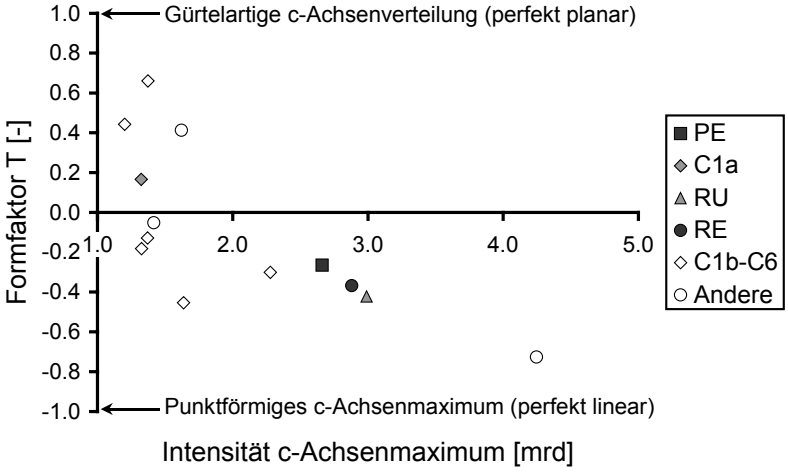


Abb. 5.25: Variation der kristallographischen Verteilungsmuster des Calcits bzw. Dolomits: Formfaktor T als Funktion der Intensität des c-Achsenmaximums.

Es zeigt sich, dass mit abnehmendem Formfaktor das relative Texturmaximum der c-Achsen tendenziell ansteigt. So weisen alle Proben mit einem positiven Formfaktor eine relativ schwache Textur mit einem c-Achenmaximum kleiner als 1,7 mrd auf. Dagegen entspricht der Verde Viana Marmor mit einem Formfaktor von -0,73 am ehesten dem c-Achsenfasertypen und hat dementsprechend mit 4,2 mrd das stärkste c-Achenmaximum. Diese Beziehung erklärt sich aus der Tatsache, dass bei einer punkt-

förmigen c-Achenverteilung die c-Achsendichte im Maximum zwangsläufig höher sein muss als bei einer gürtelartigen c-Achsenverteilung, bei welcher sich die c-Achsen entlang eines Großkreises verteilen und folglich dort weniger dicht konzentriert sind.

Bei den Carrara Marmoren lassen sich mit Ausnahme der Probe Carrara 3 generell relativ schwache Texturen beobachten. Während Carrara 3 mit einem c-Achsenmaximum von 2,3 mrd eine Ausnahme darstellt, liegen die Intensitäten aller anderen Carrara-Varietäten mit Werten von maximal 1,6 mrd deutlich darunter.

Bei den vier Proben, die eingehend auf Richtungsabhängigkeiten untersucht wurden, liegen die Texturparameter der Marmore Peccia, Ruivina und Rosa Estremoz eng beieinander. Sie repräsentieren eine deutlich anisotrope Textur mit relativ hohen Intensitäten der c-Achsenmaxima zwischen 2,7 mrd und 3,0 mrd und negativen Formfaktoren zwischen -0,27 und -0,42. Die Probe Carrara 1 weist dagegen eine schwache kristallographische Vorzugsorientierung der c-Achsen auf und entspricht mit einem c-Achsenmaximum von 1,3 mrd (C1a) bzw. 1,2 mrd (C1b) nahezu der Zufallsverteilung.

5.2.4 Rissorientierung mittels Ultraschallanalyse

Neben der Möglichkeit zur diagnostischen Beurteilung des Erhaltungszustandes von Natursteinen (vgl. Köhler 1991) kann die Ultraschallanalytik zur Erfassung der elastischen Eigenschaften im intrinsischen (rissfreien) und im rissbehafteten Zustand von Marmor herangezogen werden. Der Vergleich zwischen beiden Zuständen erlaubt die Identifikation der Rissdichte und der Vorzugsorientierung von präexistierenden Mikrorisssystemen im Gestein (Siegesmund et al. 1993, Schild et al. 2001). Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse die Sensibilität von Kompressionswellengeschwindigkeiten (V_P) gegenüber dem Grad der Textur und dem Porenfüllungsgrad von Marmor, was von Bedeutung bei der Interpretation von in-situ Ultraschallmessungen am Gebäude ist.

5.2.4.1 Intrinsische Ultraschallgeschwindigkeit

Die intrinsische Ultraschallgeschwindigkeit (V_{Psat}) spiegelt die elastischen Eigenschaften des rissfreien Gesteins wider. Ihre dreidimensionale Verteilung wurde näherungsweise an Kugelproben im wassergesättigten Zustand ermittelt (vgl. Kap. 3.3.1.1). Die Füllung des Porenraums mit Wasser unterdrückt den Einfluss der offenen und von außen zugänglichen Rissporosität. Der Grund dafür liegt zum einen in der höheren Kompressionswellengeschwindigkeit von Wasser (~1,5 km/s) gegenüber Luft (~0,3 km/s), zum anderen in der besseren Ankopplung zweier durch einen Riss getrennten Gesteinsflächen durch Wasser. Somit nähert sich die V_{Psat}-Verteilung bei frischen Marmoren unter Wassersättigung der intrinsischen an (Rüdrich 2003; Strohmeyer 2003), die bei Marmor als nahezu monomineralisches Gestein von den Einkristall-Eigenschaften von Calcit bzw. Dolomit und deren kristallographischer Vorzugsorientierung (Textur) gesteuert wird (Siegesmund 1996). Hierbei sind sowohl Calcit als auch Dolomit extrem anisotrop: V_P variiert bei Calcit zwischen 5,71 km/s ($\parallel$c-Achse) und 7,73 km/s ($\perp$c-Achse) und bei Dolomit zwischen 6,28 km/s ($\parallel$c-Achse) und

8,45 km/s (⊥c-Achse; Dandekar 1968). Je stärker die Kristallite eines Marmors bevorzugt in eine Richtung orientiert sind, desto mehr nähert sich die V_P-Anisotropie des Gesamtgesteins der des Einzelminerals an. Die Anisotropie A_{Vp} wird quantifiziert durch :

Formel 5.1: $$A_{Vp} = \frac{V_{Pmax} - V_{Pmin}}{V_{Pmax}} \cdot 100 \qquad [\%]$$

Entsprechend beträgt die Anisotropie der Einkristalle bei Calcit und Dolomit jeweils 26 %.

Die Extrema und die Anisotropien der intrinsischen Ultraschallgeschwindigkeiten (V_{Psat}) sind für alle untersuchten Marmortypen in Tab. 5.2 aufgeführt. Die dreidimensionalen Geschwindigkeitsverteilungen sind an vier ausgewählten Beispielen in Abb. 5.26 dargestellt.

Tabelle 5.2: Übersicht über V_P-Parameter der untersuchten Marmore. „min“ und „max“: Extrema der Kompressionswellengeschwindigkeit, ermittelt aus 193 verschiedenen Richtungen. *: Anisotropiewerte sind bei niedrigen Geschwindigkeitsdifferenzen mit hohen Fehlern behaftet und daher wegen der geringen Aussagekraft nicht berechnet worden.

			Vp_{sat}		Vp_{dry}		ΔVp	
			[km/s]	A [%]	[km/s]	A [%]	[km/s]	A [%]
ausgewählte Beispiele	Peccia	min	6.1	8	4.5	22	0.9	48
		max	6.6		5.7		1.7	
	Carrara 1b	min	6.0	2	4.1	16	1.3	35
		max	6.1		4.9		2.0	
	Ruivina	min	6.1	9	4.7	20	0.8	51
		max	6.7		5.9		1.5	
	Rosa Estremoz	min	6.2	7	5.7	11	0.3	48
		max	6.6		6.4		0.6	
	Trigaches	min	6.4	4	5.7	7	0.5	33
		max	6.7		6.1		0.8	
	Verde Viana	min	6.1	10	4.5	18	1.2	36
		max	6.8		5.5		1.9	
	Carrara 2	min	6.3	2	6.2	4	0.1	*
		max	6.4		6.4		0.3	
	Carrara 3	min	6.1	4	5.7	5	0.4	*
		max	6.4		6.0		0.5	
	Carrara 4	min	6.4	2	6.4	2	0.0	*
		max	6.6		6.6		0.1	
	Carrara 5	min	6.2	3	5.8	5	0.4	*
		max	6.4		6.1		0.5	
	Carrara 6	min	6.0	3	4.5	12	1.1	38
		max	6.2		5.1		1.7	
	Ekeberg	min	6.8	4	5.6	10	0.8	35
		max	7.0		6.2		1.3	

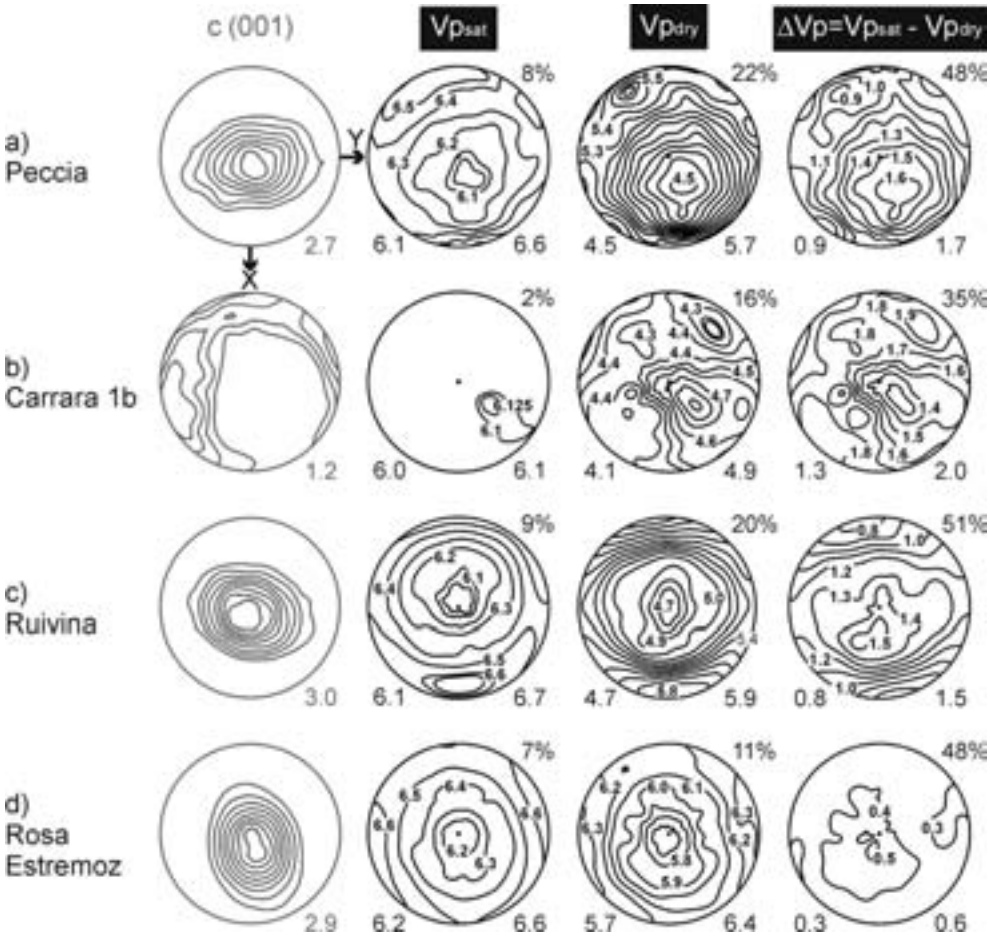


Abb. 5.26: V_P-Verteilung von Kugelproben im wassergesättigten (V_{Psat}) und im trockenen (V_{Pdry}) Zustand sowie die Geschwindigkeitsdifferenzen aus beiden Zuständen (ΔV_P; untere Halbkugel; stereographische Projektion). Die Polfiguren der c-Achsen sind jeweils vergleichend dargestellt. Die Isolinien repräsentieren km/s (mit Zahlenangaben) bzw. Vielfache der Gleichverteilung. Die Orientierung ist in der Polfigur links oben markiert. Die Z-Richtung steht senkrecht zur Papierebene. Die Zahlen unter den einzelnen V_P-Polfiguren kennzeichnen die Extrema der Kompressionswellengeschwindigkeit in km/s. Die Prozentwerte geben die Anisotropie von V_P bzw. ΔV_P an.

Erwartungsgemäß liegen die Werte für V_{Psat} im quasi-rissfreien Zustand durchweg einheitlich hoch über 6,0 km/s. Die höchsten Ultraschallgeschwindigkeiten zeigt der Ekeberg Marmor als einziger Dolomitmarmor im Spektrum der untersuchten Proben. Wie oben angegeben erklärt sich dies aus der etwa 0,6-0,7 km/s höheren P-Wellengeschwindigkeit von Dolomit gegenüber Calcit.

Die Anisotropie für V_{Psat} beträgt bei den meisten untersuchten Marmoren unter 4% (Tab. 5.2). Die vier Proben der Marmore Peccia, Ruivina, Rosa Estremoz und Verde Viana liegen mit Anisotropiewerten zwischen 7 und 10% deutlich darüber. Allen

gemeinsam ist eine relativ starke Textur. Die V_{Psat}-Verteilungsmuster in Abb. 5.26a,c,d zeigen deutlich, dass das V_P-Minimum jeweils mit dem c-Achsenmaximum verknüpft ist, was aus den vergleichenden Polfiguren der c-Achsen in der linken Spalte ersichtlich ist. Ein weiteres Indiz für die deutliche Kontrolle der intrinsischen Kompressionswellengeschwindigkeit durch die Textur ist die Ähnlichkeit zwischen den einzelnen c-Achsen-Polfiguren und den dazugehörenden V_{Psat}-Verteilungsmustern bei Peccia, Ruivina und Rosa Estremoz Marmor (Abb. 5.26a,c,d). Dagegen ist bei der Probe C1b als repräsentativer Vertreter eines Marmors mit schwacher Textur (Abb. 5.26b) festzustellen, dass entsprechend auch V_{Psat} nahezu anisotrop ist.

Der Zusammenhang ist in Abb. 5.27 zusammenfassend dargestellt. Für die untersuchten Marmore ist eine nahezu lineare Beziehung zwischen der Intensität des c-Achsenmaximums und der Anisotropie der intrinsischen Verteilung der Kompressionswellengeschwindigkeiten, die durch die V_{Psat}-Verteilung im wassergesättigten Zustand zum Ausdruck gebracht wird, ersichtlich.

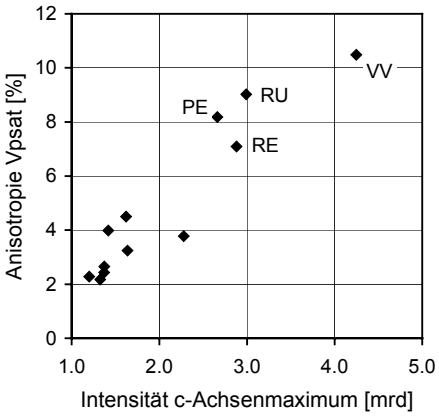


Abb. 5.27: Anisotropie der Kompressionswellengeschwindigkeit V_{Psat} unter wassergesättigten Bedingungen als Funktion der Intensität der Textur der untersuchten Marmore.

5.2.4.2 Rissbedingte Ultraschallgeschwindigkeit

Im trockenen Zustand unterliegt die V_{Pdry}-Verteilung der Marmore zusätzlich dem Einfluss präexistierender Mikrorisssysteme. Ihre Orientierung lässt sich näherungsweise aus der V_P-Differenz zwischen Kugelproben im wassergesättigten und trockenen Zustand ermitteln (z.B. Weiss et al. 2000). An drei der vier ausgewählten Beispiele (Peccia, Ruivina, Rosa Estremoz; Abb. 5.26a,c,d) ist eine Verstärkung der intrinsischen Anisotropie zu beobachten. In den V_{Pdry}-Verteilungsmustern stimmen die Positionen der V_P-Extrema mit denen der V_{Psat}-Verteilungen überein. Durch den Effekt der Mikrorisse ist die Ultraschallgeschwindigkeit gegenüber dem intrinsischen Zustand insgesamt herabgesetzt, am stärksten jedoch an den V_{Pdry}-Minima, was anhand der Differenzverteilungsmuster (ΔV_P) erkennbar ist. Dadurch wird die Anisotropie von V_{Pdry} erhöht, was beispielsweise beim Peccia Marmor zu einem Anstieg auf A_{Vpdry}=22% gegenüber von A_{Vpsat}=8% führt.

Hierfür können drei mögliche Ursachen in Betracht gezogen werden. Zum einen kann angenommen werden, dass Mikrorisse vorzugsweise an Korngrenzen gebunden sind, da diese Schwächezonen im Kornverband darstellen. Bei einer deutlichen bis ausgeprägten Korngrenzenregelung wie in den drei genannten Beispielen (vgl.

Abb. 5.22a,c,d) ist senkrecht zur Foliation in Z-Richtung die höchste Rissdichte gegeben und somit entsprechend die stärkste V_P-Reduktion zu erwarten. Weiterhin kann die Einregelung weiterer Mineralphasen zu Diskontinuitäten führen und die Anisotropie verstärken. Glimmerminerale im Peccia Marmor sind bevorzugt senkrecht zur Z-Richtung und zum V_{Pdry}-Minimum orientiert (vgl. Abb. 5.9a). Ähnlich ist die Situation beim Rosa Estremoz Marmor, wobei hier parallel zur Foliation eingeregelte Muskovitplättchen nur vereinzelt auftreten, was möglicherweise den relativ schwachen Anstieg der V_P-Anisotropie von A_{Vpsat}=7% auf nur A_{Vpdry}=11% erklärt (Abb. 5.26d). Beim Ruivina Marmor dürften transgranulare Risse parallel zur Foliation (vgl. Abb. 5.11b) maßgeblich zum hohen Anstieg der V_P-Anisotropie von A_{Vpsat}=9% auf A_{Vpdry}=20% geführt haben. Als weitere Ursache für die Verstärkung der intrinsischen V_P-Anisotropie kann die bevorzugte Orientierung von e-Flächenpolen vermutet werden, welche mit den c-Achsen verknüpft sind und im spitzen Winkel zu diesen verlaufen (vgl. Abb. 5.24a,d,e). Das heißt, dass die e{018}-Flächen etwa senkrecht zum c-Achsenmaximum orientiert sind. Da Zwillingsflächen im Calcit vorzugsweise mit e{018}-Flächen korrespondieren, sind in der Foliationsebene weitere Schwächezonen orientiert, die zur Rissbildung beigetragen haben und die Reduktion von V_{Pdry} parallel zum c-Achsenmaximum mitverursacht haben können.

Die Probe Carrara 1b mit nahezu isotroper intrinsischer Kompressionswellengeschwindigkeit V_{Psat} weist mit 16% ebenfalls eine recht deutliche Anisotropie der V_{Pdry}-Verteilung auf (Abb. 5.26b). Entsprechend zeigt die Differenzpolfigur ΔV_P das gleiche Verteilungsmuster wie die V_{Pdry}-Verteilung. Die Flächenpole präexistierender Mikrorisse sind dabei nicht auf ein diskretes Maximum konzentriert, sondern auf mehrere Submaxima, die etwa entlang eines Großkreises subparallel zur XY-Ebene angeordnet sind. Mutmaßlich spielen richtungsabhängige Spannungsverteilungen im Gebirgsverbund eine Rolle, die erst bei der Hebung und damit einhergehender Drukkentlastung zur Anlage orientierter Rissscharen geführt haben.

Betrachtet man die Höhe des rissbedingten Differenzbetrages (jeweils rechte Spalte in Abb. 5.26 und Tab. 5.2), hat man ein Maß für die Dichte präexistierender Mikrorisse, die sich aus der Risshäufigkeit und der Rissweite zusammensetzt (Rasolofosaon et al. 2000). Demnach zeigt die Probe Carrara 1b mit ΔV_{Pmax}=2,0 km/s die relativ größte Rissdichte. Ähnlich hohe Werte zwischen 1,3 und 1,9 km/s lassen die Proben Peccia, Ruivina, Verde Viana, Carrara 6 und Ekeberg erkennen (vgl. Tab. 5.2). Alle anderen Proben haben wesentlich niedrigere Differenzbeträge von maximal ΔV_{Pmax}=0,8 km/s. Bei den untersuchten Carrara Marmoren ist festzustellen, dass eine hohe Rissdichte mit glatten Korngrenzen (Carrara 1b und 6) und eine niedrige Rissdichte mit eher irregulären Korngrenzen korreliert (vgl. Tab. 5.1). Da die Kohäsionskräfte an glatten Korngrenzen niedriger sind, ist leicht vorstellbar, dass es bei solchen Marmoren leichter zur Herausbidung von Mikrorissen gekommen ist als bei Marmoren mit buchtigen bis verzahnten Korngrenzengeometrien. Bei den anderen Proben ist diese Beziehung nicht ohne Weiteres herzustellen. Zum Beispiel zeigt der Rosa Estremoz Marmor trotz vergleichsweise glatter Korngrenzen eine relativ niedrige Rissdichte von maximal ΔV_{Pmax}=0,6 km/s.

6 Thermische und hygrische Verwitterung

Der Verwitterungsprozess von Marmor im Allgemeinen sowie die Phänomene, die mit dessen Verwendung als Fassadenmaterial in Verbindung stehen (Kap. 4), basieren ganz entscheidend auf den extremen thermischen Eigenschaften seiner Hauptkomponenten Calcit bzw. in weniger extremer Ausprägung Dolomit (vgl. Kap. 2.1). Der Ausdehnungskoeffizient α von Calcit ist im Vergleich zu anderen gesteinsbildenden Mineralen nicht nur extrem anisotrop, sondern derart ausgeprägt, dass sich ein Calcit-Einkristall bei Erwärmung in Richtung der kristallographischen c-Achse ausdehnt ($\alpha = 26 \times 10^{-6}\ K^{-1}$) und senkrecht dazu in Richtung der a-Achsen sogar kontrahiert ($\alpha = -6 \times 10^{-6}\ K^{-1}$; vgl. Kap. 2.1). Die Verformung findet bei Wiederabkühlung entsprechend umgekehrt statt (Abb. 6.1).

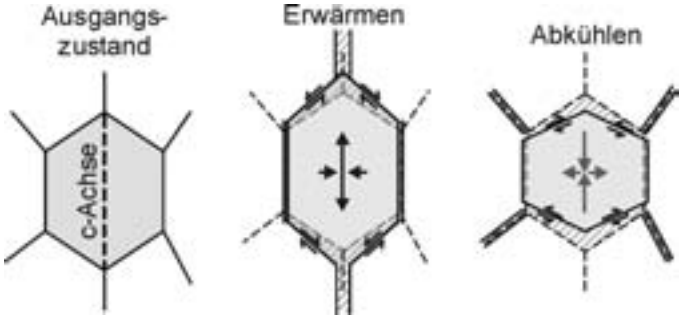


Abb. 6.1: Anisotropie des thermischen Verhaltens eines Calcit-Einkristalls (nach Rüdrich et al. 2001).

In der Verwendung von Marmor als Außenverkleidung führen Temperaturwechsel durch Tag-Nacht-Zyklen und Feuchtigkeit im Rahmen des natürlichen Witterungseinflusses zu einem irreversiblen Längenzuwachs, der mit der Anomalie des thermischen Verhaltens von Calcit in Zusammenhang steht (Koch & Siegesmund 2004b): Thermische Beanspruchung führt im Kristallverbund zu Spannungen entlang von Korngrenzen und anderen Schwächezonen (z.B. Zwillingsgleitflächen) und infolge dessen zur Gefügeentfestigung durch die Herausbildung von Mikrorissen. Bereits einmaliges Aufheizen kann daher zu einer beträchtlichen Restdehnung führen, die auch nach Erreichen der Ausgangstemperatur unumkehrbar bleibt (Rosenholtz & Smith 1949, Sage 1988, Franzini 1995). Bei wiederholter Erwärmung des Marmors spielt der Einfluss von Feuchtigkeit auf die progressive Längenänderung eine entscheidende Rolle (Winkler 1996, Bortz 1999, Schouenborg et al. 2003, Koch & Siegesmund 2004b, Grelk et al. 2004).

Nachfolgend wird am Beispiel der untersuchten Marmore der Einfluss des Gefüges i) auf das thermische Verhalten während einer Temperaturänderung, ii) auf die Anisotropie und die Intensität der Restdehnung unter trockenen sowie feuchten Bedingungen, sowie iii) auf die Verformung von Marmorplatten unter Laborbedingungen eingegangen.

6.1 Gefügeabhängigkeit des thermischen Längenänderungsverhaltens

Marmore zeigen oft eine ausgeprägte Anisotropie ihrer Längenänderung (Widhalm et al. 1996, Tschegg et al. 1999, Siegesmund et al. 2000a, Zeisig et al. 2002). Diese wird im Wesentlichen von der Textur der Marmore kontrolliert. Zeigt das Gesamtgestein eine Vorzugsorientierung nach dem Kristallgitter, pausen sich die anisotropen thermischen Eigenschaften des Calcits auf das Gesamtgestein durch. Dabei dehnt sich das Gestein bei Erwärmung in der bevorzugten Richtung der kristallographischen c-Achsen am stärksten aus. Entsprechend ist die Dehnung in der Vorzugsrichtung der a-Achsen senkrecht dazu am schwächsten bzw. bei einer ausgeprägten Textur sogar negativ ausgebildet. Darüber hinaus können präexistierende sowie während thermischer Beanspruchung herausgebildete Mikrorisse Einfluss auf das Dehnungsverhalten nehmen (Leiss & Weiss 2000).

In Abhängigkeit des Texturtyps (vgl. Kap. 2.1.1) kann die Anisotropie des Dehnungsverhaltens verschiedene Grundmuster aufweisen (Abb. 6.2; Leiss & Ullemeyer 1999). Im Falle eines idealen c-Achsenfasertypen ist die Längenänderung in den drei Hauptrichtungen $\varepsilon_{max} > \varepsilon_{int} = \varepsilon_{min}$. Bei einem idealen a-Achsenfasertypen mit gürtelartiger c-Achsenverteilung sollte die temperaturbedingte Dehnung das Verhältnis $\varepsilon_{max} = \varepsilon_{int} > \varepsilon_{min}$ zeigen. In der Natur stellen Marmortexturen mit dem intermediären Fasertypen meist einen Übergang zwischen den beiden idealisierten Endgliedern dar (vgl. Kap. 5.2.3), so dass in der Regel $\varepsilon_{max} > \varepsilon_{int} > \varepsilon_{min}$ beobachtet werden sollte. Bei einer schwach ausgeprägten Textur, die nahezu einer Zufallsverteilung der c-Achsenorientierung entspricht, nähert sich die thermische Dehnung dem isotropen Verhalten $\varepsilon_{max} = \varepsilon_{int} = \varepsilon_{min}$ an.

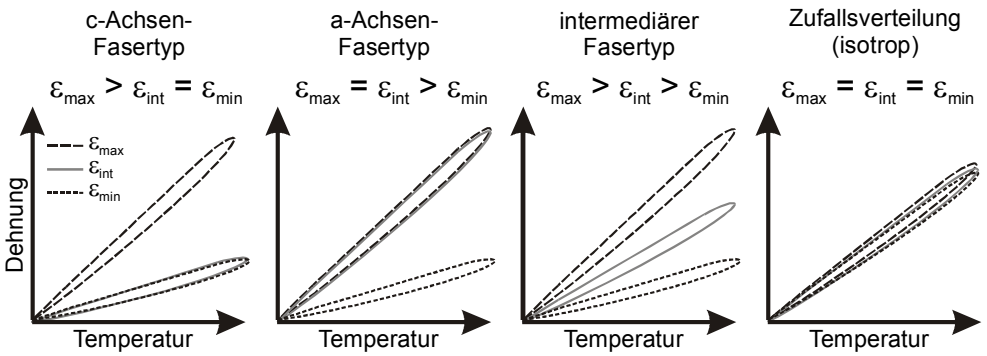


Abb. 6.2: Grundmuster des thermischen Längenänderungsverhaltens bei Marmor in den drei Hauptrichtungen in Abhängigkeit des Texturtyps. ε_{max}: maximale Dehnung; ε_{int}: intermediäre Dehnung; ε_{min}: minimale Dehnung.

Der Einfluss der Textur auf das Dehnungsverhalten wird am Beispiel der hier untersuchten Marmore bestätigt (Abb. 6.3). Die Proben Peccia, Ruivina und Rosa Estremoz repräsentieren mit relativ stark ausgeprägten Texturen den Übergang zwischen dem c-Achsen- und dem intermediären Fasertypen (vgl. Kap. 5.2.3). Die Intensität der Längenänderung kann mit dem Verhältnis $\varepsilon_{max} >> \varepsilon_{int} > \varepsilon_{min}$ charakterisiert werden. Die räumliche Verteilung des Ausdehnungskoeffizienten α, welcher den Anstieg der Hysteresis-Schleifen im ε-Temperatur-Diagramm zum Ausdruck bringt (vgl. For-

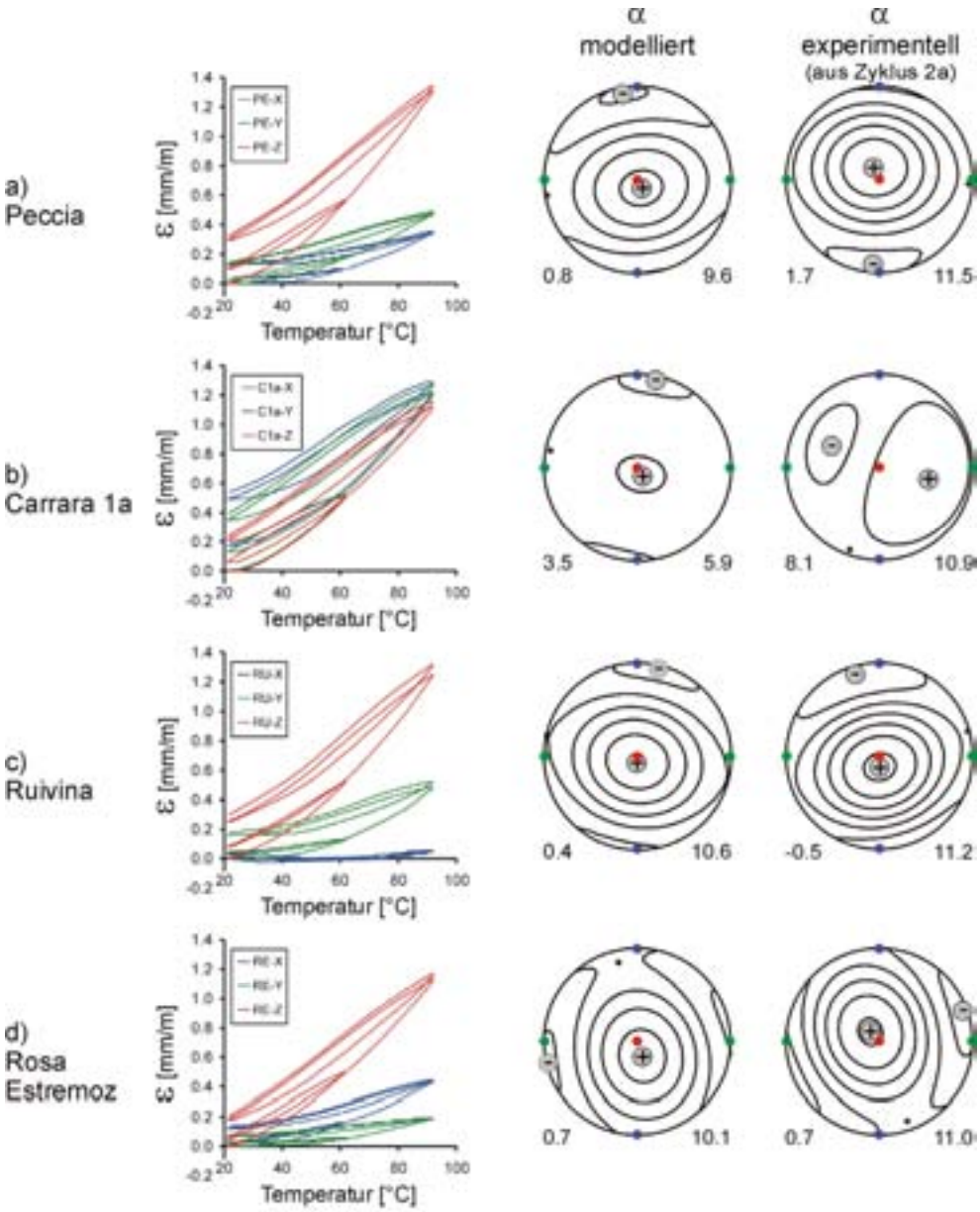


Abb. 6.3: Richtungsabhängigkeit der thermischen Dilatation (ε) bedingt durch die Textur am Beispiel der Proben a) Peccia, b) Carrara 1a, c) Ruivina und d) Rosa Estremoz: Der Anstieg der Hysteresis-Schleifen (linke Diagramme) sowie die daraus abgeleitete räumliche Verteilung des Ausdehnungskoeffizienten α (rechte Diagramme) korrespondieren mit der aus der Textur modellierten Verteilung von α (mittlere Diagramme). Die experimentellen α-Plots wurden aus den Steigungen der Rampe 2a aus sechs unabhängigen Richtungen ermittelt (vgl. Kap. 3.3.2.1). Die farbigen Polpunkte korrespondieren in Richtung (X, Y, Z) und Farbe mit den Hysteresis-Schleifen. Die Zahlen unter den Polfiguren geben die Extrema von α in [10^{-6} K^{-1}] an. Abstand Isolinien: 2 x 10^{-6} K^{-1}. „+“: Maximum, „-“: Minimum.

mel 3.2), ist bei allen drei Proben eng verknüpft mit der aus der Textur modellierten α-Verteilung (Abb. 6.3a,c,d). Die Richtungen der experimentell ermittelten Extrema der Längenänderung sind sehr gut in Übereinstimmung zu bringen mit den texturmodellierten Extrema. Darüber hinaus zeigen die räumlichen Verteilungsmuster der modellierten und experimentell bestimmten α-Werte insgesamt große Ähnlichkeit in Intensität und Orientierung.

Die Probe Carrara 1a dagegen lässt mit einer schwachen Textur entsprechend nur eine schwache, nahezu isotrope Raumverteilung der thermischen Längenänderung erkennen. Die Richtungsunterschiede von α-experimentell sind bereits im Bereich des Messfehlers, so dass das Verteilungsmuster gegenüber dem von α–modelliert verzerrt ist (Abb. 6.3b).

Die Korrelation der Richtungsabhängigkeit von α mit der Textur wird darüber hinaus in Abb. 6.4 sichtbar. Die Anisotropie von α ($A_\alpha = (\alpha_{max} - \alpha_{min}) / \alpha_{max} * 100$ [%]) als Funktion der Intensität des c-Achsenmaximums zeigt nahezu einen linearen Trend. Der Ruivina Marmor mit der zweithöchsten Texturintensität weißt mit einem negativen Ausdehnungskoeffizienten in X-Richtung als Minimum sogar eine Anisotropie von über 100 % auf. Lediglich der Verde Viana Marmor passt sich nicht diesem Trend an, was möglicherweise in seiner Heterogenität und der grobkristallinen Struktur (vgl. Kap. 5.2) und dem daraus resultierenden größeren Messfehler bei der Bestimmung der Textur und α begründet liegt.

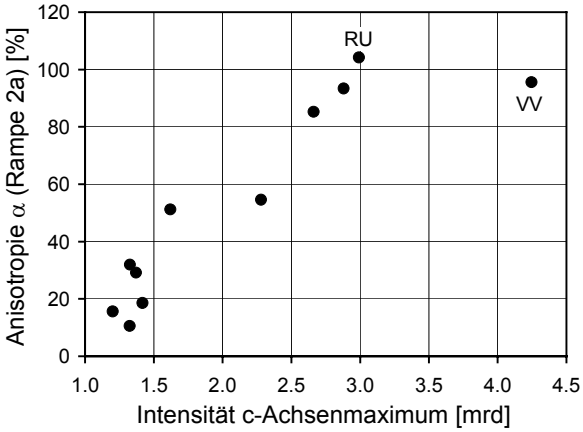


Abb. 6.4: Anisotropie des Ausdehnungskoeffizienten α als Funktion der Intensität der Textur. Die Werte für α wurden aus der Steigung des Temperaturintervalls bis 60 °C der Heizphase von Zyklus 2 im Dehnungsexperiment (Zyklus 2a; vgl. Kap. 3.3.2.1) berechnet.

Neben der Richtungsabhängigkeit zeigen die Hysteresis-Schleifen in Abb. 6.3 weitere Charakteristika: Während des ersten Heizzyklus steigt die Dehnungskurve an bis zum Erreichen der Bestimmungstemperatur von 60 °C. In der Heizphase des zweiten Zyklus steigt die Dehnungskurve erneut an (Zyklus 2a) bis zur Maximaltemperatur des ersten Zyklus, gefolgt von einer plötzlichen Erhöhung der Steigung bei 60 °C und einer weiteren sukzessiven Erhöhung im Anschluss bis 90 °C (Zyklus 2b). Der wiederholte Anstieg bis 90 °C in Zyklus 3 ist insgesamt weniger steil.

Für den Anstieg der Dehnungskurven im unteren Temperaturbereich kann ein Pufferungseffekt durch bereits vorhandene Mikrorisse verantwortlich gemacht werden, der mit steigender Temperatur nachlässt und so zu einem allmählichen Anstieg des Ausdehnungskoeffizienten führt (vgl. Leiss & Weiss 2000). Die Dehnung der Calcit-

Einkristalle wird hierbei zunächst ein Stück weit vom bereits vorhandenen Hohlraumsystem abgepuffert, so dass nur eine reduzierte Übertragung auf das Gesamtgestein stattfindet. Im höheren Temperaturbereich ab etwa 40-60 °C wird dieser Prozess zunehmend abgelöst durch die Bildung thermisch induzierter Mikrorisse (Rüdrich et al. 2001, Weiss et al. 2002b). Hat der Marmor bereits eine thermische Vorschädigung erfahren, wird diese gleichsam gespeichert, so dass eine thermisch induzierte Rissbildung erst ab einer bestimmten kritischen Risstemperatur („critical crack initiation temperature“: CCIT, Rüdrich et al. 2001) erfolgt, woraus sich der sprunghafte Anstieg in Zyklus 2 bei 60 °C und das Ausbleiben dieses „Knicks“ in Zyklus 3 erklären lässt. Die CCIT wird entweder durch den Grad der thermischen Vorschädigung bzw. bei frischen Marmoren durch die Sensibilität gegenüber thermischer Beanspruchung bedingt (Weiss et al. 2002b).

Zu einem geringen Anteil dürfte für den Anstieg der Dehnungskurve auch der Ausdehnungskoeffizient von Calcit selbst verantwortlich gemacht werden, der nach Fei (1995) in Richtung der c-Achse nicht konstant, sondern temperaturabhängig ist. Demnach würde $\alpha \parallel c$ von $12{,}5 \times 10^{-6}\ K^{-1}$ bei 20 °C auf $19{,}2 \times 10^{-6}\ K^{-1}$ bei 90 °C ansteigen. Die Gleichung, die der Berechnung zugrunde liegt, bezieht sich jedoch auf einen Temperaturbereich bis etwa 1000 °C, so dass die errechneten Werte möglicherweise nicht exakt, aber zumindest in ihrer Tendenz richtig sind.

Den Anstieg der Dehnungskurven in den einzelnen Zyklen verdeutlicht Abb. 6.5. Hier sind die Ausdehnungskoeffizienten aus den drei Zyklen des Dehnungsexperimentes (vgl. Kap. 3.3.2.1) jeweils aus den Heiz- sowie aus den Abkühlphasen berechnet und einander richtungsabhängig gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass die Steigung in Zyklus 1 und 2 während der Heizphase generell höher ist als in der Abkühlphase, in Zyklus 3 dagegen etwa gleich ist. Weiterhin ist α in Zyklus 2 meist signifikant gegenüber Zyklus 1 erhöht. Dies macht noch einmal deutlich, dass in den ersten beiden Heizzyklen thermisches Mikrorisswachstum stattfindet und im dritten Zyklus durch die thermische Vorschädigung über den gesamten Temperaturbereich hinweg die Risspufferung zu einem nahezu vollkommen elastischen Dehnungsverhalten führt. Die relativ hohe Distanz einzelner Datenpunkte zur α-Isolinie in Abb. 6.5 zeigt somit eine Sensibilität gegenüber thermischer Mikrorissbildung an, die vor allem bei der Probe Carrara 1a (Abb. 6.5b) stark ausgeprägt erscheint und richtungsabhängig unterschiedlich ist. So ist das thermische Mikrorisswachstum beispielsweise beim Peccia und Ruivina Marmor in Z-Richtung deutlich höher (Abb. 6.5a,c).

Um die gefügebedingte Anisotropie des Dehnungsverhaltens in die Praxis zu überführen, sei das Beispiel des Peccia Marmors herausgegriffen (Abb. 6.5a). Die Ausdehnungskoeffizienten betragen in einem realistischen Temperaturbereich (20-60 °C) in den beiden extremen Richtungen X und Z $\alpha_{X\ (20\text{-}60°C)} = 2{,}4 \times 10^{-6}\ K^{-1}$ und $\alpha_{Z\ (20\text{-}60°C)} = 13{,}8 \times 10^{-6}\ K^{-1}$. Bei einer Marmorplatte von 1 m Länge bedeutet dies bei einer Erwärmung von 20 auf 60 °C, wie sie leicht in Sommermonaten Mitteleuropas an südlich oder westlich exponierten Fassaden erreicht wird, eine tägliche Dehnung von nur knapp 0,1 mm in X-Richtung, und von 0,55 mm, wenn die Längsachse der Platte stattdessen in Z-Richtung orientiert ist. Es ist leicht vorstellbar, dass solche täglichen Dehnungsunterschiede vor allem bei anisotropen Marmoren bautechnische Relevanz besitzen und bei der Konzeption von Befestigungssystemen berücksichtigt werden sollten.

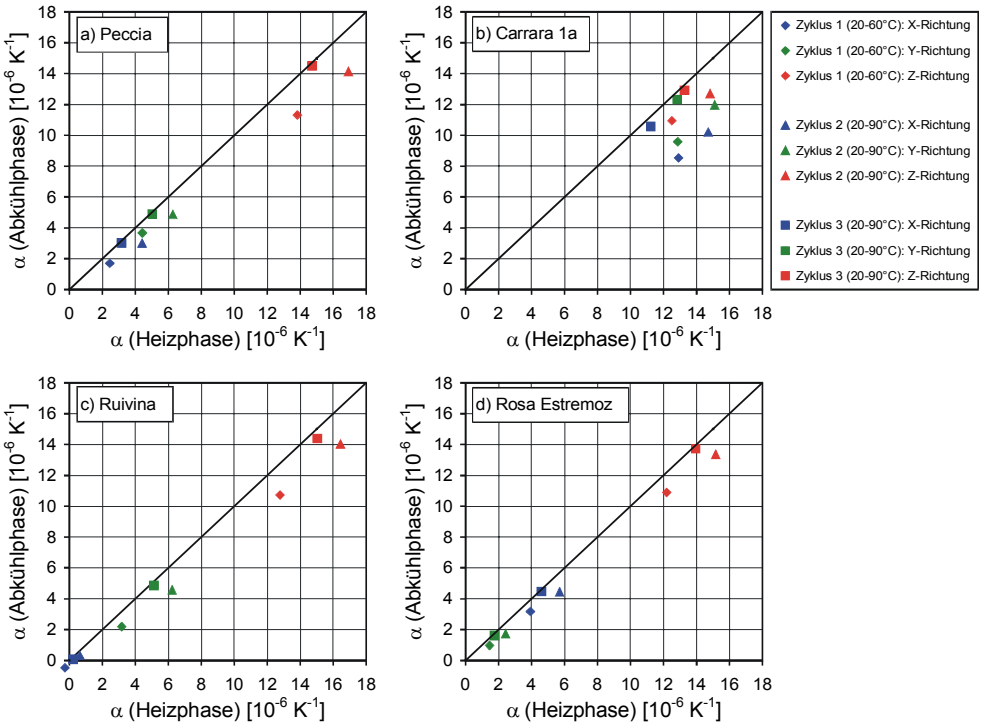


Abb. 6.5: Ausdehnungskoeffizienten α der Proben a) Peccia, b) Carrara 1a, c) Ruivina und d) Rosa Estremoz, berechnet jeweils aus den Temperaturintervallen der Heiz- und Abkühlphasen im Dehnungsexperiment (vgl. Abb. 6.3 und Kap. 3.3.2.1). Die Diagonale markiert gleiche α-Werte aus Heiz- und Abkühlphase.

6.2 Gefügekontrollierte Restdehnung infolge thermischer Mikrorissbildung

Temperaturwechsel führen aufgrund des anisotropen thermischen Dehnungsverhalten der einzelnen Calcitkristalle in Verbindung mit einer natürlich vorhandenen „Missorientierung“ zwischen den einzelnen Kristallkörnern (Sage 1988, Tschegg et al. 1999, Weiss et al. 2002b) zu Zug-, Druck- oder Scherspannungen entlang von Korngrenzen (Abb. 6.6). In der Folge kann die Kohäsion im Kornverband überschritten werden, was während des Aufheizens zum Aufreißen inter- und intrakristalliner Flächen und letztendlich zu einer Längenzunahme führt, welche irreversibel ist und auch nach Erreichen der Ausgangstemperatur als Restdehnung bestehen bleibt (Sage 1988, Franzini 1995, Bortz 1999). Dieser Prozess des penetrativen Risswachstums im Marmor geht einher mit der Bildung neuer und der Weitung bereits vorhandener Mikrorisse (Rüdrich et al. 2001, Weiss et al. 2002b). Er ist direkt verknüpft mit einer Entfestigung des Materials. Somit kann die Intensität der Restdehnung als Folge des Einwirkens einer bestimmten Temperatur als Maß für die Anfälligkeit gegenüber thermischer Beanspruchung betrachtet werden. Die Restdehnung kann dabei sowohl zwischen

einzelnen Marmortypen als auch in verschiedenen Richtungen eines Marmors sehr unterschiedlich sein.

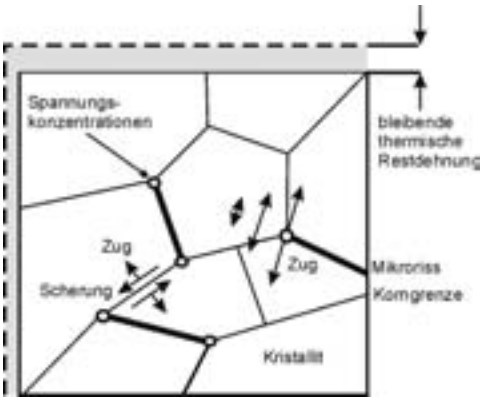


Abb. 6.6: Prinzip der Bildung einer Restdehnung als Folge thermischer Spannungen und daraus resultierender Mikrorissbildung im Marmor (aus Sage 1988).

Die permanenten Längenänderungen aus den Dehnungskurven in Abb. 6.3 sind in Abb. 6.7 mit ihrem Anteil aus den einzelnen Temperaturzyklen dargestellt. Zusätzlich zu den drei Hauptrichtungen (X, Y, Z) sind die Restdehnungen in den diagonalen Zwischenrichtungen XY, XZ und YZ ablesbar um sicherzustellen, dass mit vollständiger Ermittlung des Verformungstensors (vgl. Kap. 3.3.2.1) auch tatsächlich die Extrema der Restdehnung erfasst wurden. Die Gesamtlänge eines Balkens zeigt die Restdehnung nach Durchlaufen dreier Heizzyklen unter trockenen Bedingungen (vgl. Kap. 3.3.2.1).

Demnach ist am Beispiel der vier aufgeführten Marmortypen generell eine Restdehnung festzustellen. Übereinstimmend mit den Beobachtungen aus Kap. 6.1 ist der Zuwachs der Restdehnung in Zyklus 2 aufgrund des größten thermischen Mikrorisswachstums zwischen 60 und 90 °C am stärksten ausgebildet. Nach erstmaligem Aufheizen auf 60 °C in Zyklus 1 ist die Restdehnung durchweg kleiner. Das wiederholte Aufheizen auf 90 °C im dritten Zyklus führt nur noch zu einer kleinen permanenten Längenänderung. Die Dehnung der Einzelkristalle wird hier durch die Mikrorisse aus der thermischen Vorschädigung größtenteils abgepuffert, so dass es kaum zu weiterem Wachstum von Mikrorissen kommt.

6.2.1 Anisotropie der Restdehnung

Alle vier dargestellten Beispiele weisen eine deutliche Richtungsabhängigkeit auf (Abb. 6.7). So ist beispielsweise für den Ruivina Marmor in X-Richtung eine Restdehnung von nur 0,04 mm/m, in Z-Richtung dagegen von 0,30 mm/m zu beobachten, was einen relativen Unterschied von mehr als Faktor 7 bedeutet. Es ist festzustellen, dass die Restdehnungsbeträge in den drei Hauptrichtungen der Marmore Peccia, Ruivina und Rosa Estremoz jeweils sehr gut mit dem Anstieg der Dehnungskurven in Abb. 6.3 bzw. entsprechend auch mit den Ausdehnungskoeffizienten in Abb. 6.5 korrelieren. In die Richtung, in der die thermische Dehnung am größten ist, bleibt auch die größte Restdehnung nach Wiederabkühlung zurück. Da die Dehnung wie-

derum von der Textur kontrolliert wird, bedeutet dies, dass sich thermisch induzierte Mikrorisse bevorzugt senkrecht zum c-Achsenmaximum herausbilden (vgl. Abb. 5.24a,d,e).

Die Probe Carrara 1a verhält sich dagegen vergleichsweise untypisch. Trotz der schwachen Textur (Intensität c-Achsenmaximum: 1,3 mrd, vgl. Abb. 5.24b) zeigt das Gestein eine ausgeprägte Anisotropie der Restdehnung, wobei das Minimum mit 0,24 mm/m im Gegensatz zu den vorhergehenden Beispielen ausgerechnet in Richtung des c-Achsenmaximums (= Z-Richtung) anzutreffen ist (Abb. 6.7b). Das Restdehnungs-Maximum befindet sich mit 0,55 mm/m in X-Richtung. Das Einfluss nehmende Gefügeelement ist in diesem Fall die Korngrenzenverteilung, welche beim Carrara 1a in Z-Richtung eine Vorzugsorientierung aufweist (vgl. Abb. 5.22b). Ein equilibriertes Korngefüge wie im vorliegenden Beispiel (vgl. Abb. 5.21b) entfestigt bei thermischer Beanspruchung bevorzugt entlang von Korngrenzen (Rüdrich 2003). Folglich ist die Häufigkeit thermisch induzierter Mikrorisse, also die Anzahl der Risse pro Längeneinheit, in Z-Richtung am niedrigsten, was entsprechend die kleinste Restdehnung in dieser Richtung zur Folge hat.

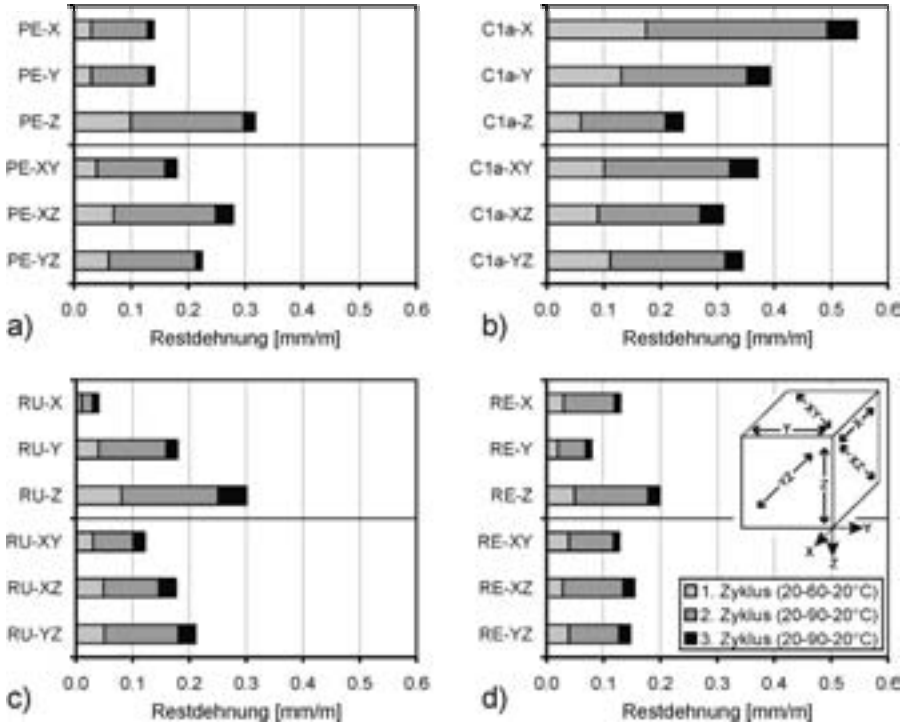


Abb. 6.7: Restdehnung der Proben a) Peccia, b) Carrara 1a, c) Ruivina und d) Rosa Estremoz aus sechs unabhängigen Richtungen nach Durchlaufen von drei Heizzyklen unter trockenen Bedingungen (vgl. Kap. 3.3.2.1).

Allgemein resultiert die Restdehnung aus der Risshäufigkeit sowie der Rissweite. Die Anisotropie der Risshäufigkeit wird in erster Linie vom Verteilungsmuster der Schwachzonen im Gestein kontrolliert, in denen die Kohäsion des Kornverbandes

reduziert ist. Das sind bei schwach verzahnten Korngefügen primär die Korngrenzen und bei intensiverer Kornverzahnung auch zunehmend intrakristalline Flächen wie z.B. Zwillingslamellen, deren Verteilung wiederum von der Textur gesteuert sein kann (Rüdrich 2003). Die Anisotropie der Rissweitung wird dagegen maßgeblich von Richtungsunterschieden in der Dehnungsrate des Marmors hervorgerufen und steht somit unter dem Einfluss der Textur (vgl. Kap. 6.1).

Die Verteilungsmuster von Risshäufigkeit und Rissweite können sich in ihrer Wirkung auf die Anisotropie der Restdehnung gegenseitig verstärken wie im Beispiel der Marmore Peccia, Ruivina und Rosa Estremoz (Abb. 6.8a) oder gegenläufig überlagern, so dass entweder beide Effekte sich aufheben und die Restdehnung isotrop ist, oder ein Effekt dominiert und den anderen überprägt. Letzteres ist am Beispiel des Carrara 1a zu beobachten, wo die Korngrenzenorientierung (→Risshäufigkeit) die Anisotropie der Restdehnung kontrolliert und die nur schwach ausgebildeten Textur (→Rissweite) kaum eine Rolle spielt (Abb. 6.8b).

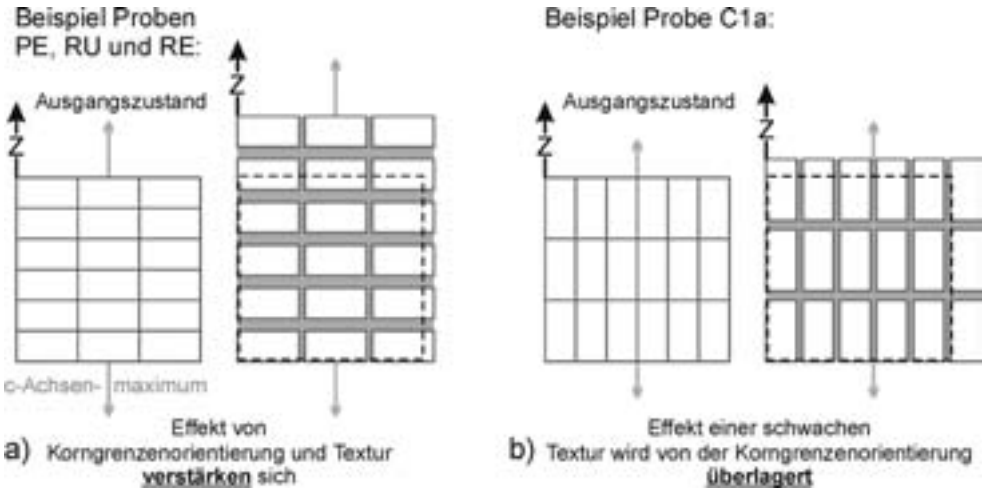


Abb. 6.8: Schema der Herausbildung anisotroper Restdehnung durch das Zusammenwirken der anisotropen Verteilung von Risshäufigkeiten und Rissweiten a) bei sich verstärkenden Anisotropien und b) bei gegenläufiger Überlagerung der Anisotropien, wenn der Effekt der Korngrenzenorientierung dominiert (Erläuterung s. Text).

6.2.2 Intensität der Restdehnung

Die Intensität der Restdehnung als Indikator für die Sensibilität eines Marmors gegenüber thermischer Beanspruchung kann nicht auf einzelne Gefügemerkmale zurückgeführt werden. Vielmehr wirken mehrere Gefügeparameter im komplexen Zusammenspiel auf die Restdehnung ein wie zum Beispiel die Korngrenzengeometrie, die Korngröße oder die Textur (Leiss & Weiss 2000, Zeisig et al. 2002). In Abb. 6.9 sind die Restdehnungen und deren richtungsabhängige Variabilität für die hier untersuchten Marmore vergleichend dargestellt. Das Spektrum reicht von 0,04 mm/m für das Minimum des Ekeberg Marmors bis zum Maximum der Probe Carrara 1a bei

0,55 mm/m. Es zeigt sich, dass die Unterschiede, die auf Richtungsabhängigkeiten basieren, oft eine größere Bandbreite abdecken als die Unterschiede zwischen den einzelnen Marmortypen selbst.

Als wichtiger Einflussparameter auf die Gefügeentfestigung von Marmor, die ihr zu Grunde liegende Bildung von thermisch induzierten Mikrorissen und der damit verbundenen Restdehnung gilt die Korngrenzengeometrie (z.B. Royer-Carfagni 1999b). Glatte Korngrenzen können als Schwächezonen leichter geöffnet und geweitet werden als verzahnte. Entsprechend sollte ein polygonales Korngefüge eine höhere Restdehnung aufweisen als eines mit irregulären Korngrenzen. In der Tendenz trifft dies auch auf die untersuchten Proben zu. Die Proben Carrara 1a und 1b als einzige mit ausgeprägt glatten Korngrenzen (vgl. Tab. 5.1) zeigen die höchsten Restdehnungen, wogegen beispielsweise die Probe Carrara 4 mit teilweise amöboiden Korngrenzen im unteren Bereich rangiert (Abb. 6.9). Für Proben im Übergangsbereich ist der Einfluss der Korngrenzengeometrie hier jedoch schwer nachzuweisen.

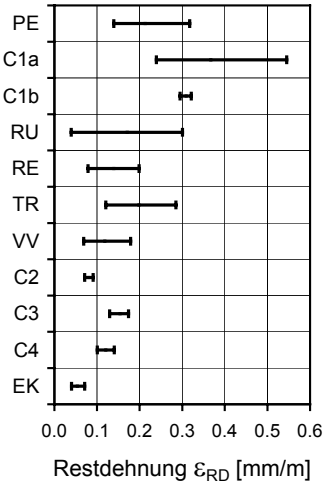


Abb. 6.9: Richtungsabhängige Variabilität der Restdehnung der untersuchten Marmore. Die Enden der Balken ergeben sich durch die Extrema aus jeweils mindestens drei Hauptrichtungen der experimentell ermittelten Restdehnungen nach drei Temperaturzyklen (vgl. Kap. 3.3.2.1).

Für die Korngröße wird angenommen, dass die thermische Schädigung mit kleiner werdenden Korndurchmessern aufgrund der höheren Rissdichte zunimmt (Tschegg et al. 1999). Dieser Effekt lässt sich an den untersuchten Proben nicht belegen und tritt hinter anderen Einflussparametern stark zurück (vgl. Zeisig et al. 2002, Rüdrich 2003, Koch & Siegesmund 2004b). So unterscheiden sich beispielsweise der Ruivina und der Peccia Marmor extrem in ihren mittleren Korngrößen von 0,4 mm und 2,3 mm, zeigen aber mit Maximalwerten von 0,30 mm/m und 0,32 mm/m vergleichbare Restdehnungen. Andererseits lassen sich für Marmore mit unterschiedlichen Restdehnungen wie dem Carrara 1a (max. 0,55 mm/m) und dem Ruivina (max. 0,30 mm/m) vergleichbare Korngrößen feststellen (0,3 und 0,4 mm mittlerer Korndurchmesser).

Ein Zusammenhang zwischen der Textur und der Intensität der Restdehnung lässt sich nicht nachweisen. Tschegg et al. (1999) geben an, dass ein hoher Grad der Textur sich günstig auf die thermische Schädigung auswirkt und eine schwache kristallographische Regelung aufgrund der größeren Missorientierung der Einzelkörner zueinander letztendlich zu größeren Restdehnungen führt. Weiß et al. (2002b) konnten zeigen, dass Marmore mit vergleichbar schwacher Textur deutliche Unterschiede in der Ent-

stehung thermischer Spannungen aufweisen können und die Interaktion zwischen allen Körnern berücksichtigt werden muss. Für den am stärksten texturierten Verde Viana Marmor einerseits (max. 4,2 mrd) lässt sich ein Restdehnungsbetrag im unteren Bereich ermitteln (Abb. 6.9). Der ebenfalls stark texturierte Ruivina Marmor erreicht dagegen Restdehnungen im oberen Bereich. Im Bereich schwacher Texturen lassen die beiden Marmorproben Carrara 1a und 1b mit den niedrigsten c-Achsenmaxima (1,3 und 1,2 mrd) tatsächlich die höchsten Restdehnungen erkennen. Gleichwohl weisen die ebenfalls schwach texturierten Proben Carrara 2, Carrara 4 und Ekeberg (1,3 / 1,4 / 1,4 mrd) relativ niedrige Restdehnungen auf.

Da das thermische Verwitterungsverhalten maßgeblich von den Einkristalleigenschaften der Hauptkomponente gesteuert wird, sollte sich eine vorwiegend dolomitische Zusammensetzung aufgrund der geringeren Einkristallanisotropie des Dolomits gegenüber Calcit (vgl. Kap. 2.1.2) günstig auf das Verwitterungsverhalten eines Marmors auswirken (vgl. Weiß et al. 2002b). Entsprechend zeigt der Ekeberg Marmor als einziger Dolomitmarmor im Vergleich zu den Calcitmarmoren mit max. 0,07 mm/m die geringste Restdehnung (Abb. 6.9).

6.2.3 Progressive Restdehnung unter feuchten Bedingungen

Um den Bedingungen am Bauwerk, denen ein Marmor in seiner Verwendung als Fassadenplatte ausgesetzt ist, Rechnung zu tragen, muss der Einfluss der Feuchtigkeit berücksichtigt werden. Es wird angenommen, dass der Prozess der Marmorverwitterung, der am Gebäude letztlich zur Verbiegung von Fassadenplatten führt, mit einer irreversiblen Dehnung des Materials einher geht. Es stellt sich daher die Frage, welche Klimaeinflüsse zu solch hohen Restdehnungsbeträgen führen wie beispielsweise am Gebäude der Universitätsbibliothek in Göttingen, wo die Expansion der Marmorplatten über 4 mm/m betragen kann (vgl. Kap. 4.2.3.4). Aus der Literatur sind noch wesentlich höhere Dehnungsbeträge bekannt (Grimm 1999). Der Einfluss der Feuchtigkeit nimmt dabei eine Schlüsselfunktion ein (Bucher 1956; Winkler 1996; Koch & Siegesmund 2004b; Grelk et al. 2004).

Feuchtigkeit alleine bewirkt indes noch keine Restdehnung. An den Proben Peccia und Carrara 1a wurde exemplarisch die hygrische Dehnung am Deutschen Bergbau-Museum in Bochum gemessen, wobei das Gestein 48 Stunden der Wassersättigung ausgesetzt war. Dabei konnte keine Expansion festgestellt werden, was mit Daten aus der Literatur übereinstimmt. Poschlod (1990) beispielsweise konnte für Marmore aus Carrara und Laas nach 24stündiger Wasserlagerung hygrische Dehnungen von 0,006 und 0,012 mm/m beobachten, was unter der Messgenauigkeit der hier verwendeten Apparatur von 0,020 mm/m liegt.

Zyklische Temperatureinwirkung unter trockenen Bedingungen führt nur zu einer limitierten Restdehnung, die auch bei weiteren Wiederholungen nicht weiter fortschreitet (Sage 1988). Um den Einfluss des Wassers beim Durchlaufen von Temperaturzyklen zu erfassen, wurden die Proben Peccia, Carrara 1a und Ruivina zunächst achtmal trocken und anschließend zehnmal nass auf 90 °C aufgeheizt (Abb. 6.10). Es zeigt sich, dass nur der erste Heizzyklus unter trockenen Bedingungen zu einem

beträchtlichen Zuwachs an Restdehnung führt. Das Fortschreiten der Restdehnung kommt zwischen dem zweiten (PE) und fünften Zyklus (GI) zum Erliegen. Unter dem Einfluss der Feuchtigkeit ändert sich die progressive Restdehnung fundamental. Sie hält kontinuierlich an, wobei der Zuwachs an Restdehnung nach zehn Nasszyklen beim Peccia Marmor relativ gering (0,25-0,59 mm/m) und nur geringfügig höher beim Ruivina Marmor (0,27-0,76 mm/m) ist. Die Probe Carrara 1a weist die vergleichsweise höchste Restdehnung zwischen 0,80 und 1,28 mm/m auf.

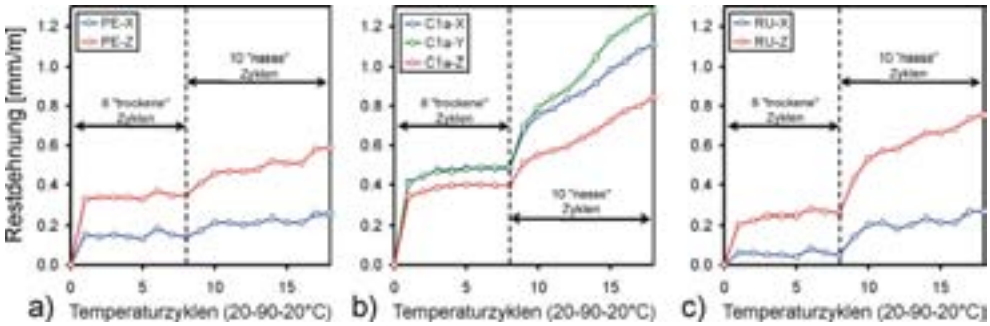


Abb. 6.10: Progressive Restdehnung und deren Richtungsabhängigkeit als Funktion der Anzahl der Heizzyklen unter trockenen (Zyklus 1 bis 8) und nassen Bedingungen (Zyklus 8 bis 18) der Marmore a) Peccia, b) Carrara 1a und c) Ruivina (aus Koch & Siegesmund 2004b).

Analog zum Verhalten der Restdehnung unter trockenen Bedingungen (vgl. Kap. 6.2.1) ist eine starke Anisotropie der progressiven Restdehnung unter thermo-hygrischem Einfluss festzustellen. Der Ruivina Marmor lässt in Z-Richtung nach zehn Nasszyklen eine dreifach höhere Restdehnung erkennen als in X-Richtung, wo die Probenlänge nach wenigen Nasszyklen annähernd stabil bleibt. Die Richtungsabhängigkeit beim Carrara 1a Marmor ist dagegen vergleichsweise weniger stark ausgeprägt.

Der Betrag der Restdehnung im trockenen Zustand korreliert nicht notwendigerweise mit jenem unter feuchten Bedingungen, was am Beispiel der Marmore Peccia und Ruivina in Z-Richtung deutlich wird (Abb. 6.10a,c). Die Probe RU-Z (0,20 mm/m nach einem Trockenzyklus) startet auf niedrigerem Niveau als PE-Z (0,33 mm/m). Das Verhältnis der permanenten Längenänderung nach zehn Nasszyklen ist jedoch umgekehrt: RU-Z (0,76 m/m) hat sich stärker gedehnt als PE-Z (0,59 mm/m).

Um die Wirkung der Feuchtigkeit bei thermischer Beanspruchung eines Marmors genauer zu untersuchen, wurde die Versuchsdurchführung aus Abb. 6.10 am Beispiel von vier Probezylindern des Carrara 1a Marmors modifiziert. Die Anzahl der Nasszyklen wurde auf 25 erhöht, wobei in den ersten fünf die Proben nach Durchlaufen eines Temperaturzyklus noch in Kontakt mit Wasser standen. Während der letzten 20 Zyklen waren die Proben nach Wiederabkühlung trocken (vgl. Kap. 3.3.2.1). Aus den Ergebnissen, dargestellt in Abb. 6.11, können zwei wesentliche Erkenntnisse abgeleitet werden:

(1) Die progressive Restdehnung hält auch nach 25 Nasszyklen unvermindert an und erreicht bereits unter Laborbedingungen Spitzenwerte von knapp unter 2 mm/m. Daraus wird vorstellbar, wie es nach Jahren der Exposition am Gebäude zu hohen

Dehnungsraten von Marmor kommen kann, wobei das Material in-situ zwar einer geringeren Intensität von thermo-hygrischen Verwitterungszyklen, dafür aber einer hohen Anzahl solcher ausgesetzt ist.

(2) Der Feuchtigkeitsgehalt in der Probe nach einem Temperaturzyklus beeinflusst offensichtlich die Verwitterungsrate. Die Dehnungskurve in Abb. 6.11 wird nach 5 Zyklen immer flacher, solange das Material im ständigen Kontakt mit Wasser bleibt. Sobald die Proben während der Heizphase trocken laufen, beschleunigt die Dehnungsrate und hält ungebremst an.

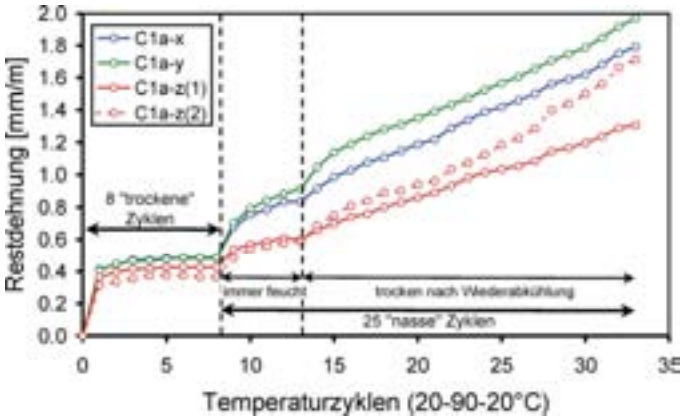


Abb. 6.11: Progressive Restdehnung des Marmors Carrara 1a als Funktion der Anzahl der Heizzyklen unter trockenen (Zyklus 1 bis 8) und nassen Bedingungen (Zyklus 8 bis 33). Von Zyklus 8 bis 13 verbleiben die Proben permanent feucht, von Zyklus 13 bis 33 laufen sie während der Heizphase trocken (aus Koch & Siegesmund 2004b).

Das thermische Längenänderungsverhalten unter feuchten Bedingungen hebt somit deutlich die Schlüsselrolle hervor, die Wasser beim Verwitterungsprozess an Marmorfassaden einnimmt.

6.3 Anisotropie und Intensität der Plattenverbiegung

Im Nachfolgenden soll geprüft werden, ob die unter Laborbedingungen durch Temperatur- und Feuchteeinwirkung künstlich initiierte Verbiegung von Marmorplatten (vgl. Kap. 3.3.2.4) ähnliche Gefügeabhängigkeiten aufweist wie die progressive Restdehnung unter feuchten Bedingungen. Dementsprechend sollten vergleichbare Anisotropien und Intensitätsunterschiede zu beobachten sein. Zu diesem Zweck wurden die plattenförmigen Probekörper jeweils in verschiedenen Orientierungen derart aus den Probeblöcken der Marmore Peccia, Carrara 1 und Ruivina präpariert, dass ihre Längsachsen mindestens mit den Richtungen maximaler und minimaler Dehnung (vgl. Kap. 6.1 und 6.2) übereinstimmen. Davon ausgehend, dass die Plattenverbiegung im Laborexperiment durch Unterschiede in der permanenten Längenänderung auf der Ober- und Unterseite der Probekörper hervorgerufen wird, sollten progressive Restdehnung und Verbiegung konform gehen.

Die Ergebnisse in Abb. 6.12 lassen für die drei untersuchten Marmortypen eine konvexe, nach oben gerichtete Verbiegung erkennen mit Ausnahme des Ruivina Marmors, der sich in den ersten Temperaturzyklen zunächst konkav verformt. Für alle drei Marmore ist eine deutliche Richtungsabhängigkeit feststellbar. So zeigt der Peccia Marmor (Abb. 6.12a) eine langsame, aber kontinuierliche Verbiegung, die nach 40 Zyklen in Z-Richtung (parallel zum c-Achsenmaximum) mit 0,78±0,20 mm/m etwa doppelt so hoch ist wie in X-Richtung (senkrecht zum c-Achsenmaximum) mit 0,41±0,15 mm/m. Beim Ruivina Marmor ist die Biege-Anisotropie noch stärker ausgeprägt (Abb. 6.12c). Während die Verbiegung in X-Richtung nach etwa 10 Zyklen bereits zum Stillstand gelangt, setzt sie sich in Z-Richtung mit dreifach höherer Intensität fort (1,01±0,14 mm/m in Z-Richtung, 0,36±0,11 mm/m in X-Richtung). Marmor Carrara 1a verformt sich von Beginn an sehr schnell (Abb. 6.12b) und zeigt einen hohen Verbiegungsgrad nach 40 Zyklen, der in X-Richtung mit 1,72±0,10 mm/m höher ist als in Z-Richtung (1,23±0,30 mm/m).

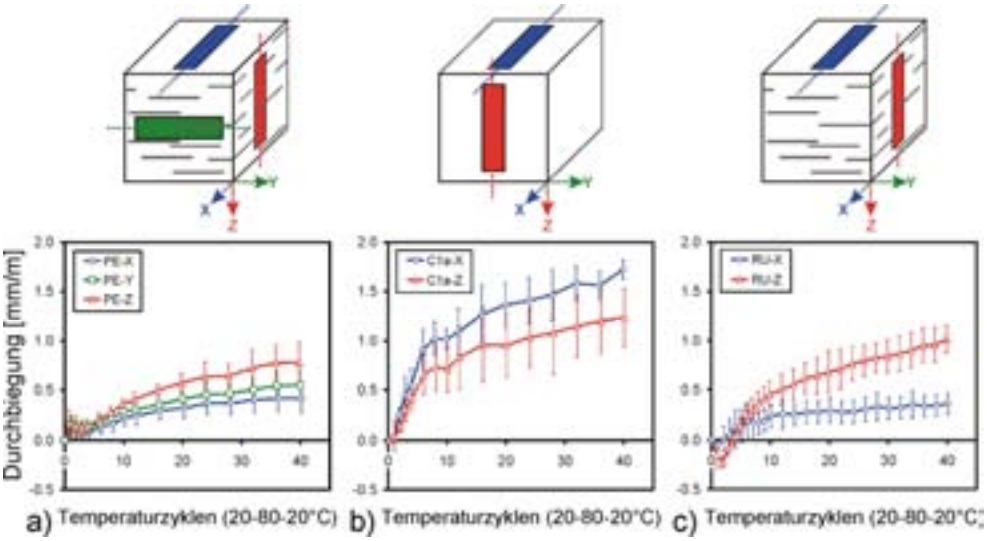


Abb. 6.12: Durchbiegung von Marmorplatten als Funktion der Anzahl von Temperaturzyklen der Marmore a) Peccia, b) Carrara 1a und c) Ruivina (aus Koch & Siegesmund 2004b). Die Kurven geben den mittleren Verlauf von jeweils drei Probekörper der gleichen Schnittlage wieder. Die Fehlerindikatoren markieren die Standardabweichung. Die Würfel stellen schematisch die Orientierung der Probekörper dar, deren Farbe mit den Kurven korrespondiert.

Die Intensität- und Richtungsunterschiede der Durchbiegung stimmen in hohem Maße mit den Ergebnissen aus der Restdehnung unter Feuchteeinfluss (vgl. Abb. 6.10) überein. Werden jeweils die Endwerte aus Abb. 6.10 (progressive Restdehnung nach 10 Nasszyklen) und Abb. 6.12 (Durchbiegung nach 40 Zyklen) miteinander verglichen (PE, C1a und RU jeweils in X- und Z-Richtung), ist ein linearer Zusammenhang mit einem hohen Korrelationskoeffizienten von r = 0,99 zu ermitteln (Abb. 6.13).

Das legt Nahe, dass die Plattenverbiegung ein Indikator für die Restdehnung und damit für die Entfestigung des Korngefüges durch thermisch und hygrisch induzierte

Mikrorisse ist. Sie wird somit von den gleichen Gefügeparametern kontrolliert, die im Dehnungsverhalten eine Rolle spielen (vgl. Kap. 6.2). Ihre Anisotropie wird demnach von der Textur sowie der Korngrenzenorientierung gesteuert.

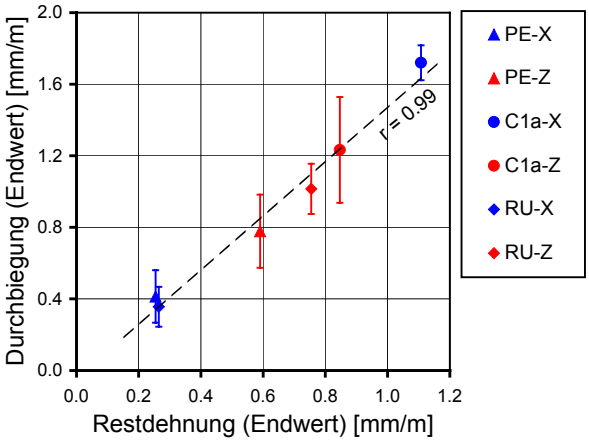


Abb. 6.13: Zusammenhang zwischen thermo-hygrisch induzierter Restdehnung und Plattenverbiegung. Es sind die Endwerte aus Abb. 6.10 und Abb. 6.12 miteinander korreliert. Die Regressionsgerade (gestrichelte Linie) und der Korrelationskoeffizient (r) sind gegeben.

7 Verwitterungsbedingte Änderung petrophysikalischer Eigenschaften

An den Prismen aus dem Biegetest (vgl. Kap. 3.3.2.4 und Kap. 6.3) wurden nach 40 Temperaturzyklen die Kennwerte des Porenraums und der Festigkeit untersucht und mit den Ergebnissen am bruchfrischen Material verglichen. Ziel war es, die Veränderungen wichtiger verwitterungssensibler petrophysikalischer Eigenschaften im Zuge künstlicher Verwitterung zu charakterisieren. Die Ergebnisse sollen mit den Veränderungen an der Fassade vergleichend interpretiert werden (Kap. 9).

7.1 Porenraumänderung

Die verwitterungsbedingte Porenraumänderung wurde exemplarisch an den Proben Peccia, Carrara 1a und Ruivina erfasst. Dabei sollte die Veränderung während der künstlichen Verwitterung nach 40 Zyklen im Biegetest (vgl. Kap. 3.3.2.4) ermittelt werden. Zu diesem Zweck wurden die Porosität und die Porenradienverteilung sowohl an bruchfrischen Proben als auch an den künstlich verwitterten Proben aus dem Biegetest (vgl. Kap. 3.3.2.4) gemessen. Die beiden Parameter lassen die Veränderung der Größe und des Volumens von thermo-hygrisch induzierten Mikrorissen erkennen, die während der 40 Temperaturzyklen herausgebildet werden. Der Biegetest wurde mit zwei Probensätzen mit unterschiedlichen Bestimmungstemperaturen (40 x 80 °C und 40 x 120 °C) durchgeführt, um den Temperatureinfluss auf die Intensität der Gefügeauflockerung zu ermitteln. Für die Bestimmung der Porosität kamen zwei Verfahren zum Einsatz: Auftriebswägung (vgl. Kap. 3.3.4.1) und Quecksilberporosimetrie (vgl. Kap. 3.3.4.2). Die Porositäten aus beiden Methoden sollen einander gegenübergestellt und verglichen werden.

Zunächst kann festgestellt werden, dass die Porositätswerte aus der Quecksilberporosimetrie generell etwas höher, bei der Probe Carrara 1a sogar deutlich über denen aus der Auftriebswägung liegen (Tab. 7.1). Es muss vermutet werden, dass bei der Präparation von Probezylinder für das Quecksilberporosimeter (vgl. Kap. 3.3.4.2) zusätzliche Rissporositäten entstehen, die vor allem bei Marmoren mit schwachen Kornbindungskräften oder vorgeschädigten Marmoren zum Tragen kommen (vgl. Ausführungen zu Abb. 8.9b Kap. 8.1.3). Entsprechend lässt sich bei der Probe C1a mit glatten Korngrenzen nach intensiver künstlicher Verwitterung von 40 x 120 °C die größte Diskrepanz zwischen beiden Methoden beobachten (1,15 und 2,14 %).

Die Porosität und die Größe der Porenradien sind nicht mit der Korngröße gekoppelt. Die feinkörnige Probe Carrara 1a weist eine höhere initiale Porosität (0,46 %) und ein höheres Porenradienmaximum auf (um 0,3 µm; Abb. 7.1b) als der mittel- bis grobkörnige Peccia Marmor (0,33 %; Maximum bei 0,1 µm; Abb. 7.1a). Der bruchfrische Ruivina Marmor rangiert mit einer Porosität unter 0,2 % extrem niedrig nahe am Auflösungslimit beider Messverfahren.

Tabelle 7.1: Porosität am Beispiel dreier untersuchter Marmortypen im bruchfrischen Zustand und nach 40 Temperaturzyklen unter künstlicher Verwitterung im Biegetest mit Bestimmungstemperaturen von 80 und 120 °C, gemessen jeweils mittels Auftiebswägung und Quecksilberporosimetrie. n: Anzahl von Einzelmessungen. Stabw.: Standardabweichung.

	bruchfrisch					40 x 80°C					40 x 120°C				
	Auftriebswägung			Quecksilber-Porosimetrie		Auftriebswägung			Quecksilber-Porosimetrie		Auftriebswägung			Quecksilber-Porosimetrie	
	n	Mittelwert	Stabw.	n	Mittelwert	n	Mittelwert	Stabw.	n	Mittelwert	n	Mittelwert	Stabw.	n	Mittelwert
PE	5	**0.33**	0.02	2	**0.33**	11	**0.40**	0.03	2	**0.50**	8	**0.70**	0.07	2	**0.93**
C1a	8	**0.46**	0.03	2	**0.83**	8	**0.61**	0.02	2	**0.78**	4	**1.15**	0.17	2	**2.14**
RU	6	**0.05**	0.03	2	**0.18**	15	**0.29**	0.02	2	**0.37**	16	**0.54**	0.14	2	**0.64**

Nach 40 Temperaturzyklen im Biegetest mit einer Bestimmungstemperatur von 80 °C nimmt die Porosität bei allen Proben nur leicht zu, während nach 40 Zyklen bis 120 °C ein deutlicher Porositätszuwachs festzustellen ist (Tab. 7.1). Das Porenradienmaximum verschiebt sich dabei generell in den Bereich größerer Poren (Abb. 7.1).

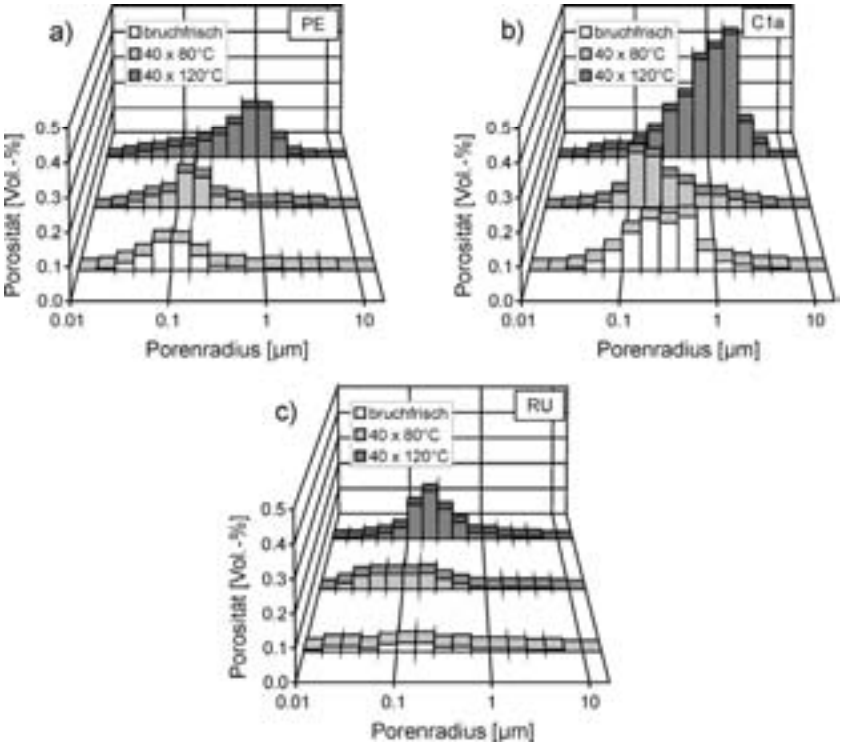


Abb. 7.1: Porenradienverteilung am Beispiel dreier untersuchter Marmore jeweils im bruchfrischen Zustand und zweimal nach 40 Temperaturzyklen im Biegetest mit Bestimmungstemperaturen von 80 und 120 °C: a) Peccia Marmor (PE), b) Marmor Carrara 1a (C1a), c) Ruivina Marmor (RU).

Am temperaturanfälligsten zeigt sich die Probe Carrara 1a, deren Porosität nach 40 x 120 °C mit 0,54 Prozentpunkten Unterschied (Auftriebswägung) den stärksten Zuwachs gegenüber der Porosität nach 40 x 80 °C aufweist. Dies drückt sich auch in einer extremen Verschiebung des Porenradienmaximums von knapp über 0,1 µm nach etwa 2 µm aus (Abb. 7.1a), wenngleich hier eine mögliche Verzerrung durch eine mechanisch induzierte Rissbildung bei der Präparation (s. oben) zu bedenken ist.

7.2 Quantifizierung thermisch induzierter Mikrorisse mittels Ultraschallanalyse

Nachdem an Kugelproben die dreidimensionale Verteilung der Kompressionswellengeschwindigkeit (V_P) im wassergesättigten und trockenen Zustand bestimmt worden war (vgl. Kap. 3.3.1.1 und Kap. 5.2.4), wurden die Marmorkugeln für fünf Stunden auf 90 °C erhitzt. Anschließend wurde die V_P-Verteilung an den thermisch beanspruchten Proben ein weiteres Mal im trockenen Zustand ermittelt (V_{Pdry} (90°C)). Der Vergleich zwischen den Polfiguren für V_{Pdry} und V_{Pdry} (90°C), dargestellt als Differenzpolfigur von ΔV_{Ptherm} (Abb. 7.2), erlaubt die Identifikation der Orientierung und Effektivität bzw. Rissdichte von thermisch induzierten Mikrorissen (vgl. Weiß et al. 2002a).

Nach nur einmaligem Aufheizen kann bei allen untersuchten Marmoren eine Geschwindigkeitsreduktion festgestellt werden, die bei der Probe Carrara 1b einen Maximalwert von 1,5 km/s erreicht (Abb. 7.2). Die untersuchten Proben zeigen sich dabei unterschiedlich sensibel gegenüber thermischer Behandlung. Während die Proben Peccia und Rosa Estremoz eine relativ niedrige Geschwindigkeitsdifferenz von bis zu 0,7 km/s aufweisen, liegen die ΔV_{Ptherm}-Werte beim Ruivina Marmor mit maximal 1,1 km/s höher und beim Carrara 1b Marmor sogar etwa doppelt so hoch. Dabei ist bei allen Proben eine deutliche Anisotropie in der Verteilung thermisch induzierter Mikrorisse zu erkennen.

Hierbei ist zu beobachten, dass die anisotropen ΔV_{Ptherm}-Verteilungsmuster der jeweiligen Marmortypen gut mit den Differenzverteilungsmuster von ΔV_P in Übereinstimmung zu bringen sind, welche die räumliche Dichteverteilung präexistierender Mikrorisse darstellen (vgl. Abb. 5.26). Das heißt, dass vorher bereits vorhandene Mikrorisssysteme bevorzugt aktiviert und in ihrer Ausprägung intensiviert werden, was folglich neben einer V_P-Reduktion einen Anstieg der V_P-Anisotropie nach sich ziehen muss. Entsprechend ist bei allen Proben eine höhere Anisotropie von V_{Pdry} (90°C) gegenüber V_{Pdry} zu beobachten (Abb. 7.2). Der größte Unterschied ist in dieser Hinsicht beim Ruivina Marmor festzustellen, dessen V_P-Anisotropie im trockenen Zustand nach einmaligem Aufheizen von 20 auf 30 % anwächst. Hier scheint neben einer Entfestigung der Korngrenzen, die bevorzugt parallel zur Foliation orientiert sind, vor allem die Aktivierung transgranularer Risse, welche ebenfalls parallel zur Foliationsebene verlaufen (vgl. Abb. 5.11b), zu einer Reduktion von V_P in Z-Richtung zu führen und damit zu einem Anstieg der Anisotropie beizutragen.

Bei der Bewertung von Ultraschallgeschwindigkeiten von Fassadenplatten sind die hier ermittelnden Ergebnisse zu berücksichtigen. So kann eine Fassadenplatte beispielsweise aus Peccia oder Ruivina Marmor im leicht verwittertem Zustand, der dem hier

künstlich erzeugten entspricht, in Abhängigkeit von der Schnittlage der Platte bzw. von der Durchschallungsrichtung nach der Schadentstyp-Klassifikation von Köhler (1988) sowohl als bruchfrisch (>5 km/s) oder als gerade noch in befriedigendem Zustand befindlich (3-4 km/s) bewertet werden – je nachdem, ob parallel oder senkrecht zur Foliation gemessen wird (Abb. 7.2a,c).

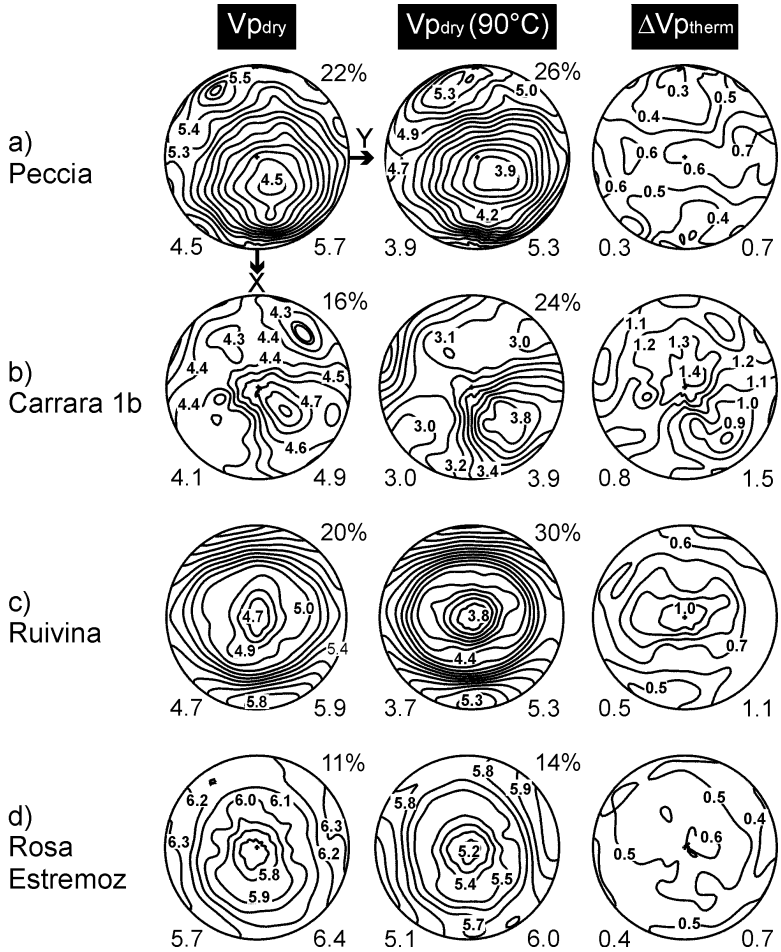


Abb. 7.2: V_P-Verteilung von Kugelproben im trockenen Zustand vor (V_{Pdry}) und nach thermischer Beanspruchung (V_{Pdry} (90°C)) sowie die Geschwindigkeitsdifferenzen aus beiden Zuständen (ΔV_{Ptherm} ; untere Halbkugel; stereographische Projektion). Die Orientierung ist in der Polfigur links oben markiert. Die Z-Richtung steht senkrecht zur Papierebene. Die Zahlen unter den einzelnen V_P-Polfiguren kennzeichnen die Extrema der Kompressionswellengeschwindigkeiten in km/s. Die Prozentwerte geben die Anisotropie von V_{Pdry} bzw. V_{Pdry} (90°C) an.

7.3 Entfestigung von Marmor bei künstlicher Verwitterung

Die Biegefestigkeit (vgl. Kap. 3.3.3.1) wurde richtungsabhängig sowohl an bruchfrischen Proben als auch an thermo-hygrisch beanspruchten Probekörpern aus dem Biegetest (vgl. Kap. 3.3.2.4) ermittelt. Nach 40 Temperaturzyklen wurden hierbei aus jedem Biegetest-Prüfkörper vier Quader für die Bestimmung der Biegefestigkeit präpariert. In Übereinstimmung mit anderen Autoren (z.B. Jornet & Rück 2000, Jornet et al. 2002) nimmt die Biegefestigkeit wie zu erwarten unter künstlicher Verwitterung ab (Abb. 7.3). Abhängig vom Marmortyp unterscheiden sich dabei sowohl die initiale Festigkeit als auch die verwitterungsbedingte Entfestigung in Intensität und Anisotropie sehr deutlich.

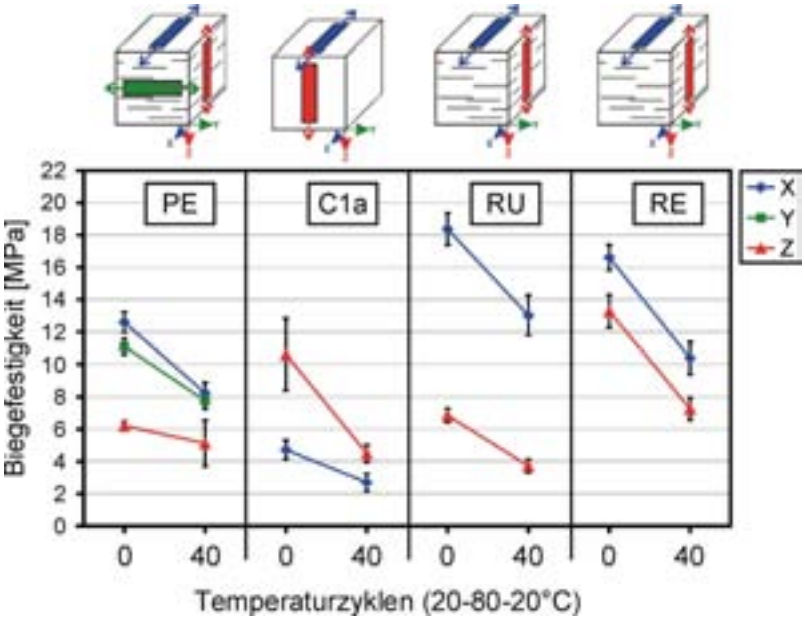


Abb. 7.3: Richtungsabhängig bestimmte Biegefestigkeit am Beispiel von vier Marmortypen im bruchfrischen Zustand (0 Temperaturzyklen) und nach 40 Zyklen künstlicher Verwitterung im Biegetest. Die Farbe der Datenpunkte korrespondiert mit der Orientierung der Prüfkörper und der resultierenden Richtung der Zugkraft wie oben schematisch dargestellt. Die Fehlerindikatoren markieren die Standardabweichung. Jedem Datenpunkt liegen mindestens vier Einzelmessungen zugrunde.

Der Ruivina Marmor zeigt die höchste Anisotropie ($A_{Rtf} = (R_{tf\ max} - R_{tf\ min}) / R_{tf\ max} * 100$ [%]). Die Biegefestigkeit markiert hier in X-Richtung den höchsten Wert, der etwa dreimal höher ist als in Z-Richtung. Die mit Abstand niedrigste Anisotropie zeigt der Rosa Estremoz Marmor im bruchfrischen Zustand mit nur etwa 20 % Unterschied zwischen den Richtungen. Im Zuge künstlicher Verwitterung sinkt die Anisotropie bei den Proben Peccia und Carrara 1a von 51 auf 38 % und von 55 auf 40 %, während sie bei den Proben Ruivina und Rosa Estremoz von 63 auf 71 % und von 20 auf 30 % ansteigt.

Die stärkste relative Entfestigung kann mit 58 % bei der Probe Carrara 1a in Z-Richtung beobachtet werden. Demgegenüber ist die relativ geringste Festigkeitsreduktion mit 17 % beim Peccia Marmor in Z-Richtung festzustellen. Es scheint, als wenn die Höhe der Verbiegung im Biegetest (vgl. Kap. 6.3) mit der initialen Festigkeit und der Resistenz gegen thermo-hygrische Verwitterung verknüpft ist. Der Verbiegungsgrad ist hoch wenn die Biegefestigkeit nach 40 Zyklen gering ist und umgekehrt (vgl. Abb. 6.12). So zeigt die Probe Carrara 1a nach 40 Temperaturzyklen in X-Richtung gleichzeitig die höchste Verbiegung (1,72 mm/m) sowie die geringste Festigkeit (2,7 MPa). Dagegen weist der Ruivina Marmor in X-Richtung nach künstlicher Verwitterung sowohl die geringste Durchbiegung (0,36 mm/m) als auch die höchste Festigkeit (13,0 MPa) auf. Da die Durchbiegung in hohem Maße mit der progressiven Restdehnung korreliert (vgl. Abb. 6.13), gilt dieser Zusammenhang für beide Verformungsparameter. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass die Kohäsion im Kornverband ganz wesentlich die Intensität der Verformung (Expansion, Durchbiegung) kontrolliert.

Des Weiteren zeigen die Ergebnisse, dass innerhalb eines Marmortyps der Entfestigungsbetrag in jener Richtung am geringsten ist, in welcher die niedrigste Biegefestigkeit festzustellen ist. Dies ist vor allem am Beispiel des Peccia Marmors gut zu beobachten (Abb. 7.3), wo das Abfallen der Entfestigungsgeraden von oben nach unten flacher wird. Die Marmore entfestigen also am wenigsten in der Richtung, in der der größte Längenzuwachs durch thermisch bzw. thermo-hygrisch initiierter Mikrorissbildung festzustellen ist (vgl. Abb. 6.7 und 6.10). Das weist darauf hin, dass die Entfestigung im Wesentlichen auf der Weitung präexistierender Mikrorisse beruht, weil Rissneubildungen sonst zu einer stärkeren Festigkeitsreduktion hätten führen müssen. Weiterhin wird deutlich, dass die Entfestigung mit zunehmender Rissweitung abnimmt.

8 Bauwerksuntersuchungen: Weiterführende Untersuchungen an demontierten Fassadenplatten

Aus wissenschaftlicher Sicht stellt sich die Frage, welche Relevanz die im Labor gewonnenen Erkenntnisse zum Material- und Verwitterungsverhalten von Marmor für dessen Verwendung als Fassadenverkleidung haben. Zu diesem Zweck wurden von den in Kap. 4 vorgestellten Gebäuden Marmorplatten demontiert, um im Rahmen weiterführender Untersuchungen sowohl die Laborergebnisse aus Kap. 5, 6 und 7 zu überprüfen als auch allgemeine Zusammenhänge aufzuzeigen und einzelne ausgewählte Fragestellungen zu erörtern. Im Besonderen wird dabei der Einfluss des Marmorgefüges auf die gesteinstechnischen Eigenschaften und auf das in-situ Verhalten des Fassadenmarmors am Gebäude hervorgehoben. Die beiden untersuchten Marmortypen aus Peccia (Schweiz) und Carrara (Italien) sind aufgrund ihrer sehr unterschiedlichen Materialeigenschaften hierfür besonders geeignet. Sie entsprechen den in Kap. 5 vorgestellten Typen „Peccia“ und „Carrara 1“.

Ein wesentlicher Punkt ist die Überprüfung, inwieweit sich der Grad der Plattenverbiegung mit anderen verwitterungssensiblen Kenngrößen in Verbindung bringen lässt und somit als Indikator für die diagnostische Erfassung des Verwitterungszustandes der Marmorverkleidung geeignet ist. In diesem Zusammenhang sollen der Einfluss des Gefüges und die daraus resultierenden Richtungsabhängigkeiten im Hinblick auf zerstörungsfrei ermittelte Parameter wie Plattenverbiegung und Ultraschallgeschwindigkeit und nicht zerstörungsfrei ermittelte Kennwerte wie Biegefestigkeit und Ankerausbruchfestigkeit diskutiert werden.

Die hier nachfolgenden Ergebnisse stellen eine Basis zur Charakterisierung des Ist-Zustandes und des Schadenspotenzials dar und ermöglichen eine erste Einschätzung zur Langzeitstabilität des Fassadenmarmors.

8.1 Oeconomicum, Theologicum und Juridicum auf dem Campus der Universität Göttingen

Von jedem der drei Gebäude (vgl. Kap. 4.1) wurden jeweils drei Fassadenplatten, also insgesamt neun Platten, zum Zwecke weiterführender gesteinsphysikalischer Untersuchungen demontiert (Tab. 8.1). Die Platten wurden nach dem Grad ihrer Verformung und der Exposition ausgewählt, so dass von jedem Gebäude folgende Schädigungsgrade vertreten waren:

- Platten mit sehr schwacher oder praktisch keiner Durchbiegung von sonnengeschützten Bereichen wie der Nordfassade
- Platten mit einem mittleren Grad der Verbiegung von weniger geschützten Bereichen wie der Ost- oder Westfassade, die zu einem Teil des Tages der Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind
- Stark verbogene Platten von sehr exponierten Bereichen wie der Südfassade bzw. beim Theologicum der obersten Fassadenzeile der Ostfassade

An vier der am stärksten verbogenen Platten wurde zunächst die Geometrie der Plattenverbiegung untersucht und mit Ultraschallgeschwindigkeiten korreliert. An-

schließend wurden die Platten zersägt und die Probekörper für die mikrogefügekundlichen und petrophysikalischen Untersuchungen präpariert. Ziel war es, die Abhängigkeit verschiedener Kennwerte von der Plattendurchbiegung sowie die Beziehung einzelner Kennwerte zueinander aufzuzeigen.

Gebäude	Proben-kürzel	Grad der Durch-biegung	Durchbiegung [mm/m]	Exposition
Oecono-micum	O1	schwach	0.1	Nord, 2te Zeile
	O2	mittel	5.3	Ost, 3te Zeile
	O3	stark	12.9	Süd, 3te Zeile
Theologicum	T1	schwach	0.1	Nord, 2te Zeile
	T2	mittel	8.5	West, 3te Zeile
	T3	stark	17.6	Ost, 4te Zeile
Juridicum	J1	schwach	0.5	Nord, 3te Zeile
	J2	mittel	9.8	Ost, 2te Zeile
	J3	stark	21.2	Süd, 2te Zeile

Tabelle 8.1: Übersicht über demontierte Fassadenplatten der Gebäude Oeconomicum, Theologicum und Juridicum.

8.1.1 Verbiegungsgeometrie und räumliche Verteilung der Ultraschallgeschwindigkeit von Marmorplatten

Die Untersuchungen zur Verbiegungsgeometrie von Marmorplatten sollen Aufschluss darüber geben, welche Veränderungen bei dieser speziellen Form der Marmorverwitterung innerhalb der Fassadenplatte stattfinden und welche Rückschlüsse sich gegebenenfalls auf die Mechanismen ziehen lassen, die zur Verformung des Fassadenmarmors führen.

Darüber hinaus wurde die räumliche Verteilung der Kompressionswellengeschwindigkeit (V_P) an den am stärksten verformten Platten O3, T2, T3 und J3 erfasst. Da eine starke Textur wie die des Peccia Marmors (vgl. Kap. 5.2.3) die Anisotropie vieler Materialeigenschaften kontrolliert, soll der mögliche Einfluss der räumlichen Orientierung der Calcitkristalle in den Platten (beim Peccia Marmor eng verknüpft mit der Raumlage der Foliation; vgl. Kap. 5.2.3) auf die Verbiegegeometrie und das V_P-Verteilungsmuster überprüft werden.

<u>Verbiegungsgeometrie versus Verteilung der Ultraschallgeschwindigkeit</u>

Für die Charakterisierung der Platteneinwölbung wurde ein orthogonales Netz von 1,1 x 0,6 m bzw. 1,0 x 0,6 m Größe (Abb. 8.1) auf der Plattenoberfläche aufgetragen. Der Abstand der Netzpunkte zueinander betrug 10 cm. Die Eckpunkte dieses Netzes definierten eine ebene Referenzfläche. Mit Hilfe des Biegemeters (vgl. Abb. 3.8) wurden zunächst die Abstände der Randpunkte von der Referenzfläche gemessen, indem die Fußpunkte des Biegemeters auf den Eckpunkten des Messrasters platziert und die Randpunkte messtechnisch nacheinander erfasst wurden. Anschließend dienten die Randpunkte, deren Tiefe nun bekannt war, als Fußpunkte des Biegemeters, das

horizontal und vertikal nacheinander alle inneren Rasterpunkte abtastete. Mit einem einfachen Abgleich konnten auch die Abstände dieser Punkte von der ebenen Referenzfläche berechnet werden. Die sich ergebende Matrix wurde mit Hilfe einer Software als Isoliniendiagramm dargestellt, in welchem die Linien gleichen Abstands zur ebenen Referenzfläche sichtbar sind.

An den gleichen Rasterpunkten wurde die Kompressionswellengeschwindigkeit bestimmt, um ihre räumliche Verteilung über die Platte hinweg zu erfassen. Die Untersuchungen wurden mit dem Impuls-Laufzeit-Verfahren durchgeführt. Die Schwinger mit einer Eigenfrequenz von 0,5 MHz durchschallten als Sender- und Empfängerpaar die Platte an den vorbezeichneten Rasterpunkten senkrecht zur Oberfläche. Es sollte gezeigt werden, ob die räumliche Verteilung der Gefügeauflockerung mit der Geometrie der Plattenverbiegung korreliert. Darüber hinaus wird V_P generell für die Klassifizierung des Verwitterungszustandes verwendet (z.B. Köhler 1991; Weiss et al. 2000).

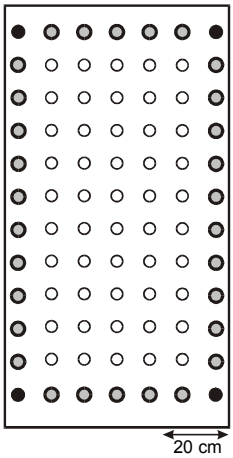


Abb. 8.1: Schematische Darstellung des orthogonalen Netzes zur Erfassung der Verbiegegeometrie und der räumlichen Verteilung der Kompressionswellengeschwindigkeit einer Fassadenplatte. Die Eckpunkte (schwarz) definieren eine ebene Referenzfläche. Die schwarzen und grauen Randpunkte fungieren als Fußpunkte für das Biegemeter.

Die Isoliniendiagramme zur Verbiegungsgeometrie der Platten (Abb. 8.2) lassen eine symmetrische und gleichmäßige Wölbung erkennen. Das Zentrum der stärksten Einwölbung befindet sich tendenziell leicht unterhalb der Plattenmitte (T2 und J3). Die Form der Isolinien variiert von kreisrund (Abb. 8.2a) bis leicht elliptisch, wobei die Ellipsen entweder vertikal (Abb. 8.2b,c) oder horizontal (Abb. 8.2d) gestreckt sein können. Die gleichmäßige, kreisrunde und zentrierte Verteilung der Isolinien der Plattte O3 geht einher mit einer Orientierung der Foliation parallel zur Plattenoberfläche (Abb. 8.2a), was in abgeschwächter Weise auch für die subparallele Schnittlage der Platte T3 gilt. In den Platten T2 und J3 mit eher dezentrierter und elliptischer Isolinienverteilung fällt die Foliation dagegen steil bis senkrecht relativ zur Plattenoberfläche ein. Eine Aussage über einen möglicherweise kausalen Zusammenhang dieser Beobachtungen kann aufgrund der kleinen Stichprobe nicht getroffen werden.

Die Kompressionswellengeschwindigkeit (V_P) rangiert bei den Platten O3 und T3 mit 2,2 – 3,2 km/s und 1,7 – 3,1 km/s in einem Bereich, der nach der Klassifikation von Köhler (1991) bereits einem mittleren Entfestigungsgrad mit granularer Absandung entspricht. Die deutlich höheren Werte für V_P der Platten T2 (3,6 – 4,5 km/s) und J3 (3,0 – 4,4 km/s) wurden parallel zur Foliation ermittelt. Aus den Laboruntersuchungen in Kap. 5.2.3 (vgl. Abb. 5.24a) ist bekannt, dass ein deutliches c-Achsenmaximum

der Calcitkristalle beim Peccia Marmor (2,7 mrd) senkrecht zur Foliation orientiert ist und die kristallographischen a-Achsen in der Foliationsebene eingeregelt sind. Es kann aufgrund der starken V_P-Anisotropie von Calcit in Kombination mit einer ausgeprägten Vorzugsorientierung der Kristallgitter im Gestein davon ausgegangen werden, dass ein Teil der Geschwindigkeitsunterschiede auf den Unterschied zwischen $V_P \parallel$ c-Achse von 5,71 km/s und $V_P \perp$ c-Achse von 7,73 km/s (Dandekar 1968) beruht (vgl. Abb. 2.1).

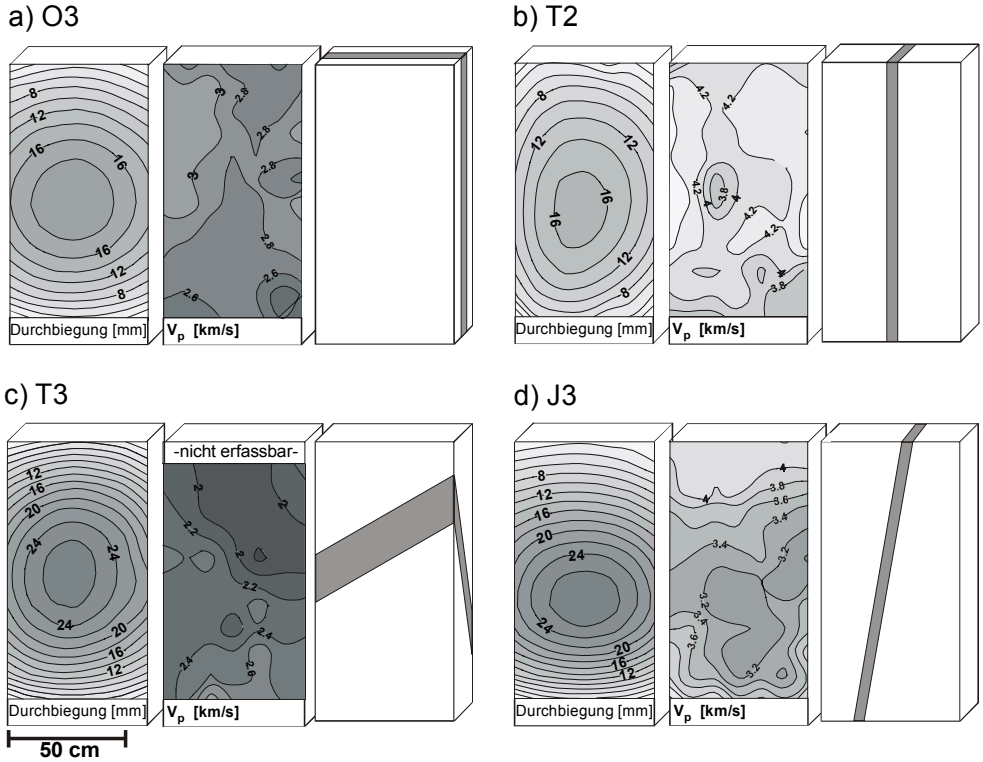


Abb. 8.2: Verbiegungsgeometrie (jeweils links), Verteilung der Kompressionswellengeschwindigkeit (jeweils mittig) und schematische Darstellung der Orientierung der Foliation (jeweils rechts) am Beispiel der Fassadenplatten a) O3, b) T2, c) T3 und d) J3.

Über diesen intrinsisch bedingten Effekt hinaus können weitere Faktoren wie präexistierende Mikrorisse parallel zur Foliation (vgl. Kap. 5.2.4.2) die Unterschiede von V_P in Abhängigkeit der Schnittlage noch verstärken (z.B. Weiß et al. 2002). Die Laboruntersuchungen in Kap. 7.2 zeigen darüber hinaus, dass die Gesamtgesteins-Anisotropie des Peccia Marmors im Zuge progessiver Verwitterung noch erhöht wird (vgl. Abb. 7.2a). Letztendlich sind also die Unterschiede in den Kompressionswellengeschwindigkeiten der vier untersuchten Platten weniger eine Folge unterschiedlicher Verwitterungszustände als vielmehr der Orientierung der Foliation zur Schnittlage der Marmorplatte. Dies ist vor allem dann zu berücksichtigen, wenn Ultraschallmessungen als zerstörungsfreie Untersuchungsmethode zur Charakterisierung des Verwitterungszustandes von Marmorplatten eingesetzt werden.

Eine Korrelation zwischen V_P-Verteilungsmusters und Verbiegegeometrie der Platten ist schwerlich zu ermitteln. Die V_P-Minima der Platten T2 und J3 stimmen jeweils mit den Maxima der Einwölbung überein. Die V_P-Verteilungsmuster von O3 und T3 sind dagegen kaum mit ihrer Verbiegegeometrie in Einklang zu bringen, so dass insgesamt ein Zusammenhang nicht hergestellt werden kann.

Charakter der Plattenkrümmung

Die Ergebnisse zur Untersuchungen der Plattengeometrie machen eine grundsätzliche Überprüfung möglich, ob das zur Quantifizierung der Durchbiegung verwendete Modell (vgl. Kap. 3.3.2.2) hinreichend ist und die realen Zustände widerspiegelt. Unter der Annahme, dass ein Längsschnitt durch eine gekrümmte Platte einem Kreissegment entspricht, soll über die vertikalen und horizontalen Mittellinien hinweg mit verschiedenen Messabständen L die Werte für die normierte Durchbiegung B errechnet werden.

Der Ansatz einer kreisrunden Krümmung wird durch die Ergebnisse im Wesentlichen bestätigt. Die überhöhten horizontalen und vertikalen Plattenquerschnitte in Abb. 8.3 zeigen einen parabelförmigen Verlauf, der durchaus in guter Annäherung als Kreissegment beschrieben werden kann (Abb. 8.3c).

Auffallend über eine leichte Asymmetrie hinaus, welche als natürliche Variation angenommen wird, verläuft der Längsschnitt durch die Platte J3 (Abb. 8.3a). Wie schon in Abb. 8.2d zu erkennen, liegt das Maximum der Einwölbung deutlich in der unteren Plattenhälfte. Die Ursache hierfür wird in der Befestigung durch seitliche Ankerdorne 30 cm unterhalb der oberen Plattenkante vermutet. Während sich die Platten vom Oeconomicum und Theologicum relativ frei bewegen können, sind die Platten des Juridicums an den Ankerdornen fixiert und unbeweglich (Abb. 8.4). Infolge dessen wird die vertikale Seitendehnung gehemmt, so dass die Neigung zur Durchbiegung noch verstärkt werden dürfte. Das Zentrum der Einwölbung liegt dann nicht mehr in der Plattenmitte, sondern zwischen den Fixationspunkten (Ankerdorne und untere Nut).

Die empirische Überprüfung von Formel 3.10 (Kap. 3.3.2.2) zeigt leichte Unterschiede in der Berechnung von B als Funktion des Messabstandes L entlang der vertikalen Mittellinie (Abb. 8.5). So schwankt der Wert für B bei der Platte T3 zwischen 13,6 mm/m für L = 300 mm und 19,0 mm/m für L = 1100 mm, bei der gleichmäßig gewölbten Platte O3 dagegen nur zwischen 11,7 mm/m für L = 300 mm und 13,3 mm/m für L = 1100 mm. Die relativen Unterschiede entlang der horizontalen Mittellinie sind ähnlich. Im Falle einer perfekt kreisrunden Wölbung wären die Werte für die Durchbiegungen B unabhängig vom Messabstand L auf gleichem Niveau. Für die Unterschiede spielen drei Faktoren als Ursache eine Rolle: (1) Bei kleinen Messabständen L führt der Messfehler für H (±0,2 mm; vgl. Kap. 3.3.2.3) zu relativ größeren Fehlern bei der Ermittlung von B als bei größeren Messabständen; (2) die Asymmetrie der Einwölbung; (3) Unterschiede im Grad der Krümmung. Da Letztere naturgemäß auftreten, in ihrer Variationsbreite jedoch akzeptabel erscheinen, stellt das Modell der kreisrunden Plattenkrümmung die bislang beste Annäherung bei der Quantifizierung der Durchbiegung dar.

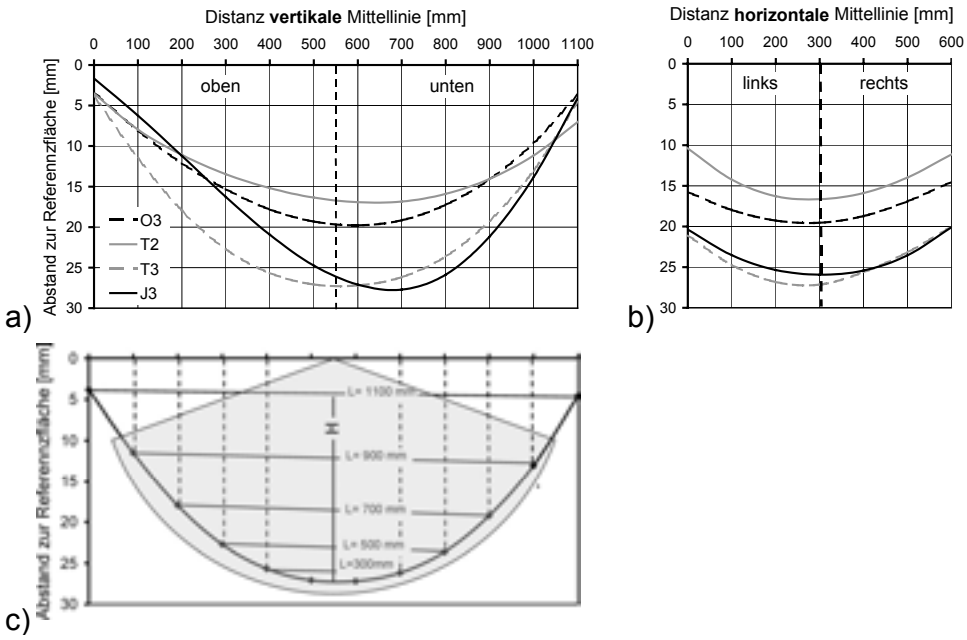


Abb. 8.3: Überhöhte Querprofile durch verbogene Fassadenplatten: a) Längsschnitte durch die vertikale Mittellinie; b) Querschnitte durch die horizontale Mittellinie; c) Vergleich zwischen der Krümmung einer Fassadenplatte und der eines Kreissegmentes am Beispiel des Längsschnittes durch die vertikale Mittellinie der Platte T3. Die Berechnung der Durchbiegungen B über verschiedene Messabstände L hinweg sollte zu vergleichbaren Ergebnissen führen.

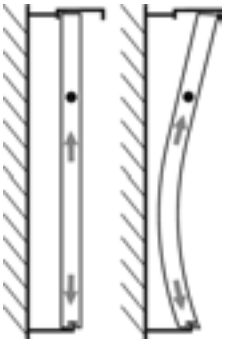


Abb. 8.4: Schematische Seitenansicht einer Fassadenplatte des Juridicums. Die Fixierung am Ankerdorn (schwarzer Punkt) führt zu einer Asymmetrie der Einwölbung und zu einer Behinderung der Seitendehnung, welche die Plattenverbiegung in der Folge noch verstärkt.

Horizontale versus vertikale Verbiegung

Weiterhin sind bei den vier untersuchten Platten Unterschiede zwischen der vertikalen und horizontalen Durchbiegung festzustellen (Abb. 8.5). Während T2 und T3 entlang der horizontalen Mittellinie stärker verbogen sind als entlang der Vertikalen, ist das Verhältnis bei J3 umgekehrt. O3 dagegen zeigt keine signifikante Differenz. Diese Beobachtung korrespondiert mit der Form der Isolinien in Abb. 8.2. Je dichter die Isolinien entlang der vertikalen oder horizontalen Mittellinie zusammen liegen, desto

stärker ist die Krümmung. Entsprechend zeigen T2 und T3 vertikal gestreckte und J3 horizontal gestreckte Isolinien-Ellipsen, O3 dagegen kreisrunde Isolinien.

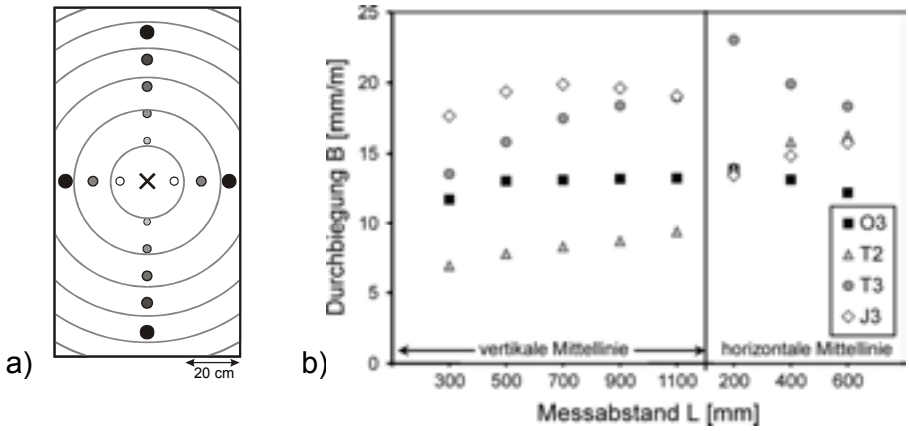


Abb. 8.5: Ermittlung der Durchbiegung B als Funktion des Messabstandes L. a) Die Durchbiegung wurde für verschiedene Messabstände über die vertikale und horizontale Mittellinie hinweg erfasst. Die Fußpunkte des Biegemeters sind jeweils durch zwei gleichartige Punkte markiert. Messpunkt war jeweils die Plattenmitte (Kreuz). b) B in Abhängigkeit von Messabstand und Richtung.

Um das Verhältnis zwischen horizontaler und vertikaler Verbiegung genauer zu untersuchen, um möglicherweise Aufschluss über die Ursachen verschiedener Biegegeometrien und damit auf die Plattenverbiegung an sich zu erlangen, wurde zunächst ein Verfahren zur Berechnung der Isolinienform etabliert. Von sämtlichen Platten der drei untersuchten Gebäude wurde neben der vertikalen Durchbiegung mit L = 1,1 m bzw. 1,2 m auch die horizontale Verbiegung mit einem Messabstand von L = 0,6 m erfasst. Beide Werte zusammen ermöglichen die Berechnung der Ellipsenform der Isolinien einer Platte, die mit dem Quotienten zwischen der Länge der vertikalen (v) und der horizontalen (h) Achse einer Ellipse ausgedrückt werden kann (Abb. 8.6). Je mehr die Isolinien der Kreisform entsprechen, desto näher ist dieser Exzentritätsquotient v/h dem Wert 1. Mit Hilfe geometrischer Überlegungen lässt sich aus der vertikalen und horizontalen Durchbiegung B_v und B_h folgende Beziehung ableiten:

Formel 8.1: $$\frac{v}{h} = \sqrt{\frac{B_h}{B_v}}$$

v/h	[-]:	Exzentritätsquotient
B_v	[mm/m]:	normierte Durchbiegung; ermittelt über die **vertikale** Mittellinie
B_h	[mm/m]:	normierte Durchbiegung; ermittelt über die **horizontale** Mittellinie

Die Exzentritätsquotienten einiger Plattenzeilen sind repräsentativ für die jeweiligen Gebäude in Abb. 8.7 dargestellt. Es ist zu beachten, dass bei Platten mit nur schwacher Durchbiegung die Messungenauigkeit für H von R = ±0,2 mm aufgrund der Fehlerfortpflanzung bei der Berechnung von v/h stärker ins Gewicht fällt. Der Wert v/h wurde im Diagramm daher auf 1 ± 0 vereinfacht, wenn sein Fehler größer als v/h x 0,5 war.

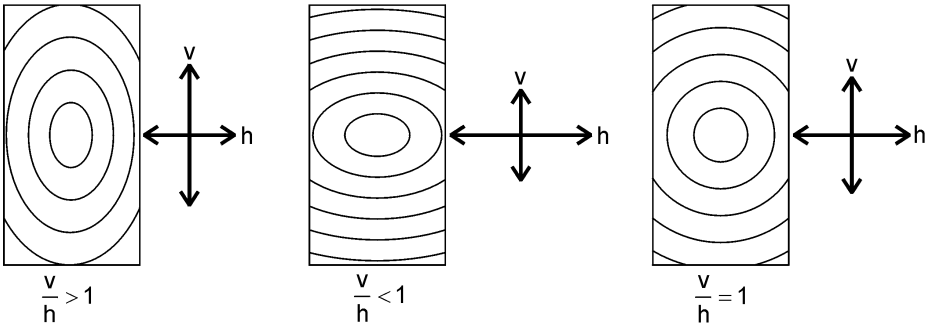


Abb. 8.6: Zusammenhang zwischen Exzentritätsquotienten v/h und der Verformungsgeometrie von Fassadenplatten. Je mehr die Linien gleichen Abstandes zu einer ebenen Referenzfläche (Isolinien) von einer Kreisform abweichen, d.h je stärker sich die Platte zylindrisch wölbt, desto stärker weicht v/h von 1 ab.

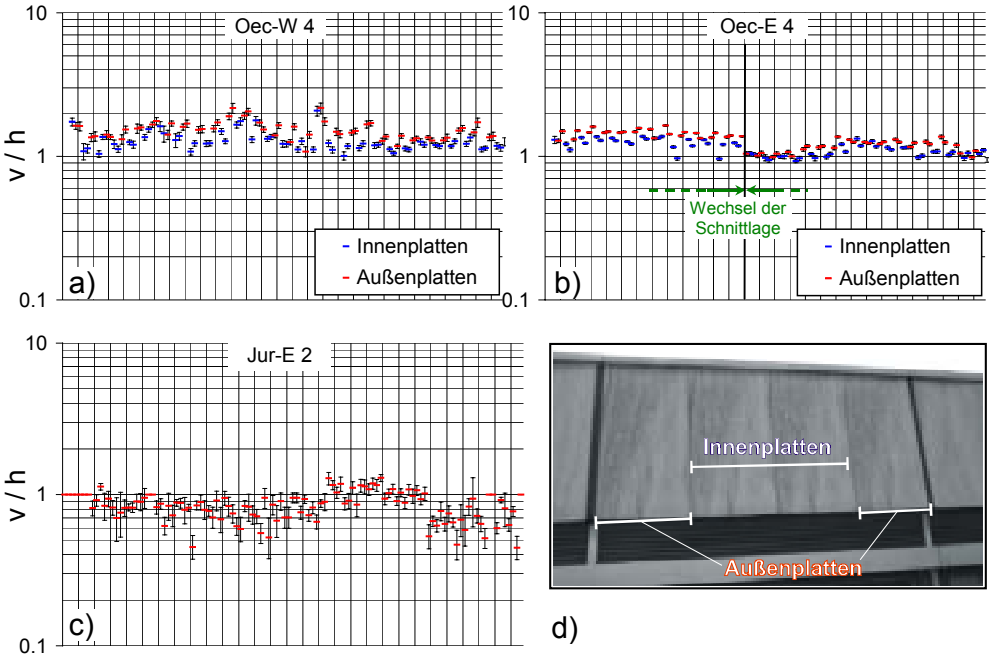


Abb. 8.7: Exzentritätsquotient v/h der einzelnen Marmorplatten in a) der obersten Fassadenzeile der Westfassade des Oeconomicums, b) der obersten Fassadenzeile der Ostfassade des Oeconomicums, und c) der mittleren Fassadenzeile der Ostfassade des Juridicums. Die Fehlerindikatoren beruhen auf der Berechnung der Fehlerfortpflanzung durch die Messungenauigkeit von H von ±0,2 mm (siehe Text). Vertikale Linien in a) und b) unterteilen die Vierergruppen mit jeweils zwei Werten für Innen- und Außenplatten wie in d) dargestellt (vgl. Abb. 4.2a).

Es ist zu beobachten, dass sich der Exzentritätsquotient im Wesentlichen in Abhängigkeit von der Befestigungsweise der Fassadenplatten unterscheidet. So zeigen die frei beweglichen Platten der Gebäude Oeconomicum und Theologicum in der Tendenz einen Exzentritätsquotienten > 1, während am Juridicum, dessen Platten seitlich fixiert sind, der Wert für v/h in der Regel < 1 ist (Abb. 8.7). Wenn man die Verbiegung als eine Folge der Plattenexpansion betrachtet, erklärt sich dieses Phänomen daraus, dass die Platten des Juridicums aufgrund der lateralen Verankerung in ihrer vertikalen Dehnung behindert werden und der Längenzuwachs verstärkt in eine vertikale Krümmung übergeht (vgl. Abb. 8.4). An den beiden anderen Gebäuden dagegen werden die Platten eher in ihrer vertikalen als in ihrer horizontalen Durchbiegung behindert. Die Platten, die unten und oben jeweils über die gesamte Länge der kurzen Kanten an Schienen befestigt sind, können sich entlang der langen Plattenkanten frei bewegen und leichter nach innen wölben, so dass die horizontale Verbiegung hier stärker ausgeprägt ist (vgl. Abb. 8.2b,c). Des Weiteren dürfte die bevorzugte Schnittlage der Marmorplatten (vgl. Abb. 4.4) eine stärkere horizontale Verbiegung bei freier Beweglichkeit begünstigen. Aus Kap. 6.3 ist bekannt, dass das Verbiegepotenzial beim Peccia Marmor senkrecht zur Foliationsebene am stärksten ausgeprägt ist (vgl. Abb. 6.12a). Da eine von drei möglichen orthogonalen Schnittlagen an den Fassadenplatten nicht verwirklicht ist (vgl. Abb. 4.4), ist die stärkste Verbiegung bei nicht foliationsparallelen Schnittlagen deshalb immer parallel zur horizontalen Mittellinie anzutreffen, wie beispielsweise in der Platte T2 (s. Abb. 8.2b) verwirklicht.

Im Gegensatz zum allgemeinen Trend zeigen zwei Drittel aller Marmorplatten aus Bereichen mit deutlich konvexer Durchbiegung (jeweils 2te Fassadenzeile der Ostfassade an Oeconomicum und Theologicum; vgl. Anhang 1 und 2) einher gehend mit dieser „Verbiegungsanomalie“ einen Wert von v/h < 1. Die Ursache wird in bauphysikalischen Begebenheiten vermutet, die einen gewissen Einfluss auf das Mikroklima an und in der Platte und damit letztlich auf die ermittelten Kennwerte ausüben.

Im Detail lassen sich weitere Einflussfaktoren auf den Exzentritätsquotienten ausfindig machen. So ist in einigen Plattenzeilen festzustellen, dass v/h an den Außenplatten einer Vierergruppe größer ist als an den beiden Innenplatten. Als Beispiel sind die obersten Plattenzeilen der West- und Ostfassade des Oeconomicums gegeben (Abb. 8.7a,b). Während der Mittelwert von v/h für die Innenplatten 1,27±0,21 bzw. 1,25±0,11 beträgt, steigt der Durchschnitt für die Außenplatten auf 1,52±0,23 bzw. 1,45±0,09 an. Auch hier dürften mikroklimatische Einflüsse als Ursache eine Rolle spielen.

Des Weiteren ist - wie bereits im Zusammenhang mit der Verbiegung (vgl. Kap. 4.1.3.5) - ein Einfluss des Marmorgefüges bzw. der Orientierung der Makrostrukturen in der Platte erkennbar. Als repräsentatives Beispiel sei hier der Übergang in der Mitte der obersten Fassadenzeile der Ostfassade des Oeconomicums heraus gegriffen, wo die Werte für v/h von durchschnittlich 1,35±0,14 für die ersten 50 Platten von links auf Werte um 1,00 absinken (Abb. 8.7b). Dieser Übergang geht einher mit einem Wechsel der Plattenschnittlage (vgl. Abb. 4.11). Der Zusammenhang zwischen Plattendekor und Exzentritätsquotient kann an mehreren Fassadenbereichen der drei Gebäude nachgewiesen werden.

8.1.2 Mikrogefüge

Das Mikrogefüge des als Fassadenmaterial verwendeten Peccia Marmors ist gekennzeichnet durch eine breite Korngrößenvariation mit einer mittleren Korngröße von 1 – 2 mm und maximalen Korndurchmessern von bis zu 6 mm. Neben Calcit treten untergeordnet Quarz, Biotit, Hämatit, Pyrit und Muskovit als akzessorische Gemengteile auf. Calcit hat in grobkörnigen Domänen eine polygonale Korngrenzengeometrie mit geraden bis leicht gekrümmten Korngrenzen (Abb. 8.8). Bereiche mittlerer Korngröße zeigen dagegen eine interlobate Korngrenzengeometrie mit buchtigen bis verzahnten Korngrenzen, die häufig Subkornbildung aufweisen. Als weitere Merkmale kristallplastischer Deformation sind Knickbänder, verbogene Zwillingslamellen und undulöse Auslöschung zu beobachten. Als Einschlüsse treten Quarz und Biotit auf. Der Biotit liegt dabei häufig parallel zu den Spaltfächen oder Zwillingslamellen. Calcit zeigt eine Vorzugsorientierung nach der Kornform parallel zur Foliation.

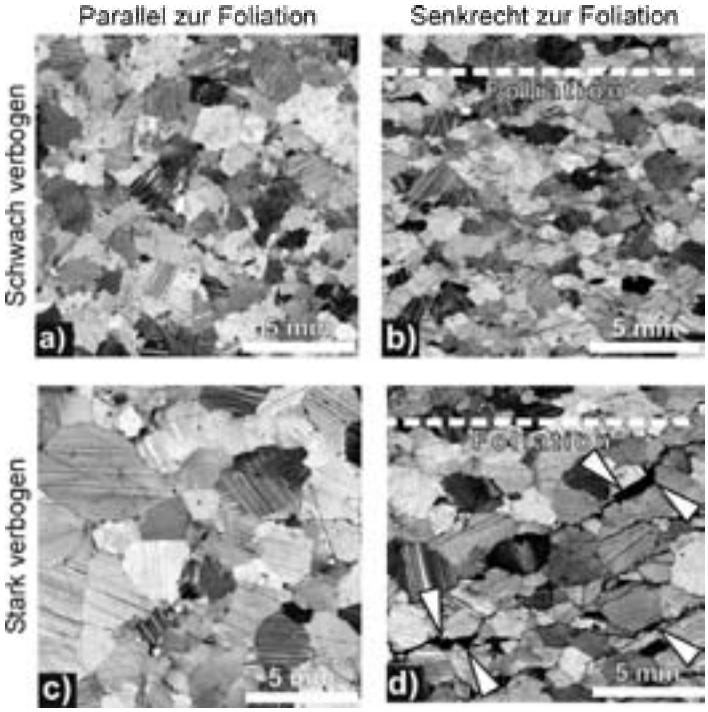


Abb. 8.8: Korngefüge des Peccia Marmors (gekreuzte Polarisatoren) a,b) aus einer schwach verbogenen Marmorplatte und c,d) aus einer stark verbogenen Marmorplatte (aus Koch & Siegesmund 2002). Schnittlagen senkrecht zur Foliation (b,d) zeigen eine bevorzugte Korngrenzenregelung parallel zur Foliationsebene. In der stark verbogenen Platte (d) sind deutlich intergranulare Mikrorisse zu erkennen (Pfeile), verursacht durch die Öffnung von Korngrenzen subparallel zur Foliation.

Das Mikrogefüge entspricht in guter Übereinstimmung dem in den Laboruntersuchungen verwendeten Typ „Peccia“ (vgl. Kap. 5.2).

In Schnittlagen senkrecht zur Foliation zeigen stark verformte Platten deutlich geöffnete Korngrenzen, die sich häufig zu transgranularen Rissen ausweiten (Abb. 8.8d). Diese sind bevorzugt parallel zur Vorzugsorientierung der Kornlangachsen bzw. zur Foliation orientiert. Intrakristalline Mikrorisse entlang von Spaltflächen treten dagegen selten auf.

8.1.3 Porositätskennwerte versus Plattenverbiegung

Im Zuge progressiver Verwitterung verändern sich die Porenraumeigenschaften, welche mit der Porosität, der Porenradienverteilung und der Permeabilität beschrieben werden können. Als verwitterungssensible Parameter sollen sie Aufschluss darüber geben, welche Veränderungen im Porenraum bei zunehmendem Verbiegungsgrad der Marmorplatten stattfinden.

Die Bestimmung der Porosität erfolgte mittels zweier Verfahren: Auftriebsmethode (vgl. Kap. 3.3.4.1) und Quecksilberporosimetrie (vgl. Kap. 3.3.4.2). Die Auftriebsmethode wurde an jeweils drei Probekörper einer Größe von 10 cm x 10 cm x 3 cm durchgeführt, die entlang der horizontalen Mittellinie der Fassadenplatten vom Zentrum bis zum Rand entnommen wurden. Die Messung der Porosität und der Porenradienverteilung mit Hilfe der Quecksilberporosimetrie erfolgte an jeweils mindestens zwei Zylinder (∅ = 12,5 mm; Länge ≈ 40 mm), die oberhalb des Plattenzentrums entnommen wurden. Aus präparationstechnischen Gründen war die Entnahme von Probezylinder an den Platten T3 und J2 nicht möglich. Jeweils drei Probekörper zur Erfassung der Permeabilität (vgl. Kap. 3.3.4.3) wurden nahe des Plattenzentrums bzw. im Falle der Platten T3 und J3 an unterschiedlichen Stellen heraus präpariert.

Porosität

Die Nutzporosität oder effektive Porosität (Φ), also der für flüssige oder gasförmige Medien zugängliche Porenraum, beträgt beim frischen Peccia Marmor bereits Φ = 0,33 % (Auftriebsmethode) in Übereinstimmung mit dem Wert aus der Quecksilberporosimetrie (vgl. Tabelle 7.1). Die mit Φ = 0,35 % niedrigste Porosität aller neun demontierten Platten (Abb. 8.9) stimmt mit dieser initialen Porosität überein, so dass die Platte J1 in geschützter Exposition offenbar im gleichbleibend frischen Zustand mehr als vier Jahrzehnte überdauert hat. Die Porosität der schwach verbogenen Platten reicht bis 0,67 % für die Probe T1. Die Porositätswerte für die mittel bis stark verbogenen Platten (5,3 – 21,2 mm/m) liegen deutlich höher im Bereich zwischen 0,85 % und 1,67 %, wobei sich insgesamt ein linearer Trend abzeichnet (Abb. 8.9a). Da die Zunahme der Porosität durch neu entstandene Mikrorisse einen Indikator für den Grad der Gefügeauflockerung darstellt, lässt sich hier eine deutliche Korrelation zwischen der Plattenverbiegung und der strukturellen Schädigung des Marmors nachweisen.

Die an sieben von neun Platten ermittelten effektiven Porositäten aus der Quecksilberporosimetrie stimmen im Wesentlichen gut mit denen aus der Auftriebsmethode überein (Abb. 8.9b). Lediglich die Proben O2 und O3 zeigen im Vergleich höhere Werte. Im Allgemeinen wäre zu erwarten, dass Wasser leichter in den Porenraum

eindringt als Quecksilber bei 200 MPa und daher eher zu höheren Werten bei der Auftriebsmethode führt. Die Unterschiede können zum einen auf verschiedenen Probengrößen beruhen, die mit knapp 5 cm³ bei der Hg-Porosimetrie nicht unbedingt repräsentativ für das Gestein, insbesondere für einen mittel- bis grobkörnigen Marmor wie den Peccia Marmor, sein müssen. Weiterhin können bei bereits vorgeschädigten Marmoren oder allgemein solchen mit schwachen Kornbindungen zusätzliche Rissporositäten durch die Präparation erzeugt werden (vgl. Poschlod 1990; Rüdrich 2003), die entsprechend bei kleinen Probezylinder der relativ hochporösen Proben O2 und O3 stärker ins Gewicht fallen.

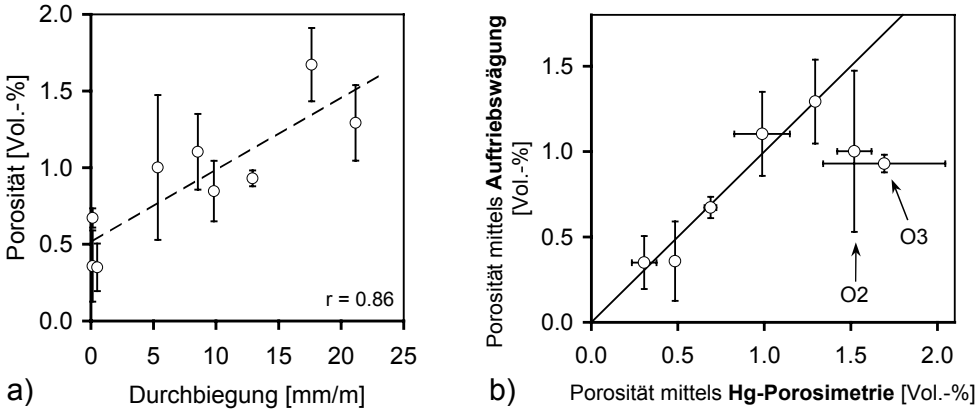


Abb. 8.9: Nutzporosität der demontierten Marmorplatten. a) Porosität aus der Auftriebswägung als Funktion der Durchbiegung. Eingetragen sind die Regressionsgerade (gestrichelte Linie) und der Korrelationskoeffizient (r). b) Vergleich der Porositätswerte aus zwei Verfahren. Die durchgezogene Linie markiert identische Werte. Die Fehlerindikatoren markieren die Standardabweichung.

Porenradienverteilung

Die Porenradienverteilung erweist sich bei Wiederholungsmessungen an Probekörpern der gleichen Platte als sehr homogen, kann aber zwischen verschiedenen Platten sehr variieren. In Abb. 8.10 sind daher die Porenradienverteilungen der schwach, mittel und stark verbogenen Platten jeweils als mittlere Porenradienverteilung zusammengefasst. Die ermittelten Daten zeigen, dass mit zunehmender Plattenverbiegung der Porositätszuwachs zunächst ausschließlich im Bereich der Porenradien größer als 0,63 µm stattfindet, während der Volumenanteil von Poren kleiner als 0,63 µm annähernd gleich bleibt. Damit liegen sowohl fast der gesamte Porenraum der schwach verbogenen Platten als auch die neu entstandene Porosität der mittel bis stark verbogenen Platten in einem Porenradienbereich von über 0,05 µm, in dem die Wasserdampfdiffusion in die Kapillarwirkung als wesentlicher Wassertransportmechanismus übergeht (vgl. Snethlage 1984, Klopfer 1985, Poschlod 1990). Dadurch wird die Fähigkeit zur Wasseraufnahme im Gestein erleichtert, was in der Folge die Möglichkeit eines Schadstoffeintrags und Lösungsprozesse im Porenraum weiter beschleunigt.

Die Porenradienverteilung der stark verbogenen Platten ist im Porengrößenbereich von über 0,1 µm Radius identisch mit der Verteilung in den mittelstark verbogenen Platten, wogegen im Mikroporenbereich ein Zuwachs festzustellen ist. Dieser Anstieg ist lediglich in der Platte O3 gegeben, der sich entsprechend auf die mittlere Porenradienverteilung in Abb. 8.10 auswirkt.

Es kann zusammengefasst werden, dass das Porenvolumen bei ansteigender Plattenverbiegung mit größer werdenden Poren zunimmt. Dabei ist nach Rüdrich (2003) davon auszugehen, dass bei reiner Rissweitung bei unveränderter Risshäufigkeit ein gleichbleibendes Verhältnis zwischen Porositätszunahme und Porengröße besteht, was sich bei stark verwitterten Proben aber signifikant ändern kann. Die eigenen Untersuchungen (Abb. 8.11) bestätigen diese Aussage. Das an sieben Fassadenplatten ermittelte Verhältnis zwischen mittlerem Porenradius und Porosität zeigt im Bereich schwach bis mittelstark verbogener Platten einen kontinuierlichen Anstieg, während bei der Probe O3 der mittlere Porenradius trotz hoher Porosität wieder absinkt. Verantwortlich dafür ist wie oben erwähnt der Zuwachs im Bereich der Mikroporen, was ein Indiz für erste Lösungsprozesse darstellt und die Verkleinerung der mittleren Porengröße bei steigender Porosität erklärt.

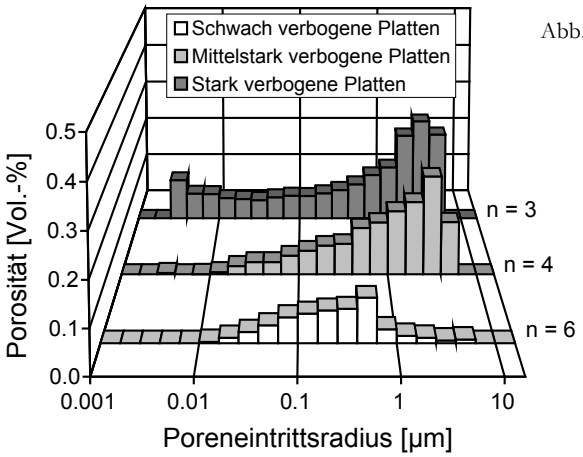


Abb. 8.10: Mittlere Porenradienverteilung in Abhängigkeit der Intensität der Plattenverbiegung, errechnet aus jeweils mehreren Einzelmessungen aus verschiedenen Fassadenplatten.

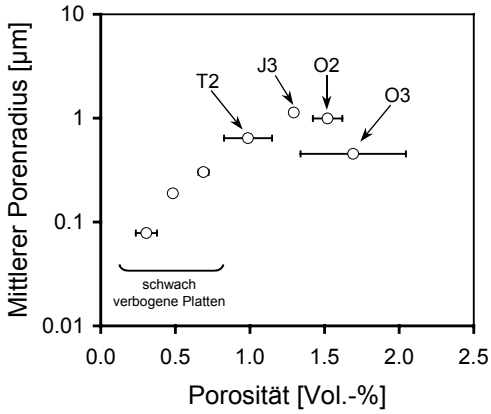


Abb. 8.11: Mittlerer Porenradius als Funktion der Porosität aus der Hg-Porosimetrie. Die Fehlerindikatoren markieren die Standardabweichung.

Luftpermeabilität

Die Permeabilität als Indikator für die Vernetzung des Porensystems wird neben der Form und Rauigkeit der Fließkanäle maßgeblich von der Porengröße und vom durchströmbaren Anteil der effektiven Porosität gesteuert (Chilingar 1964, Poschlod 1990). Da beide mit dem Durchbiegungsgrad der Fassadenplatten korrelieren und sich die Vernetzung mit steigender Porosität verbessert, sollte die Permeabilität ebenfalls mit der Verbiegung ansteigen.

Die ermittelten Ergebnisse bestätigen diese Annahme (Abb. 8.12a). Die Werte variieren über mehrere Größenordnungen von 0,006±0,001 md für die Platte J1 bis zu 15,2±1,2 md für einen extrem geschädigten Bereich der Platte T3 und korrelieren mit dem Durchbiegungsgrad der Platten. Das Korngefüge war in hochpermeablen Bereichen zum Teil so stark entfestigt, dass die Proben mit bloßer Hand zu zerbrechen waren. Ansonsten sind Luftpermeabilitäten >1 md eher für hochporöse Gesteine wie Sandstein üblich.

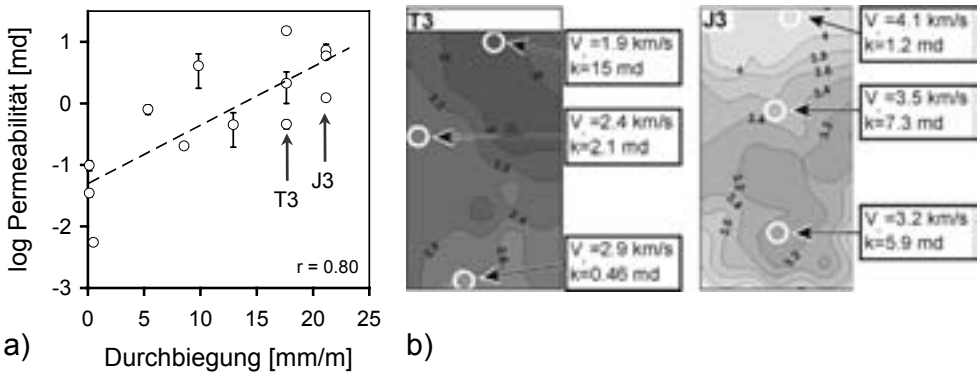


Abb. 8.12: Luftpermeabilitäten (k) der demontierten Fassadenplatten a) als Funktion der Durchbiegung und b) in Abhängigkeit der Kompressionswellengeschwindigkeit (V_P) als indirektes Maß für die Gefügeauflockerung des Marmors am Beispiel der Marmorplatten T3 und J3 (vgl. Abb. 8.2c,d) an Stellen mit jeweils relativ niedriger, mittlerer und hoher V_P (modifiziert nach Koch & Siegesmund 2002). Gegeben sind die Regressionsgerade (gestrichelte Linie) und der Korrelationskoeffizient (r). Die Werte wurden senkrecht zur Plattenoberfläche an jeweils drei Zylinderproben (∅ = 30 mm; Länge = 30 mm) ermittelt.

Die einzelnen Werte weichen teilweise stark vom mittleren Trend ab. Es zeigt sich, dass die Permeabilität bereits innerhalb einer Platte extrem variieren kann. In Abb. 8.12b sind die Luftpermeabilitäten am Beispiel der Platten T3 und J3 jeweils an Stellen mit maximaler, mittlerer und minimaler Kompressionswellengeschwindigkeit (V_P) erfasst worden, die sich entsprechend im Grad der Gefügeauflockerung unterscheiden sollten (vgl. Kap. 8.1.1). Die Werte variieren zwischen 0,46 md und 15 md für T3 und zwischen 1,2 md und 7,3 md für J3. Dabei sind hohe Werte für V_P als Indikator für ein stabileres Korngefüge mit niedrigen Luftpermeabilitäten verknüpft und umgekehrt. Darüber hinaus deutet sich ein Einfluss der Orientierung der Foliation in den Platten an. Da sich Mikrorisse im Zuge der Verwitterung im Peccia Marmor bevorzugt parallel zu den Korngrenzen bzw. zur Foliation ausbreiten (vgl. Abb. 7.2a),

sollte die Porenkommunikation der Platte J3 senkrecht zur Plattenoberfläche (=Messrichtung) besser sein als in Platte T3 (vgl. Abb. 8.2c,d), was der Unterschied zwischen den mittleren Permeabilitäten zwischen beiden Platten bestätigt.

8.1.4 Mechanische und elastische Eigenschaften versus Plattenverbiegung

Der Vergleich zwischen dem Grad der Verbiegung mit den mechanischen und elastischen Eigenschaften einer Platte soll zeigen, ob und in welcher Weise die Kenngrößen miteinander korrelieren und somit über die Verbiegung indirekt auf die Entfestigung des Fassadenmaterials geschlossen werden kann. Der Einfluss des Gefüges auf Richtungsabhängigkeiten wird hierbei berücksichtigt.

Die schwach verbogenen Platten lassen eine große Spannweite in der Biegefestigkeit erkennen (Abb. 8.13a). Die Werte reichen von 13,4±1,3 MPa (J1; Zugrichtung ‖ lange Plattenkante) bis 5,3±0,5 MPa (O1; Zugrichtung ‖ kurze Plattenkante). Mit zunehmender Durchbiegung nimmt die Biegefestigkeit deutlich ab. Im Spektrum der mittel bis stark verbogenen Platten ist die Variationsbreite der Biegefestigkeit geringer. Sie reicht von 5,5±0,2 MPa für die Platte T2 (Zugrichtung ‖ lange Plattenkante) bis hinunter zu 1,6±0,2 MPa für Platte J3 (Zugrichtung ‖ kurze Plattenkante). Darüber hinaus ist die Streuung der Einzelwerte niedriger gegenüber den Platten mit hoher Biegefestigkeit bzw. Durchbiegung (s. Fehlerindikatoren in Abb. 8.13a).

Die Ergebnisse zeigen, dass unverbogene Platten sowohl Biegefestigkeiten wie der bruchfrische Peccia Marmor aufweisen können (12,6 MPa, vgl. Abb. 7.3), andererseits zum Teil aber bereits deutliche Entfestigungen festzustellen sind. Fehlende Durchbiegung ist also keine Indikation für eine vollständig intakte Platte. Jedoch ist die Entfestigung bei unverbogenen Platten nicht so stark ausgeprägt wie in den mittel bis stark verbogenen. Dort bewegen sich die Festigkeitswerte weitestgehend unabhängig von der Durchbiegung etwa auf gleichem Niveau, so dass eine Korrelation nur schwer hergestellt werden kann. Immerhin ist für die am stärksten verbogenen Platte J3 auch die stärkste Entfestigung zu ermitteln.

Die Anisotropie der Biegefestigkeit (A_{Rtf} [%] = ($R_{tf\,max} - R_{tf\,min}$) / $R_{tf\,max}$ x 100) erreicht Werte bis 53 %. Es ist festzustellen, dass sie von der Raumlage der Foliation in den einzelnen Fassadenplatten abhängt. In den Platten, in denen die Foliation steil bis senkrecht einfällt (Orientierung I in Abb. 8.13b), ist die Biegefestigkeit in der Richtung, in welcher die resultierende Zugkraft parallel zur kurzen Plattenkante senkrecht zur Foliation wirkt (▲), gegenüber der Zugrichtung parallel zur Foliation (■) um 29 bis 53 % reduziert (Abb. 8.13b). Dagegen zeigen die Platten, in denen die Foliation in etwa parallel zur Plattenoberfläche orientiert ist (Orientierung II in Abb. 8.13b), wesentlich niedrigere Anisotropiewerte bis maximal 18 %. Die Zugkraft im Biegeversuch wirkt hier jeweils parallel zur Foliation (Δ und □). Die Abhängigkeit von der Raumlage der Foliation steht in Übereinstimmung mit der Anisotropie der Biegefestigkeit des bruchfrischen und künstlich verwitterten Peccia Marmors (vgl. Kap. 7.3).

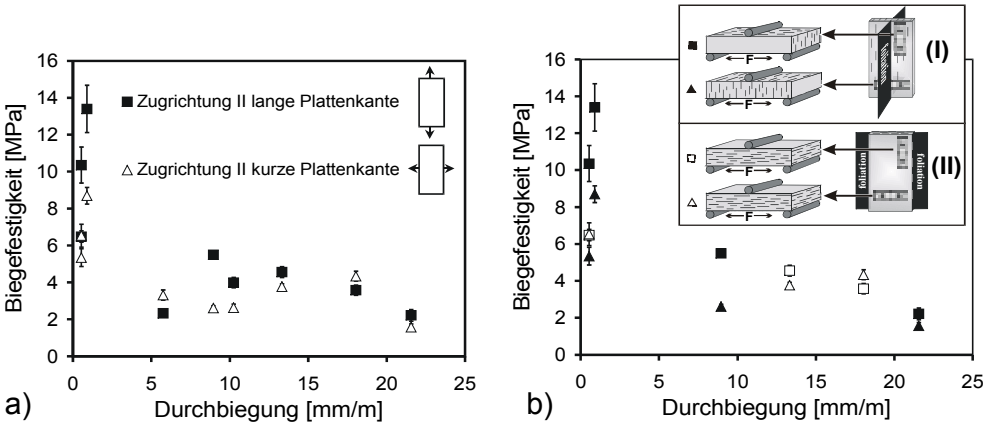


Abb. 8.13: Biegefestigkeit als Funktion der Plattenverbiegung a) am Beispiel aller neun demontierten Fassadenplatten und b) am Beispiel der Platten, bei denen die Foliation entweder parallel oder senkrecht zur Plattenoberfläche orientiert ist (modifiziert nach Koch & Siegesmund 2002). Die Biegefestigkeit ist jeweils für zwei Richtungen pro Platte gegeben, die den Richtungen der wirkenden Zugkräfte in den Prüfkörpern entspricht. Jeder Datenpunkt stellt den Mittelwert aus fünf Einzelmessungen dar. Die Fehlerindikatoren markieren die Standardabweichung.

Die Ausbruchlast am Ankerdornloch lässt keine signifikanten Unterschiede zwischen verschiedenen Orientierungen (vgl. Kap. 3.3.3.2) erkennen, weshalb jeweils alle Einzelmesswerte einer Platte zum Mittelwert zusammengefasst sind (Abb. 8.14). Die Korrelation mit der Plattenverbiegung ist ähnlich wie bei der Biegefestigkeit. Auch hier schwankt die Ausbruchlast der schwach verbogenen Platten sehr stark zwischen 2,13±0,17 kN und 1,12±0,13 kN (Abb. 8.14). Die Werte liegen aber alle höher als bei den mittel bis stark verbogenen Platten, deren Ankerausbruchfestigkeit von 0,97±0,20 kN bis 0,54±0,18 kN reicht. Die Festigkeitsabnahme korreliert hier insgesamt besser mit der Durchbiegung als dies bei der Biegefestigkeit der Fall ist.

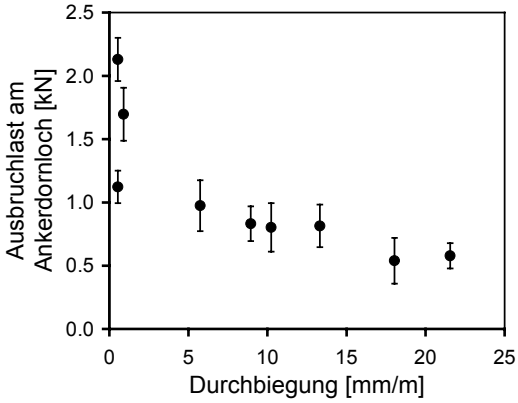


Abb. 8.14: Ausbruchlast am Ankerdornloch als Funktion der Plattenverbiegung. Die Fehlerindikatoren markieren die Standardabweichung.

Zwischen den beiden Festigkeits-Kenngrößen sollte eine gute Korrelation bestehen, da sie gleichermaßen von der Kohäsion im Kornverband abhängen. Für die Biegefe-

stigkeit wurde der Mittelwert aus beiden Richtungen verwendet. Es ist eine lineare Korrelation mit einem mäßig hohen Korrelationskoeffizienten (r = 0,82) zu ermitteln (Abb. 8.15). Die Platten O1 und J1 mit den jeweils höchsten Festigkeitswerten weichen am stärksten von der Regressionsgeraden ab. Dies ließe sich erklären, wenn die Foliation in der Platte J1 parallel zur Plattenoberfläche orientiert wäre. In diesem Fall würde sich die mittlere Biegefestigkeit aus den beiden „starken" Richtungen parallel zur Foliation zusammensetzen (vgl. Orientierung II in Abb. 8.13b) und wäre gegenüber anderen Platten mit steil zur Plattenoberfläche einfallender Foliation wie beispielsweise O1 aufgewertet, deren Biegefestigkeits-Mittelwert auch die „schwache" Zugrichtung senkrecht zur Foliation enthält (vgl. Orientierung I in Abb. 8.13b). Letztere entspricht der Z-Richtung des Peccia Marmors (vgl. Kap. 7.3 und Abb. 7.3). Die Foliation in der Platte J1 steht jedoch ebenfalls senkrecht zur Plattenvorderseite, so dass der Grund für die Abweichung in der Heterogenität des Marmors vermutet werden muss.

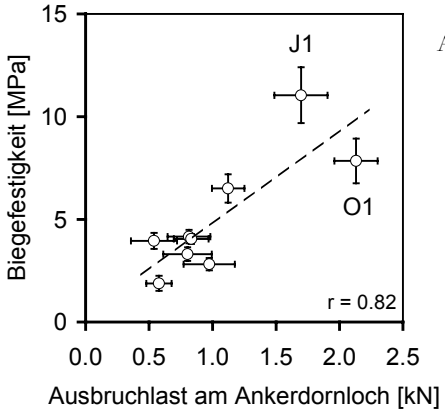


Abb. 8.15: Korrelation zwischen Biegefestigkeit und Ausbruchlast am Ankerdornloch am Beispiel der neun demontierten Fassadenplatten. Gegeben sind jeweils die Plattenmittelwerte. Eingetragen sind die Regressionsgerade (gestrichelte Linie) und der Korrelationskoeffizient (r).

Die Kompressionswellengeschwindigkeit V_P (vgl. Kap. 3.3.1.2) sollte im trockenen Zustand mit zunehmender Verformung und Entfestigung sinken. Im wassergesättigten Zustand sollte V_P annähernd die Eigenschaften des rissfreien Gesteins widerspiegeln und sich weitgehend unbeeinflusst von der Bildung von Mikrorissen bzw. vom Grad der Durchbiegung zeigen (vgl. Kap. 5.2.4.1).

Es kann jedoch in Abb. 8.16 festgestellt werden, dass V_P auch unter Wassersättigung mit zunehmender Verbiegung langsam sinkt. Offensichtlich kann die Füllung des Porenraums mit Wasser den V_P-reduzierenden Effekt durch neu entstandene Mikrorisse aufgrund der niedrigen V_P von Wasser (~1,5 km/s) nicht ganz verhindern, was bei mittel bis stark verbogenen Platten zum Tragen kommt (vgl. auch Rüdrich 2003). Bei den drei schwach verbogenen Platten variiert V_P (nass) zwischen 5,4 und 6,3 km/s. Diese Schwankungsbreite ist vermutlich ebenfalls nicht gänzlich auf den intrinsischen Einfluss aus der Textur zurückzuführen (vgl. Kap. 5.2.4.1 und Abb. 5.26a). Der Wert von 5,4 km/s stammt von der Platte T1, die bereits im schwach verbogenen Zustand eine doppelt so hohe Porosität und niedrigere Festigkeitswerte aufweist wie die beiden anderen schwach verbogenen Platten O1 und J1 (vgl. Abb. 8.9a, Abb. 8.13 und 8.14).

V_P (trocken) reduziert sich wie zu erwarten mit steigender Durchbiegung, wobei sich Unterschiede in der Schnittlage der Platten deutlich bemerkbar machen. In Abb. 8.16 sind alle Platten, deren Foliation parallel oder im flachen Winkel zur Plattenoberfläche verläuft, zur Datenreihe „V_P trocken ⊥ Foliation" zusammengefasst (Messrichtung senkrecht zur Plattenoberfläche). Die V_P-Werte in dieser Schnittlage sind gegenüber der Datenreihe „V_P trocken ‖ Foliation" (Foliation ist hier senkrecht zur Plattenoberfläche orientiert) deutlich um mehr als 1 km/s reduziert. Die Ursachen liegen zum einen in der Vorzugsorientierung der kristallographischen c-Achsen senkrecht zur Foliation (vgl. Abb. 5.26a), zum anderen in der bevorzugten Orientierung von präexistierenden und verwitterungsbedingt induzierten Mikrorissen parallel zur Foliation, was entsprechend senkrecht dazu eine Reduktion von V_P zur Folge hat (vgl. Abb. 7.2a).

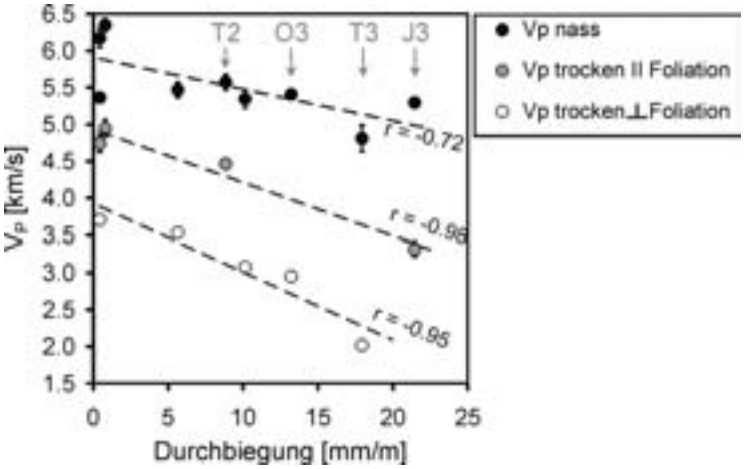


Abb. 8.16: Kompressionswellengeschwindigkeiten der neun demontierten Fassadenplatten als Funktion der Durchbiegung unter wassergesättigten und trockenen Bedingungen (Erläuterungen s. Text). Die Datenpunkte stellen die Mittelwerte aus jeweils neun V_P-Einzelmessungen dar. Die Fehlerindikatoren markieren die Standardabweichung. Es sei zum Vergleich auf die vier Platten verwiesen (Pfeile), deren Schnittlage und V_P-Verteilung in Abb. 8.2 dargestellt sind.

8.1.5 Mechanische und elastische Eigenschaften versus Porosität

Nachfolgend soll anhand der neun demontierten Fassadenplatten gezeigt werden, in welcher Weise die Festigkeitswerte und die Kompressionswellengeschwindigkeit mit der Porosität als verwitterungssensiblen Indikator für die Gefügeauflockerung korrelieren.

Da die Porosität annähernd proportional zur Durchbiegung anwächst (vgl. Abb. 8.9a), sollten Biegefestigkeit und Ausbruchlast am Ankerdornloch als Funktion der Porosität einen ähnlichen Verlauf aufweisen wie deren Korrelation mit der Durchbiegung (vgl. Abb. 8.13 und 8.14). Erwartungsgemäß lässt Abb. 8.17 ein starkes Absinken der beiden Festigkeitsparameter im Bereich niedriger Porosität erkennen. Im Bereich

höherer Porosität führt ein weiteres Anwachsen der Rissporosität nur noch zu einer vergleichsweise schwachen Entfestigung.

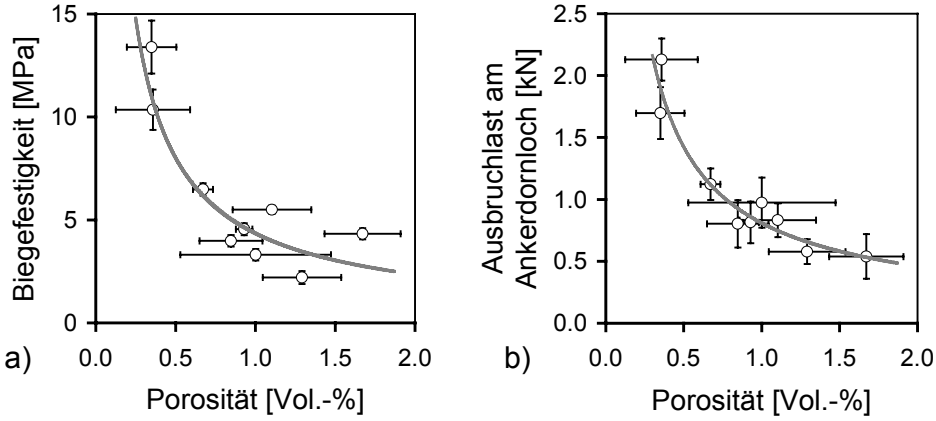


Abb. 8.17: Gesteinsfestigkeit der neun demontierten Fassadenplatten als Funktion der Porosität (aus der Auftriebswägung): a) Biegefestigkeit versus Porosität. Die Biegefestigkeit ist jeweils als Mittelwert jener Orientierung gegeben, in der die resultierende Zugkraft parallel zur langen Plattenkante und damit auch parallel zur Foliation wirkt (vgl. Abb. 8.13b). b) Ausbruchlast am Ankerdornloch versus Porosität.

Die beiden Platten O1 und J1, deren Porositäten von 0,35 und 0,36 % dem initialen Wert des bruchfrischen Peccia Marmors von Φ = 0,33 % entsprechen (vgl. Tab. 7.1), weisen die höchsten Festigkeiten auf. Die Festigkeitswerte unterscheiden sich jeweils deutlich mit R_{tf}=13,4 und 10,4 MPa bzw. mit 2,13 und 1,70 kN bei der Ankerausbruchfestigkeit. Das bedeutet, dass eine Marmorplatte, die noch keinen Zuwachs an Rissporosität erfahren hat, bereits deutlich in ihrer ursprünglichen Festigkeit reduziert sein kann, wenngleich diese Festigkeit doch noch wesentlich höher ist als bei Platten mit höherer Porosität.

Im Zuge des zunehmenden Einsatzes der Ultraschalldiagnostik bei Naturwerksteinen sind verschiedene Modelle entwickelt worden, wie die Kompressionswellengeschwindigkeit mit der Porositätszunahme als Indikator für die Gefügeauflockerung zusammenhängt. Ein auf der Basis empirischer Daten entwickelter Ansatz stammt von Köhler (1991), nach dem V_P annähernd der Gleichung in Formel 8.2 folgt.

Formel 8.2: $$V_P \approx \sqrt{\frac{12}{\Phi}}$$

V_P [km/s]: Kompressionswellengeschwindigkeit
Φ [Vol.-%]: Porosität

Der Ansatz von Weiss et al. (2001, 2002a) berücksichtigt auf der Basis theoretischer Grundlagen aus O'Connel & Budianski (1974) die Rissgeometrie. Demnach kann die extreme V_P-Reduktion bei Marmor, die im Vergleich zu anderen Naturwerksteinen bereits bei einem geringen Anstieg der Rissporosität hervorgerufen wird, nur durch sehr flache Risse erklärt werden.

V_P sinkt bei zunehmender Porosität unter wassergesättigten Bedingungen von 6,3 auf 4,8 km/s, während die Reduktion unter trockenen Bedingungen von 4,9 bis 2,0 km/s

wesentlich deutlicher ausfällt (Abb. 8.18). Die V_P/ Φ -Beziehung der trockenen Proben ist dabei relativ gut in Übereinstimmung zu bringen mit der Korrelationsfunktion von Köhler (1991). Die Abweichungen einzelner Datenpunkte resultiert aus dem Effekt der Textur bzw. der Schnittlage. Wäre die Foliation in allen Platten gleich orientiert, dürfte eine schärfere Korrelationskurve zu ermitteln sein.

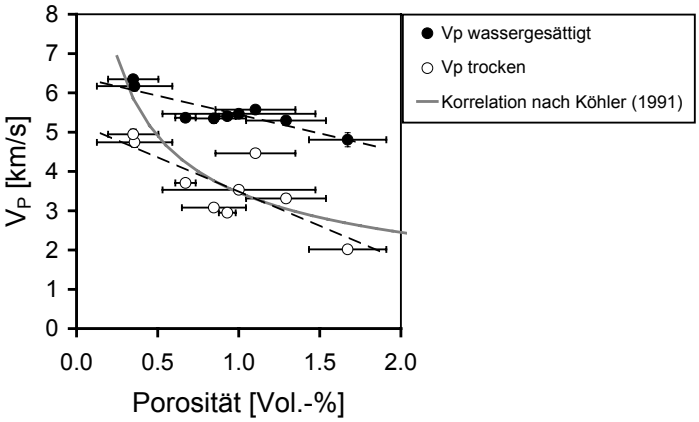


Abb. 8.18: Kompressionswellengeschwindigkeiten der neun demontierten Fassadenplatten als Funktion der Porosität (aus der Auftriebswägung) unter wassergesättigten und trockenen Bedingungen. Die V_P-Porositätskurve von Köhler (1991) ist zum Vergleich dargestellt (graue Linie).

8.2 Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek (SUB)

Von der Südfassade des Hauptgebäudes der SUB wurden sieben Marmorplatten demontiert, um mit Hilfe weiterführender gesteinsphysikalischer Untersuchungen ihren Schädigungsgrad zu erfassen (Tab. 8.2; Abb. 8.19). Eine weitere Platte aus dem Innenbereich der SUB diente als Referenzmaterial, insofern ihr Erhaltungszustand aufgrund der klimatisch relativ konstanten Bedingungen dort als quasi bruchfrisch angenommen werden kann. Aus den Platten wurden Probekörper für mikrogefügekundliche und gesteinsphysikalische Untersuchungen herauspräpariert. Ziel war es, die Abhängigkeit verschiedener Kennwerte von der Plattendurchbiegung aufzuzeigen und dadurch Rückschlüsse auf den Ist-Zustand der Fassadenplatten am Gebäude zu erhalten. Unter Weiterverwitterung/ -verbiegung im Labor mit anschließender Ermittlung der veränderten gesteinstechnischen Kennwerte soll das Schadenspotenzial charakterisiert werden, um eine genauere Vorstellung zur Schadensentwicklung der Marmorverkleidung am SUB-Gebäude zu erarbeiten.

Zu diesem Zweck wurden bei der Auswahl der Platten folgende Kriterien berücksichtigt:

- Die sieben Außenplatten decken die Variationsbreite möglicher Verbiegungsgrade der SUB-Fassadenplatten ab (97 % aller Platten der SUB werden durch diese Auswahl repräsentiert).
- Störfaktoren wie zum Beispiel Unterschiede in der Exposition, der Plattendimensionierung oder der Position der Ankerdorne sollten bei der Herstellung von Be-

ziehungen zwischen Plattenverbiegung und gesteinsphysikalischen Eigenschaften minimiert werden. Die Südfassade als einziger Fassadenbereich mit homogener Verankerung (vertikale Ankerdorne) und einheitlicher Plattengröße wird der sondierten Strategie gerecht.

- Zieht man die Möglichkeit in Betracht, dass Platten in Abhängigkeit der Exposition (z.B. Nord/Süd) trotz vergleichbaren Verformungsgrades Unterschiede in der strukturellen Auflockerung des Materials und damit der mechanischen Kennwerte zeigen könnten, dürfte die Südfassade neben der windexponierten Westfassade aufgrund der intensiveren Sonneneinstrahlung die stärksten Gefügeschädigungen aufweisen. Bei der Herstellung von gebäudespezifischen Beziehungen (z.B. Gesteinsfestigkeit versus Durchbiegung) im Hinblick auf Langzeitprognosen wäre man mit den Werten im Bereich des pessimalen Grenzwertes, d.h. eine Übertragung von der Südfassade auf die Gesamtfassade ist möglich, umgekehrt eher nicht.

Tabelle 8.2: Übersicht zu den demontierten Fassadenplatten am SUB-Gebäude.

Proben-kürzel	Höhe * Breite * Dicke [mm * mm * mm]	Durch-biegung [mm/m]	Exposition
S0	920 * 530 * 37	0.0	Innenbereich
S1	1040 * 740 * 40	0.8	Süd, 1. Zeile
S2	1040 * 740 * 40	2.3	Süd, 2. Zeile
S3	1040 * 740 * 40	4.8	Süd, 5. Zeile
S4	1040 * 740 * 40	6.7	Süd, 6. Zeile
S5	1040 * 740 * 40	7.5	Süd, 8. Zeile
S6	1040 * 740 * 40	9.3	Süd, 11. Zeile
S7	1040 * 740 * 40	11.1	Süd, 13. Zeile

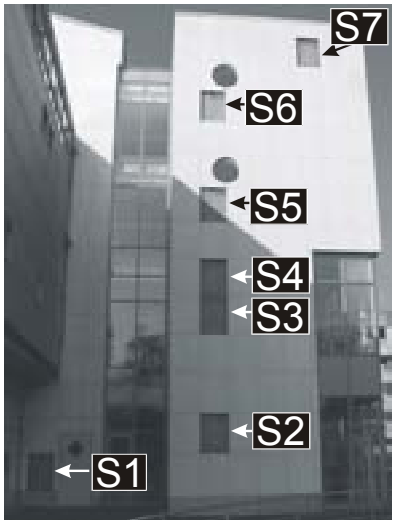


Abb. 8.19: Eine repräsentative Auswahl von sieben Fassadenplatte wurde an der Südfassade zum Zwecke weiterführender Untersuchungen demontiert.

8.2.1 Mikrogefüge

Zur Charakterisierung des Mikrogefüges wurde jeweils ein Dünnschliff mit einer Dicke von 30 µm aus der kaum verwitterten Fassadenplatte S1 und der am stärksten verformten und exponierten Marmorplatte S7 angefertigt. Der Vergleich zwischen beiden Proben ermöglicht die qualitative Erfassung der Schädigung im Mikrobereich (Abb. 8.20).

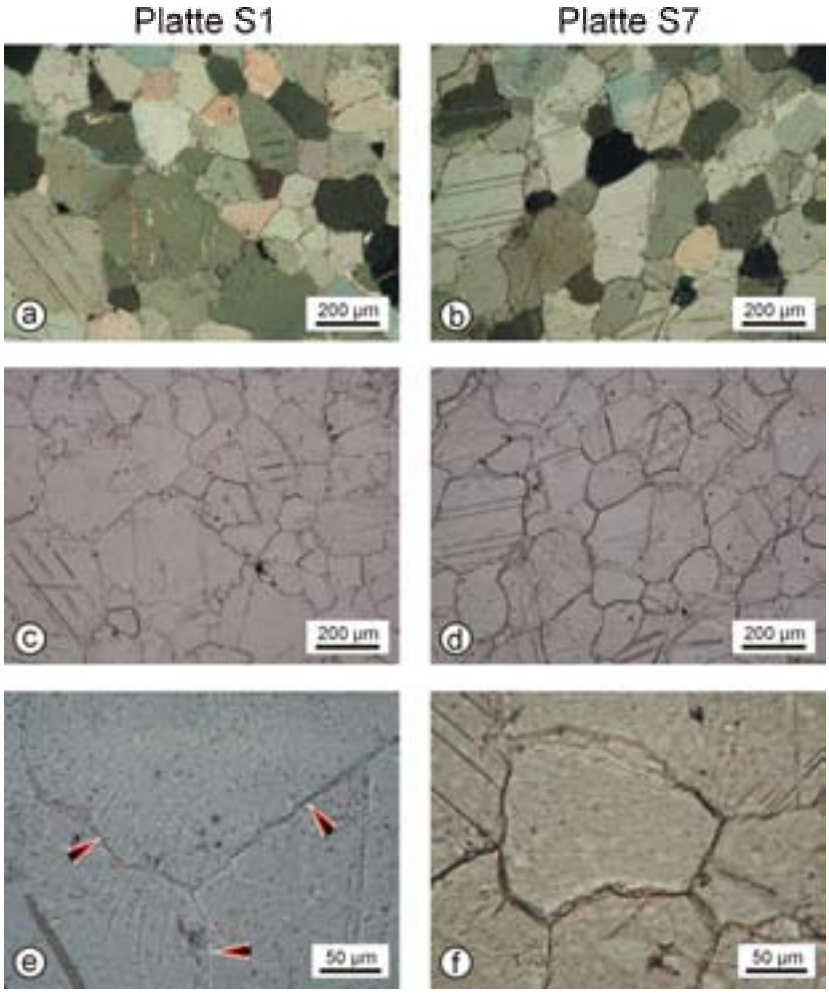


Abb. 8.20: Mikrogefüge der schwach verformten Platte S1 (linke Seite) und der stark verformten Platte S7 (rechte Seite). a,b) Übersicht (gekreuzte Polarisatoren). c,d) Jeweils gleicher Bildausschnitt wie im Bild darüber (Durchlicht). e,f) Detailaufnahme der Korngrenzen (Durchlicht). Die Korngrenzen des Marmors der Platte S7 sind deutlich stärker geöffnet als die der Platte S1 (Pfeile).

Die Varietät des an der Fassade des SUB-Gebäudes verwendeten Carrara Marmors („Bianco Carrara Venato Gioia“) ist ein fein- bis kleinkörniger Calcitmarmor und zeigt mit einem überwiegend granoblastischem Korngefüge im Wesentlichen Merkmale einer statischen Rekristallisation (Abb. 8.20). Diese zeichnet sich durch polygonale Kornformen der Calcitkristalle aus, welche einen Erholungsprozess durch Reduktion der Korngrenzenflächen anzeigt, wie sie während des Metamorphoseprozesses unter hohen Temperaturen herausgebildet werden. Im Gegensatz zu Varietäten mit vollständig equilibriertem Korngefüge zeigt der untersuchte Marmor jedoch auch Merkmale einer dynamischen Rekristallisation.

Die Korngröße der rundlichen bis länglichen Calcitkörner beträgt durchschnittlich 0,2 mm bis 0,3 mm. Die Korngrößenverteilung ist inequigranular und reicht von 0,05 mm bis 0,6 mm. Neben glatten bis geschwungenen sind auch buchtige Korngrenzen zu beobachten. Vereinzelt sind Druckzwillinge und undulöse Auslöschung ausgebildet, die einen geringen Einfluss kaltplastischer Deformationsprozesse anzeigen. Die Calcitkristalle können eine deutliche Vorzugsorientierung aufweisen (Abb. 8.20b).

Das Mikrogefüge entspricht im Wesentlichen dem in Kap. 5.2 vorgestellten Marmortypen „Carrara 1“ und unterscheidet sich nur im geringfügig breiteren Korngrößenspektrum und in weniger glatten Korngrenzen.

Der Kornverband stark verbogener Platten lässt eine Zunahme der Rissporosität durch geöffnete Korngrenzen erkennen (Abb. 8.20d und f). Die Entstehung solcher Mikrorisse ist typisch für ein granoblastisches Korngefüge wie im vorliegenden Fall, welches durch eine penetrative Mikrorissbildung fast ausschließlich entlang von Korngrenzen gekennzeichnet ist. Der Vergleich zwischen beiden Proben legt nahe, dass die Risse erst durch die Verwitterung am Bauwerk erzeugt wurden.

8.2.2 Porositätskennwerte versus Plattenverbiegung

Porosität und Porenradienverteilung sind verwitterungssensible Parameter und dienen zur Quantifizierung der Gefügeauflockerung im Zuge progessiver Verwitterung. Je höher die Porosität, desto schneller können Schadstoffe durch flüssige oder gasförmige Medien (z.B. Regen, Atmosphärilien) aufgenommen werden, welche zusätzlich durch Lösungsprozesse im Gesteinsinneren den Verwitterungsprozess beschleunigen können.

Die Bestimmung der Porositätskennwerte erfolgte mittels Quecksilberporosimetrie an jeweils mindestens zwei Zylinder (∅ = 12,5 mm; Länge ≈ 40 mm), die jeweils aus der Mitte der Fassadenplatten P0 bis P7 entnommen wurden.

Abb. 8.21 zeigt eine deutlichen Zusammenhang zwischen dem Anstieg der Porosität (aus der Hg-Porosimetrie) und der Plattenverbiegung. Während die quasi bruchfrische Referenzprobe S0 sowie die sehr schwach verbogene Fassadenplatte S1 eine initiale Porosität von lediglich 0,45 % aufweisen, steigt die Porosität mit zunehmendem Verbiegungsgrad bis zu einem Wert von 2,00 % für die Probe S7 an. Bereits der Wert im unverwitterten Zustand (0,45 %) ist als relativ hoch einzuordnen. Die meisten

Marmortypen besitzen bruchfrisch einen Wert von unter 0,30 % (vgl. Kap. 7.1). Eine Porosität von 2,00 % bedeutet eine extreme Zunahme der Rissporosität im Gestein.

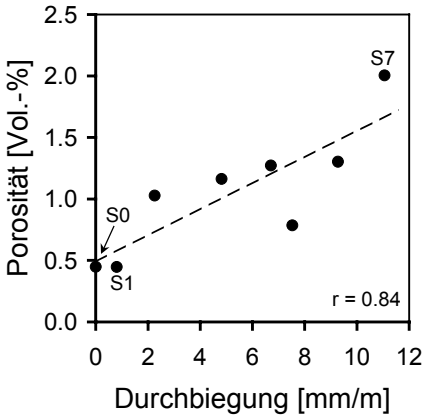


Abb. 8.21: Zusammenhang zwischen Porosität und Plattenverbiegung am Beispiel der acht demontierten Fassadenplatten: Eine Innenplatte (S0) und sieben Außenplatten (S1 bis S7). Eingetragen sind die Regressionsgerade (gestrichelte Linie) und der Korrelationskoeffizient (r).

Aus Abb. 8.22 wird ersichtlich, wie sich die Porengrößen mit zunehmendem Verformungsgrad in den Bereich größerer Poren verschieben und der Anteil hoher Porenradienklassen am Gesteinsvolumen immer größer wird, was eine deutliche Öffnung der Korngrenzen belegt. Das Porenradienmaximum verschiebt sich von unter 0,1 µm auf knapp 1 µm. Weiterhin wird deutlich, dass offensichtlich keine Porosität durch neu entstandene Risse herausgebildet wird, was das Verschwinden der Porenklassen <0,1 µm zeigt.

Dieser Zusammenhang wird auch in Abb. 8.23 deutlich. Die Weitung der Korngrenzen, die durch den Anstieg des mittleren Porenradius zum Ausdruck gebracht wird, schreitet kontinuierlich zusammen mit einem Anstieg der Porosität fort. Die starke Kopplung mit der Porositätszunahme deutet darauf hin, dass nicht etwa einzelne Risse die mittlere Porengröße ansteigen lassen, sondern vielmehr eine penetrative Vernetzung sich weitender Risse, wie sie durch sich öffnende Korngrenzen herausgebildet wird.

Eine Frage, die sich dabei stellt ist, ob die Rissporositäten auf der Vorder- und Rückseite der Fassadenplatten messbar unterschiedlich sind. Es wird angenommen, dass die Verbiegung aus einer Differenz in der Restdehnung zwischen Vorder- und Rückseite resultiert (vgl. Kap. 6.3). Da sich die Marmorplatten an der SUB-Fassade konvex nach außen verbiegen, müsste sich entsprechend auf der Vorderseite eine höhere Gefügeauflockerung mit höherer Porosität und größeren Porenradien nachweisen lassen. Zu diesem Zweck wurde an den beiden am stärksten verbogenen Platten S6 und S7 die Porenradienverteilung an jeweils zwei Probezylinder aus den oberen 2 cm der Vorderseite und jeweils zwei Probezylinder aus den hinteren 2 cm der Rückseite ermittelt (Abb. 8.24). Die insgesamt vier Probezylinder je Platte wurden aus dem Plattenzentrum entnommen.

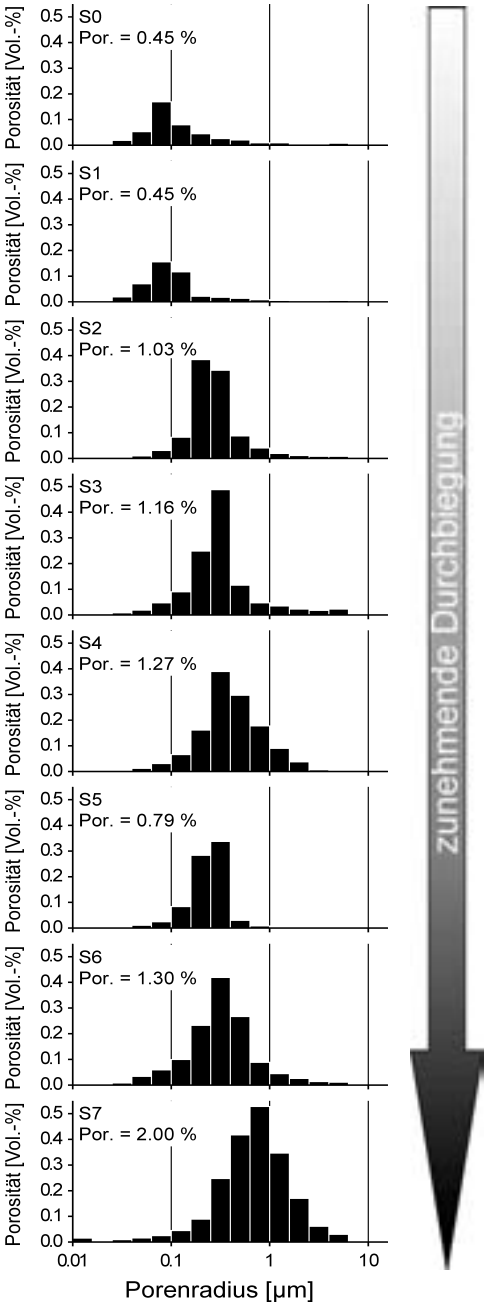


Abb. 8.22: Änderung der Porenradienverteilung in Abhängigkeit der Plattenverbiegung. Die Gesamtporosität (Por.) ist jeweils angegeben.

Die Ergebnisse bestätigen die Vermutung (Abb. 8.24). Der Porositätsunterschied zwischen Vorder- und Rückseite ist sehr deutlich. Er beträgt bei der Platte S6 etwa 0,8 % und ist bei der stärker verbogenen Platte S7 entsprechend höher bei 1,0 %.

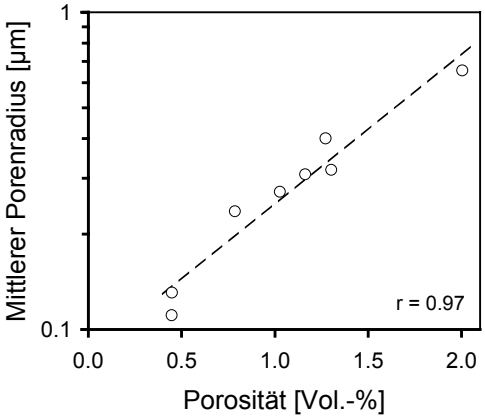


Abb. 8.23: Zusammenhang zwischen mittlerem Porenradius (errechnet aus der Porenradienverteilung) und der Porosität aus den acht demontierten Fassadenplatten. Eingetragen sind die Regressionsgerade (gestrichelte Linie) und der Korrelationskoeffizient (r).

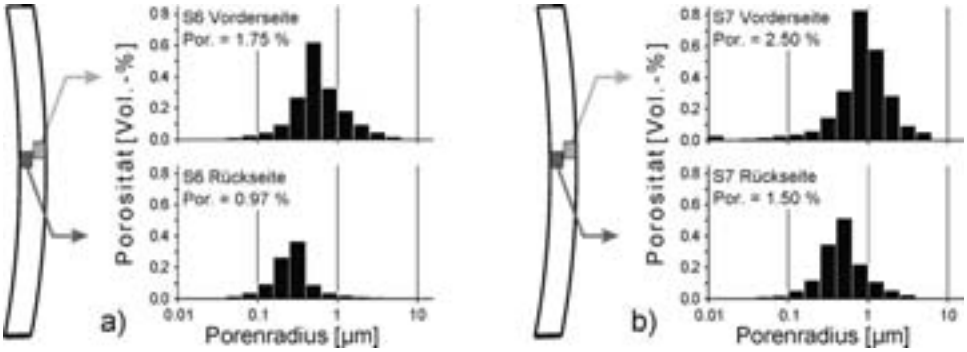


Abb. 8.24: Unterschiede in der Porosität und der Porenradienverteilung zwischen der Vorder- und der Rückseite der stark konvex verbogenen Fassadenplatten a) S6 und b) S7. Jedes Histogramm beruht auf der mittleren Verteilung von zwei Messungen.

8.2.3 Mechanische Eigenschaften versus Plattenverbiegung

Bei der Eignungsprüfung für die Verwendung als hinterlüftete Fassade sind die Ermittlung der Biegezugfestigkeit nach DIN 52112 bzw. EN 12372 sowie der Ausbruchlast am Ankerdornloch nach prEN 13364 obligatorische Verfahren (DIN 18516). Beide Kenngrößen geben Aufschluss über die Standsicherheit von Fassadenplatten, die den mechanischen Beanspruchungen am Gebäude insbesondere durch Winddruck- und Windsoglasten Stand halten müssen. Im vorliegenden Fall gilt es, den Ist-Zustand der Fassade nach 13 Jahren Exposition am Gebäude zu charakterisieren. Darüber hinaus stellt sich die Frage, inwieweit der Grad der Plattenverbiegung mit der Abnahme der Gesteinsfestigkeit als sicherheitsrelevanter Parameter korreliert. Übertragen auf das Gebäude könnte so mit Hilfe des Verformungsgrades indirekt auf die Standfestigkeit der Fassadenplatten geschlossen werden.

In einer Stellungnahme von Hermann Ritter zu Langzeitschädigungen bei Carrara Marmor vom 31.07.1990 wird ein Mindestwert für die Biegefestigkeit des Materials

von 10,8 MPa angegeben. Dieser Wert entspricht in etwa der initialen Biegezugfestigkeit, wie sie an der Referenzplatte S0 aus dem Innenbereich mit 9,5 MPa und der kaum verbogenen Platte S1 aus einem geschützten Bereich der Fassade mit 11,7 MPa ermittelt wurden (Abb. 8.25a).

Am Beispiel der untersuchten Fassadenplatten zeigt sich, dass mit zunehmender Durchbiegung der Marmorplatten ihre Festigkeit abnimmt, wobei die Trendkurve etwa den Verlauf einer Potenzfunktion wider spiegelt (Abb. 8.25).

Die Biegefestigkeit nimmt bis zu einer Durchbiegung von etwa 2 mm/m zunächst stark ab, worauf sich der Abfall stark verlangsamt und sich in einem Bereich zwischen 4 und 6 MPa einpendelt (Abb. 8.25a).

Der gleiche Verlauf zeigt sich beim Verhältnis Ausbruchlast am Ankerdornloch versus Durchbiegung (Abb. 8.25b). Die initiale Ankerausbruchfestigkeit von 2,4 kN für S0 und 2,9 kN für S1 fällt zunächst rasch auf unter 2,0 kN ab und erreicht bei der am stärksten verbogenen Probe S7 einen Minimalwert von 1,4 kN. Das bedeutet, dass sich die Ausbruchlast am Ankerdornloch gegenüber dem Ursprungszustand um bis zu 54 %, die Biegefestigkeit sogar um bis zu zwei Drittel reduziert hat. Insgesamt lässt sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen Plattenverbiegung und Materialentfestigung feststellen.

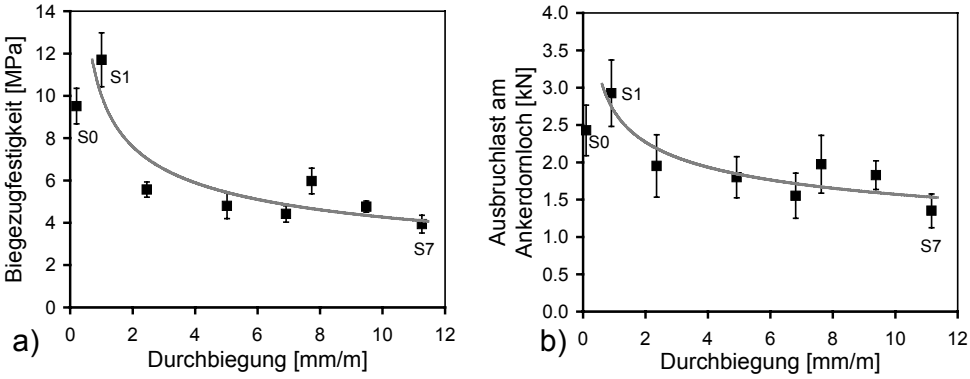


Abb. 8.25: a) Biegefestigkeit und b) Ausbruchlast am Ankerdornloch (Mittelwerte) als Funktion der Plattenverbiegung am Beispiel der acht demontierten Fassadenplatten. Die Fehlerindikatoren markieren die Standardabweichung. Die Regressionskurven (graue Linien) spiegeln den Verlauf einer Potenzialfunktion wider.

Im vorliegenden Beispiel zeigt sich darüber hinaus, dass die beiden untersuchten Festigkeitskennwerte stark miteinander korrelieren (Abb. 8.26). Dies ist dann gegeben, wenn es sich hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften um ein annähernd isotropes Material handelt, d.h. Festigkeit einer Platte mehr oder weniger richtungsunabhängig ist. Andernfalls würde man in Abhängigkeit der Plattenschnittlage starke Richtungsunterschiede in der Gesteinsfestigkeit feststellen, die zu einer schlechteren Korrelation führen würden (vgl. Kap. 8.1.4). Solche Unterschiede können bei stark anisotropen Marmoren – meist gekennzeichnet durch eine makroskopisch deutlich sichtbare Foliation – bis zu Faktor 3 betragen (vgl. Abb. 7.3).

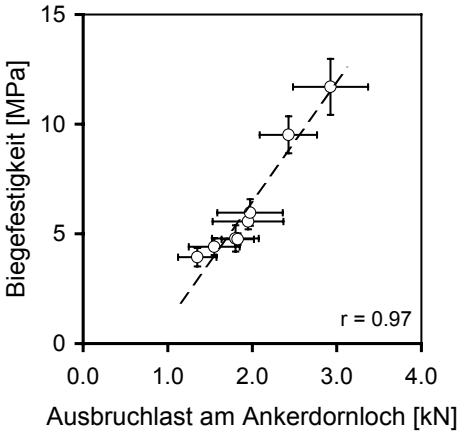


Abb. 8.26: Zusammenhang zwischen Biegefestigkeit und Ausbruchlast am Ankerdornloch am Beispiel der acht demontierten Fassadenplatten. Eingetragen sind die Regressionsgerade (gestrichelte Linie) und der Korrelationskoeffizient (r). Die Fehlerindikatoren markieren die Standardabweichung.

Um die Richtungsabhängigkeit des Fassadenmaterials am SUB-Gebäude zu überprüfen, wurden die jeweils 10 Prüfkörper pro Fassadenplatte zur Bestimmung der Biegefestigkeit jeweils derart herauspräpariert, dass die resultierende Zugkraft während des Prüfverfahrens 5mal parallel zur langen Plattenkante und 5mal parallel zur kurzen Plattenkante wirkt (vgl. Skizze in Abb. 8.27). Die Biegefestigkeiten aus den beiden Zugrichtungen in jeder Fassadenplatte wurden miteinander verglichen.

Wie aus den oben genannten Überlegungen zu vermuten war, sind aufgrund des isotropen Materialverhaltens hier keine signifikanten Richtungsunterschiede festzustellen (Abb. 8.27). Die Festigkeitsunterschiede liegen überwiegend noch im Bereich der Standardabweichung der Werte aus den einzelnen Richtungen. Lediglich die Proben S1 und S5 zeigen stärkere Richtungsabhängigkeiten von 16 bzw. 15 %. Es scheint sich eine leichte Tendenz abzuzeichnen, dass die Biegefestigkeit bei den verbogenen Platten (S2 bis S7) parallel zur langen Plattenkante stärker reduziert ist. Die geringen Richtungsunterschiede und die kleine Probenanzahl lassen diesbezüglich jedoch keine statistisch fundierten Schlussfolgerungen zu.

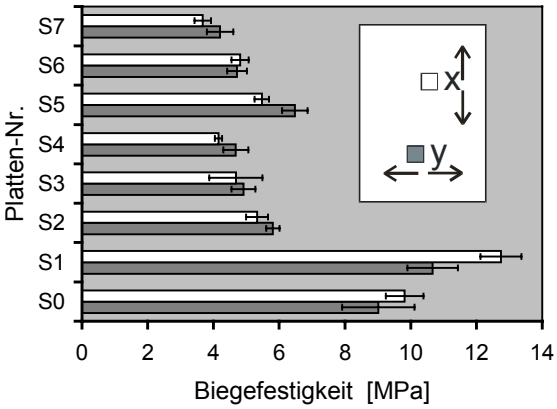


Abb. 8.27: Anisotropie der Biegefestigkeit in den acht demontierten Fassadenplatten. Die Legende stellt die resultierenden Zugrichtungen während des Prüfverfahrens relativ zur Fassadenplatte dar: x = parallel zur langen Plattenkante; y = parallel zur kurzen Plattenkante. Die Fehlerindikatoren markieren die Standardabweichung.

8.2.4 Korrelation zwischen petrophysikalischen Eigenschaften

Es ist zu erwarten, dass die Gesteinsfestigkeit im Zuge progressiven Risswachstums abnimmt. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 8.28 dargestellt. Es zeigt sich, dass sowohl die Biegefestigkeit als auch die Ausbruchlast am Ankerdornloch mit zunehmender Porosität, welche den Anteil des Rissvolumens am Gesamtgestein ausdrückt, reduziert wird. Dieses Verhältnis hat dabei annähernd den Verlauf einer Potenzfunktion, d. h. die erste verwitterungsbedingte Neubildung von Porenvolumen ist zunächst verknüpft mit einer starken Reduktion der Gesteinsfestigkeit, welche sich bei einer weiteren Zunahme der Porosität immer weiter verlangsamt. Die Herausbildung von Rissvolumina im Gestein scheint also bei frischen oder schwach verwitterten Marmorplatten eine stärkere Entfestigung hervorzurufen als bei stärker verwitterten, die dann allerdings bereits sehr niedrige Festigkeitswerte aufweisen.

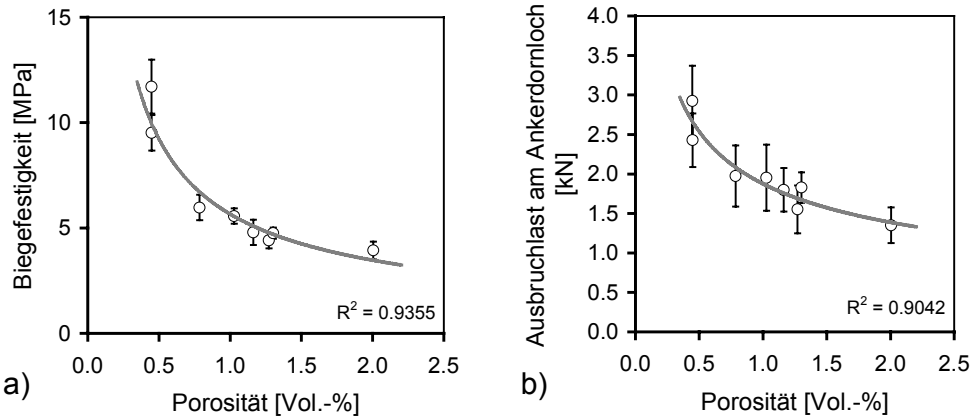


Abb. 8.28: Zusammenhang zwischen a) Biegefestigkeit bzw. b) Ausbruchlast am Ankerdornloch und Porosität am Beispiel der acht demontierten Fassadenplatten. Die Fehlerindikatoren markieren die Standardabweichung. Gegeben sind jeweils die Trendlinie in grau und das Bestimmtheitsmaß (R^2).

8.2.5 Schadenspotenzial

Mit Hilfe des Biegetests (Kap. 3.3.2.4) wurden die Witterungsbedingungen am Bauwerk, die letztlich zur Verformung und Entfestigung des Fassadenmarmors führen, in extremer Weise im Labormaßstab simuliert. Zu diesem Zweck wurden aus sechs der acht demontierten Fassadenplatten (S0, S1, S3, S4, S6, S7) jeweils drei Probekörper (400 x 100 x 40 mm) heraus präpariert und 40 Heizzyklen ausgesetzt.

Der Biegeversuch soll zeigen, wie sich das Fassadenmaterial unter fortdauernder Beanspruchung durch künstliche Verwitterung verhält, um Informationen zum Schädigungspotenzial und somit erste Anhaltspunkte zur Langzeitstabilität des Marmors am Gebäude zu erhalten.

8.2.5.1 Durchbiegung und Expansion unter künstlicher Verwitterung

Die Kurvenverläufe der Durchbiegung sowie der Expansion der einzelnen Probekörper sind in Anhang 4 zusammengefasst. Die Durchbiegung der Probekörper nimmt nach 40 Temperaturzyklen zwischen 0,75 mm/m (S7-1) und 3,62 mm/m (S1-2) zu. Die irreversible Längsdehnung der Platten nimmt um bis zu 1,1 mm/m zu. Dabei zeigt sich, dass die Verbiegung bei wenigen Proben stagniert, während sie bei den meisten Proben auch nach 40 Zyklen weiter fort schreitet. Die Expansion dagegen hält bei allen Probekörpern kontinuierlich an.

Vergleicht man die mittlere Durchbiegung aus den jeweils drei Probekörpern der sechs untersuchten Fassadenplatten miteinander, zeichnet sich die Tendenz ab, dass die Zunahme der Plattenverbiegung im Biegeversuch mit zunehmender Vorschädigung der Fassadenplatten abnimmt (Abb. 8.29a). Je stärker also eine Fassadenplatte vorher am Gebäude verbogen war, desto schwächer verbiegt sie sich unter Laborbedingungen und umgekehrt. So nimmt die mittlere Durchbiegung im Biegeversuch von 2,4 mm/m und 3,0 mm/m für die kaum verwitterten Fassadenplatten S0 und S1 auf bis zu 1,4 mm/m für die stark verformte Platte S7 ab (Abb. 8.29a).

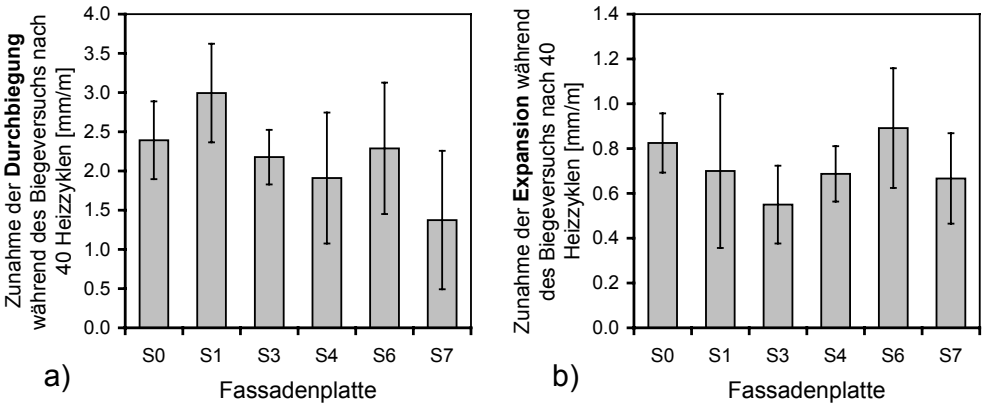


Abb. 8.29: Zunahme der a) Durchbiegung bzw. b) der Expansion der einzelnen Fassadenplatten während des Biegeversuchs nach 40 Heizzyklen. Jeder Balken repräsentiert den Mittelwert aus drei Probekörper je Fassadenplatte. Die Fehlerindikatoren markieren die Standardabweichung. Die Vorschädigung der Fassadenplatten nimmt von links nach rechts zu.

Es gilt dabei zu bedenken, dass die Bedingungen am Gebäude und im Biegeversuch über die unterschiedliche Art der Verwitterung hinaus auch in folgender Hinsicht unterschiedlich sind: Während am Gebäude alle Platten den gleichen Ausgangszustand haben und sich in der Exposition unterscheiden, d. h. unterschiedlich stark den Witterungseinflüssen ausgesetzt sind, ist es im Biegeversuch umgekehrt. Die Vorschädigung ist unterschiedlich, der Verwitterungseinfluss jedoch konstant. Im Hinblick darauf erscheint es logisch, dass das Verbiegungspotenzial bei relativ frischen Platten höher ist (Abb. 8.30).

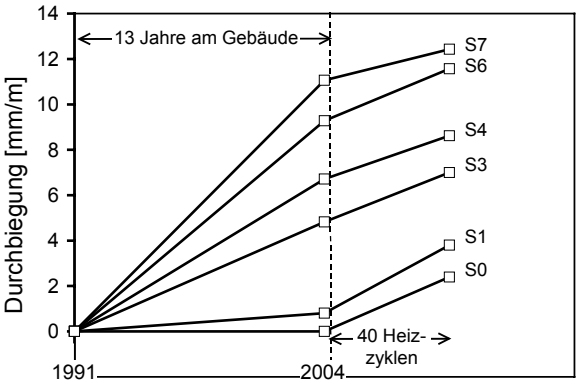


Abb. 8.30: Verlauf der Durchbiegung der sechs untersuchten Fassadenplatten während der Exposition am Gebäude und nach 40 Zyklen künstlicher Verwitterung im Labor.

Die Expansion dagegen erscheint von diesem Trend unbeeinflusst. Abb. 8.29 lässt keinen Zusammenhang zwischen der Vorschädigung der Platten und der mittleren Expansion im Biegeversuch erkennen.

8.2.5.2 Festigkeitsverlust nach künstlicher Verwitterung

Von den künstlich weiter verwitterten Probekörpern aus dem Biegeversuch wurden jeweils zwei Prüfkörper (240 x 50 x 40 mm) für die Bestimmung der Biegezugfestigkeiten und ein Prüfkörper (160 x 100 x 40 mm) für die Analyse der Ausbruchlasten am Ankerdorn präpariert. Letztere sind kleiner als in der prEN 13364 vorgesehen und wurden daher nur mit drei Ankerdornen versehen. Es sollte das Entfestigungspotenzial bestimmt werden.

Nach thermischer und hygrischer Beanspruchung im Biegeversuch zeigen alle Fassadenplatten eine deutliche Reduktion in der Biegefestigkeit und in der Ausbruchlast am Ankerdornloch (Abb. 8.31). Die relative Abnahme der Biegefestigkeit beträgt nach 40 Heizzyklen mindestens 26 % (S3) und erreicht einen Maximalwert von 42 % (S7). Die Ausbruchlast am Ankerdornloch reduziert sich zwischen 13 % (S7) und 33 % (S0).

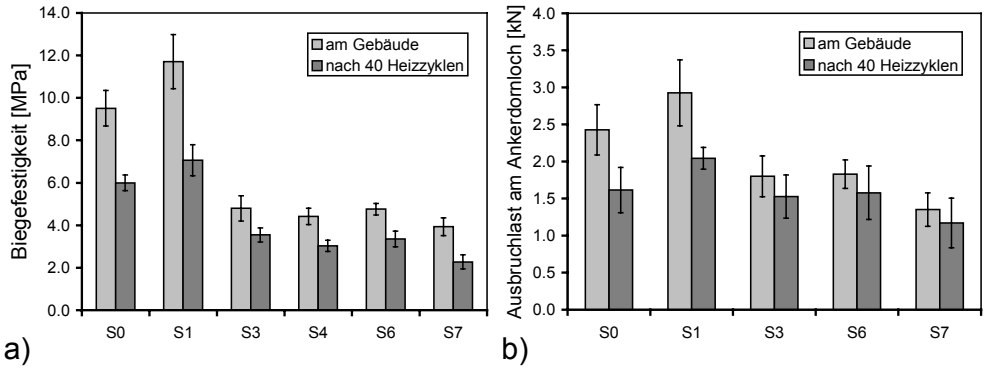


Abb. 8.31: Vergleich der a) Biegefestigkeit und der b) Ausbruchlast am Ankerdornloch der untersuchten Fassadenplatten vor und nach der Durchführung des Biegeversuchs mit 40 Heizzyklen. Die Fehlerindikatoren markieren die Standardabweichung.

Es zeigt sich, dass die Gesteinsfestigkeit im Biegeversuch stärker abnimmt als es der Trendkurve im Zustand am Gebäude entsprechen würde (Abb. 8.32). Trägt man die Mittelwerte der Gesteinsfestigkeit aus den einzelnen Fassadenplatten gegen die Gesamtverbiegung ab, liegt die Trendkurve der künstlich verwitterten Proben unter der der frisch demontierten Platten.

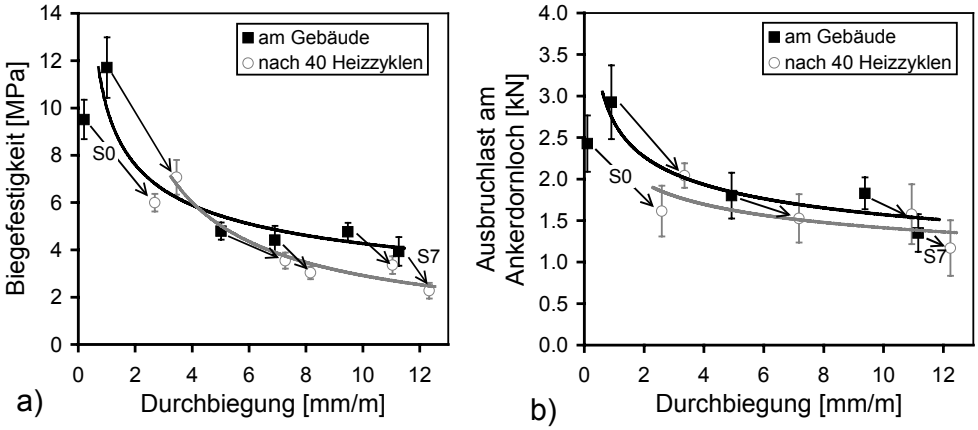


Abb. 8.32: Vergleich der Verhältnisse a) Biegefestigkeit versus Durchbiegung und b) Ausbruchlast am Ankerdornloch versus Durchbiegung der untersuchten Fassadenplatten **vor** (schwarze Trendlinien) und **nach** der Durchführung des Biegeversuchs (graue Trendlinien) mit 40 Heizzyklen. Die Fehlerindikatoren markieren die Standardabweichung.

Insgesamt lässt das Fassadenmaterial der SUB ein hohes Schädigungspotenzial erkennen. Die Ergebnisse aus dem Biegeversuch liefern keine Indizien dafür, dass das Fortschreiten der Plattenverformung durch Verbiegung und Expansion und die damit einher gehende Entfestigung des Marmors sich nennenswert verlangsamt oder gar stoppt.

9 Zusammenfassende Interpretation

Seit der Antike wird Marmor als Naturwerkstein genutzt. Seine geringe Härte und die damit verbundene einfache Bearbeitbarkeit, aber vor allem seine ästhetische Erscheinung haben ihn zu einem wichtigen Bestandteil des kulturellen Erbes der Menschheit werden lassen. Im Zuge verbesserter maschineller Fertigungstechniken wird Marmor seit einigen Jahrzehnten zunehmend für großflächige Fassadenverkleidungen verwendet. Im gleichen Zeitraum häuften sich weltweit die Probleme, die zu einer Reduzierung der Lebensdauer vieler Marmorfassaden geführt haben. Dabei erfahren die üblicherweise 30 bis 40 mm dicken Marmorplatten durch den Einfluss hauptsächlich physikalischer Verwitterungsprozesse eine penetrative Auflockerung des Gefüges, die mit einer Deformation und der Entfestigung des Materials einher geht. Das spektakulärste Phänomen dieser Form der Verwitterung ist das Verbiegen von Marmorplatten. Die Problematik hat bereits zum kostspieligen Austausch ganzer Fassadenverkleidungen geführt und sich zu einem Imageproblem für den Werkstoff Marmor ausgeweitet, das mittlerweile auch wirtschaftliche Bedeutung erlangt hat durch Umsatzeinbußen in der Marmorindustrie und nicht zuletzt durch aufwändige Sanierungsmaßnahmen der betroffenen Fassaden.

Die Verformung von Fassadenplatten ist indessen nicht nur auf Marmor beschränkt, sondern wurde auch an dichtem Kalkstein (Suenson 1942), Granit (Winkler 1996) und anderen Naturwerksteinen beobachtet. Ungeachtet dessen, ob hier die gleichen Mechanismen wirksam sind, tritt die Verformung bei Marmor doch ungleich häufiger auf. Der wesentliche Unterschied zu anderen Natursteinen beruht hierbei auf den extremen thermischen Eigenschaften der Hauptminerale Calcit und Dolomit, die gegenüber anderen gesteinsbildenden Mineralen eine hohe Anisotropie der thermischen Dehnung aufweisen. Dies führt bei entsprechenden Witterungseinflüssen zu hohen inneren Spannungen im Marmor, was die Dekohäsion des Kornverbandes begünstigt. Zumindest im Initialstadium spielen thermische und thermo-hygrische Verwitterungsprozesse die wichtigste Rolle. Sie führen zur Herausbildung eines Netzwerks von Mikrorissen, das entlang von mechanischen Schwächezonen im Gestein wie Korngrenzen, kristallinternen Flächen sowie kornübergreifenden Diskontinuitäten entsteht. Mit wachsender Rissporosität treten verstärkt weitere Verwitterungsmechanismen hinzu, die auf der Wirksamkeit des Wasser beruhen, wie z.B. Lösungsprozesse oder Frostsprengung im Gesteinsinneren (Poschlod 1990). Wenn sich das Porenvolumen erhöht, dehnt der Marmor sich zwangsläufig aus. Sind die Dehnungsbeträge über eine Marmorplatte hinweg ungleichmäßig verteilt, wird sie sich verbiegen. Insofern kann Durchbiegung in erster Linie als eine Erscheinungsform mikrorissbedingter Expansion betrachtet werden. Darüber hinaus können Zwängungen (vgl. Abb. 8.4) und kristallplastische Deformation an der Durchbiegung beteiligt sein (Logan et al. 1993; Grimm 1999).

Die vorliegende Arbeit hatte zum Ziel, ein differenzierteres Wissen darüber zu erreichen, welche umweltbedingten (extrinsischen) und materialspezifischen (intrinsischen) Parameter Einfluss auf den Prozess der Verbiegung und Entfestigung von Fassadenplatten aus Marmor ausüben. Es war insbesondere das Anliegen, den bislang nur wenig untersuchten Einfluss richtungsabhängiger Gefügeeigenschaften auf die Schnittlage der Platten zu untersuchen. Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der besonde-

ren Rolle von Wasser im Verwitterungsprozess. Zu diesem Zweck wurden an insgesamt vier Gebäuden detaillierte Schadenskartierungen durchgeführt, um in-situ den Einfluss extrinsischer und intrinsischer Parameter zu eruieren. An bruchfrischen Vergleichsproben der zwei an den Gebäuden verwendeten sowie weiterer Marmortypen wurden das Mikrogefüge und das Verhalten unter künstlicher Verwitterung charakterisiert und mit der Verwitterungsdynamik am Gebäude verglichen. Die Verknüpfung von Labordaten und Schadenskartierungen stellt das Phänomen der Plattenverbiegung auf eine breite Basis und erlaubt erste Prognosen zum Langzeitverhalten des Fassadenmarmors.

Nachfolgend wird zunächst die Gefügeabhängigkeit der Plattendeformation sowie elastischer und mechanischer Kennwerte auf Basis von Laboruntersuchungen dargelegt. Danach werden die Laborkenntnisse ans Bauwerk überführt. Hierbei wird der besondere Einfluss der Feuchtigkeit auf die Plattendeformation diskutiert. Des Weiteren wird die Übertragbarkeit der im Labortest künstlich erzeugten Plattenverbiegungen auf die Gebäudefassade erörtert. Abschließend werden am Beispiel des SUB-Gebäudes Laboranalysen und in situ Untersuchungen miteinander verknüpft, um den zeitlichen Verlauf der Standsicherheit der Marmorplatten zu prognostizieren.

9.1 Gefügeabhängigkeit der Schadensdynamik von Marmor

Es stellt sich die Frage, welchen Einfluss das Mikrogefüge auf die spezielle Form der Verwitterung bei Fassadenplatten aus Marmor hat. Der Verwitterungsprozess wird in der Anfangsphase thermisch initiiert. Eine wesentliche Bedeutung bei der thermischen Mikrorissbildung kommt der hohen Anisotropie der Einkristalleigenschaften von Calcit und Dolomit zu, welche die Voraussetzung für das besondere Verwitterungsverhalten bei Marmor darstellt. Während der Ausdehnungskoeffizient von Calcit parallel zur kristallographischen c-Achse mit 26×10^{-6} K^{-1} einen hohen Wert aufweist, ist er senkrecht dazu parallel zu den a-Achsen mit -6×10^{-6} K^{-1} sogar negativ (Kleber 1990). Bei Dolomit ist die Anisotropie weniger stark ausgeprägt. Die hohe Anisotropie der thermischen Dehnung der einzelnen Calcit- bzw. Dolomitkristalle führt bei einer Temperaturänderung zu Zug-, Druck- und Scherspannungen innerhalb des Kornverbandes, die bei Überschreitung der Kornkohäsion zur Rissbildung entlang von mechanischen Schwächezonen wie Korngrenzen, intrakristalline Spaltflächen oder transgranulare Diskontinuitäten führen.

Die Textur als ein wichtiger Gefügeparameter hat aufgrund der anisotropen Eigenschaften der Einzelkristalle Einfluss auf die Anisotropie von Marmoren, welche in der Regel eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Textur zeigen. Ist eine Textur vorhanden, pausen sich die anisotropen Kristalleigenschaften auf das Gesamtgestein durch. Abhängig von der mineralogischen Zusammensetzung fällt bei vorhandener Textur die Anisotropie entsprechend stärker (Calcit) oder schwächer (Dolomit) aus. Das Texturmuster (c-Achsen- oder a-Achsenfasertyp) bestimmt darüber hinaus das räumliche Verteilungsmuster einer anisotropen petrophysikalischen Eigenschaft wie die thermische Dehnung oder die Kompressionswellengeschwindigkeit. Dabei ist die Anisotropie bei punktförmigen c-Achsenkonzentrationen tendenziell höher als bei a-Achsenfasertypen.

Einfluss des Gefüges auf die Deformation von Fassadenplatten

Bezüglich der Deformation von Fassadenplatten aus Marmor ist zu unterscheiden zwischen

- einer reversiblen Längenänderung als spontane Reaktion auf einen Temperaturwechsel, wie er sich täglich im Rahmen von Tag-Nacht-Zyklen vollzieht,
- einer dauerhaften (irreversiblen) Restdehnung, welche die Folge thermischer oder thermo-hygrischer Mikrorissbildung ist und somit einen Indikator für die Verwitterungsanfälligkeit darstellt,
- und der irreversiblen Verbiegung von Marmorplatten, die im Wesentlichen aus der Differenz der Restdehnung zwischen Vorderseite und Rückseite resultiert. Diese Differenz wird mit wachsender Restdehnung größer, so dass bei gegebenen äußeren Bedingungen die Verbiegung mit der Restdehnung korreliert.

Die thermische Längenänderung wird primär von der Textur bestimmt. Bei steigender Temperatur geht die Dehnung in einer bestimmten Richtung konform mit der c-Achsenintensität, d. h. die thermische Dehnung ist in Richtung des c-Achsenmaximums am größten und kann bei Calcitmarmoren im Falle einer starken Textur in Richtung des c-Achsenminimums (entspricht der Orientierung des a-Achsenmaximums) auch negativ sein (Kontraktion). Die Anisotropie der thermischen Dehnung kann damit auch als Maß für die Intensität der Textur herangezogen werden (vgl. Tschegg et al. 1999).

Im unteren Temperaturbereich üben darüber hinaus Mikrorisse Einfluss auf die thermische Längenänderung aus. Die Dehnung der Calcit-Einkristalle wird von bereits vorhandenen Mikrorissen abgepuffert, wodurch eine vollständige Übertragung auf das Gesamtgestein vermindert wird. Dieser Effekt schwächt sich bei zunehmender Temperatur langsam ab, so dass die Dehnungsrate wieder ansteigt. Der Verlauf dieses Anstiegs hängt von der Sensibilität gegenüber thermischer Beanspruchung bzw. vom Grad der thermischen Vorschädigung ab (Rüdrich et al. 2001).

Die durch das anisotrope Dehnungsverhalten der einzelnen Calcitkristalle erzeugten thermischen Spannungen führen zur Bildung neuer und zur Weitung bereits vorhandener Mikrorisse. Die permanente Restdehnung ist der akkumulierte Betrag der Risswei tung, die aus der Aktivierung mechanischer Schwachstellen im Gestein resultiert. Die Unterschiede in der Restdehnung zwischen den verschiedenen Richtungen eines Marmors sind häufig stärker als die Intensitätsunterschiede zwischen verschiedenen Marmortypen. Die Anisotropie der Restdehnung wird dabei nach den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit im Wesentlichen von der Textur und von der Kornformregelung bestimmt. Hierbei kontrolliert die Textur die Weitung aktivierter Mikrorisse, welche aufgrund der Anisotropie der thermischen Längenänderung in den verschiedenen Richtungen unterschiedlich ist. Die Kornformregelung bestimmt dagegen die Risshäufigkeit: Thermisch induzierte Mikrorisse bilden sich in Abhängigkeit von der Kornverzahnung meist entlang von Korngrenzen heraus. Nach Rüdrich (2003) trifft dies in erster Linie auf equigranular polygonale Korngefüge zu, wogegen bei seriat interlobaten Korngefügen zunehmend intragranulare Flächen aktiviert werden. Die hier untersuchten Marmortypen (auch mit nicht polygonalem Korngefüge) entfestigen jedoch primär entlang von Korngrenzen. Die Risshäufigkeit in einer bestimmten Richtung ist

daher proportional zur Korngrenzenhäufigkeit, welche direkt mit der Kornformregelung verknüpft ist. Entsprechend ist die Risshäufigkeit in der bevorzugten Richtung der Kornlangachsen am kleinsten und in der Vorzugsrichtung der kürzesten Korndurchmesser am größten.

Bei Marmoren mit Merkmalen einer dynamischen Rekristallisation sind die Korngrenzen oftmals bevorzugt senkrecht zum c-Achsenmaximum orientiert, so dass sich die richtungsabhängigen Effekte aus Kornformorientierung und Textur in der Regel überlagern. Wenn die Effekte gegenläufig wirken, heben sie sich entweder gegenseitig auf, so dass die Restdehnung isotrop wird, oder eines der beiden Gefügemerkmale dominiert, wobei die Wirkung des anderen überprägt wird.

Die Verbiegung von Fassadenplatten korreliert in Intensität und Anisotropie sehr stark mit der Restdehnung. Die Anisotropie der Plattenverbiegung wird somit in gleicher Weise von der Textur und von der Kornformorientierung bestimmt. Die Verbiegung kann in Abhängigkeit von der Schnittlage um bis zu Faktor 3 variieren. Bei Marmoren mit dynamisch rekristallisiertem Gefüge treten die maximalen Verbiegungen meist in Schnittlagen auf, in denen die Längsachse der Platte parallel zum c-Achsenmaximum orientiert ist, welches oftmals senkrecht zur makroskopisch sichtbaren Foliation verläuft. Das muss aber je nach geologischer Vorgeschichte und Deformationsbedingungen nicht zwangsläufig der Fall sein.

Die Restdehnung und die Plattenverbiegung als Indikatoren für den Grad der Gefügeauflockerung werden zusätzlich zu vektoriellen (richtungsabhängigen) Gefügeparametern wie die Textur oder die Kornformorientierung, welche sich vornehmlich auf die Richtungsabhängigkeit der Deformation auswirken, von skalaren (richtungsunabhängigen) Gefügeparametern wie die Korngrenzengeometrie oder die Korngrößenverteilung bestimmt, welche die Intensität der Deformation beeinflussen. Vektorielle wie skalare Gefügeelemente wirken dabei komplex zusammen (Abb. 9.1), wobei die Richtungsunterschiede der Deformation einzelner Marmortypen die Intensitätsunterschiede zwischen verschiedenen Marmortypen oftmals übertreffen.

Die Korngrenzengeometrie als skalares Gefügeelement nimmt Einfluss auf den Grad der Deformation. Treten thermische Spannungen im Kornverband auf, ist die Schwelle, bei der die Kohäsion zwischen den Körnern überschritten wird, bei glatten Korngrenzen im Allgemeinen leichter erreicht als bei irregulären Korngrenzen. So lassen Marmore mit equigranular-polygonalem Korngefüge und glatten Korngrenzen die höchsten Deformationsraten erkennen, wogegen Korngefüge mit stark irregulärer Korngrenzengeometrie in der Regel niedrige Deformationsraten zeigen (vgl. auch Barsottelli et al. 1998; Royer-Carfagni et al. 1999). Im Übergangsbereich zwischen glatten und verzahnten Korngrenzen ist eine solche Beziehung nicht ohne Weiteres herzustellen. So können diverse Nebenfaktoren wie die Korngrößenverteilung oder der Anteil an Nebengemengteilen wie Glimmer zu einer gewissen Aufnahme thermisch induzierter Spannungen führen und so den Grenzwert, bei dem eine kritische Spannung erreicht wird, verschieben (Zeisig et al. 2002). Akesson et al. (2004) berücksichtigen in einem vereinfachenden Verfahren („adjacent grain analysis“) die Korngrößenverteilung und stellen einen Zusammenhang fest zwischen der Anzahl benachbarter Körner von mittelgroßen Kristallindividuen und der Verformung von Fassadenplatten. Der Ansatz beruht darauf, dass die Anzahl von Kornnachbarn mit zu-

nehmender Komplexität der Korngrenzengeometrie und der Heterogenität der Korngrenzenverteilung ansteigt.

Die Korngröße bzw. die Korngrößenverteilung bestimmt die Häufigkeit von Korngrenzen als mechanische Schwächezonen, so dass kleine Korngrößen sich nachteilig auf die Deformation auswirken sollten (Tschegg et al. 1999). Dieser Zusammenhang lässt sich nicht einfach herstellen. Es lassen sich sowohl feinkörnige Marmore mit geringer Deformationsrate als auch grobkönige Marmore mit hoher Deformationsrate beobachten. Der Korngrößeneffekt tritt in seiner Wirkung hinter dem Einfluss anderer Gefügeelemente stark zurück (vgl. Zeisig et al. 2002).

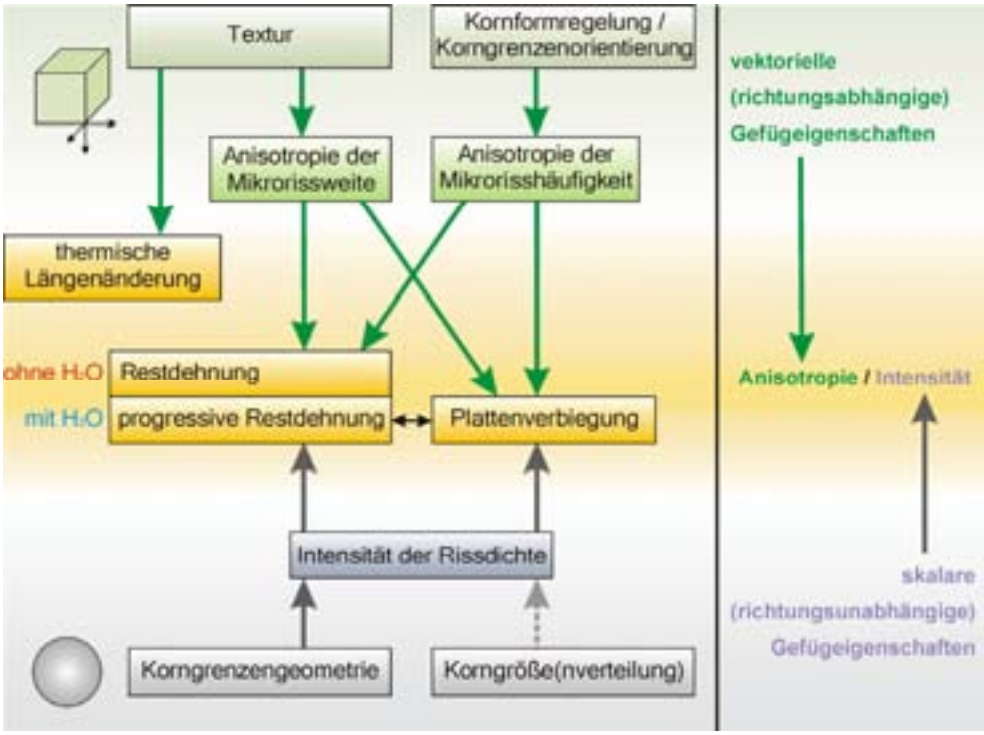


Abb. 9.1: Vereinfachtes Schema der wichtigen in dieser Arbeit untersuchten Gefügeeigenschaften und deren Einfluss auf die Deformation von Fassadenplatten aus Marmor.

Gefügeabhängigkeit von V_P

Die Kompressionswellengeschwindigkeit V_P wird im Zuge der verwitterungsbedingten Gefügeauflockerung durch die sich herausbildende Rissporosität reduziert und kann zur Beurteilung des Erhaltungszustandes eines Marmors herangezogen werden. V_P beträgt im bruchfrischen Zustand bis zu 7 km/s und kann bei sehr stark verwitterten Marmoren bis unter 1 km/s reduziert sein (Weiß et al. 2002a). Köhler (1988) führte eine Schadensklassifikation ein, die auf der Korrelation zwischen der Abnahme von V_P und der Zunahme der Porosität als Indikator für die Gefügeauflockerung basiert. Bei der Bewertung von V_P ist das Zusammenwirken verschiedener Parameter zu berück-

sichtigen (Snethlage et al. 1999), so dass diese auf V_P beruhende Einteilung des Erhaltungszustandes eine starke Vereinfachung darstellt.

Ein wesentlicher Einflussparameter, der bei der Interpretation von Ultraschallgeschwindigkeiten zu beachten ist, ist die Anisotropie des Mikrogefüges, die im Gesamtgestein nach den vorliegenden Ergebnissen eine richtungsabhängige V_P-Variation von bis zu 30 % bewirken kann. Darüber hinaus wirkt sich je nach Rissgefüge der Porenfüllungsgrad unterschiedlich aus. Der Unterschied zwischen wassergesättigten und trockenen Proben beträgt bei den hier untersuchten Proben bis zu 2 km/s.

Die Richtungsabhängigkeit von V_P beruht zum einen auf der kristallographischen Regelung der anisotropen Einkristalle von Calcit bzw. Dolomit. Die rein texturbasierte (intrinsische) räumliche V_P-Verteilung wird näherungsweise im wassergesättigten Zustand erreicht und streut bei den untersuchten Marmoren um bis zu 10 %. Im trockenen Zustand ist V_P durch den Einfluss von Mikrorissen reduziert. Präexistierende Mikrorisse sind an Schwächezonen gebunden, die durch Korngrenzen, transgranulare Risse und Zwillingsflächen dargestellt werden. Eine Regelung dieser Gefügeelemente bedingt eine Mikrorissregelung und führt in der Regel zu einer Verstärkung der texturbedingen V_P-Anisotropie. Während des Verwitterungsprozesses werden die bereits vorhandenen Mikrorisse bevorzugt aktiviert und in ihrer Effektivität noch verstärkt, was zu weiterer V_P-Reduktion und zum Anstieg der Anisotropie von V_P führt.

Gefügeabhängigkeit der Biegefestigkeit

Die Biegefestigkeit von Fassadenplatten aus Marmor wird als obligatorischer Bestandteil der Eignungsprüfung für die Verwendung als hinterlüftete Fassadenbekleidung ermittelt (DIN 18516). Sie dient zur Bewertung der Standsicherheit der Platten, die den Windlasten am Gebäude Stand halten müssen. Marmor weist gegenüber anderen Natursteinen eine relativ niedrige Biegefestigkeit auf (vgl. Strohmeyer 2003). Die Festigkeit resultiert dabei aus der Höhe der Zugspannung, bei welcher senkrecht dazu entlang von Zugrissen der Versagensbruch eintritt. Diese Zugrisse werden in der Prozesszone entlang von Schwächezonen gebildet.

Neben dem allgemeinen Einfluss der mineralogischen Zusammensetzung wirken verschiedene Gefügeelemente auf die Biegefestigkeit ein. Die Korngröße und die Korngrenzengeometrie beeinflussen als skalare Gefügeeigenschaften die Höhe der Biegefestigkeit, wobei sich kleine Korngrößen (Hugman & Friedman 1979) und eine gute Kornverzahnung günstig auswirken. Darüber hinaus bestimmen vektorielle Gefügeelemente die Anisotropie der Biegefestigkeit, die bei den untersuchten Marmoren zu einer richtungsbedingten Variation von bis zu Faktor 3 führt.

Als wichtiger Einflussparameter erweist sich die Kornformregelung, welche die Vorzugsorientierung von Korngrenzen als mechanische Schwächezonen bestimmt. Da die Körner häufig bevorzugt in der Foliationsebene eingeregelt sind, ist die Biegefestigkeit senkrecht dazu meist am niedrigsten. Neben Calcit oder Dolomit trägt die Kornformregelung von Nebengemengteilen wie insbesondere Glimmer aufgrund der guten Spaltbarkeit nach (001) nicht unerheblich zur mechanischen Anisotropie bei, was das Beispiel des Peccia Marmors zeigt. Weitere mechanische Diskontinuitäten sind trans-

granulare Mikrorisse (Beispiel: Ruivina Marmor) und die Textur, welche die Vorzugsorientierung von intrakristallinen Spaltflächen kontrolliert.

9.2 Überführung der Laborkenntnisse ans Bauwerk

9.2.1 Der besondere Einfluss von Feuchtigkeit auf das Verbiegephänomen

Die Anwesenheit von Wasser in Form von Regen oder Luftfeuchtigkeit ist eine der wesentlichen Voraussetzungen, die im Zusammenwirken mit Temperaturwechseln durch Tag-Nacht-Zyklen die Deformation von Marmor im Außenbereich herbeiführt. Bereits Bucher (1956) bemerkte, dass das Verbiegen von Marmorplatten nur aus Ländern mit ausreichenden Niederschlagsmengen bekannt ist. Winkler (1996) hebt die Bedeutung der Feuchtigkeit für den Verbiegungsprozess hervor. In zahlreichen Arbeiten (z.B. Sage 1988) wurde festgestellt, dass unter trockenen Bedingungen das wiederholte Einwirken von Temperaturwechseln nur zu einer begrenzten Deformation führt und die Restdehnung bereits nach wenigen Zyklen stagniert. Die Ergebnisse aus der vorliegenden Arbeit belegen, dass eine dauerhafte Verformung von Marmor nur unter feuchten Bedingungen voranschreitet (vgl. Abb. 6.10 und 6.11).

Am Beispiel des Marmortyps Carrara Venato Gioia (Probe Carrara 1) soll erörtert werden, welchen Effekt der Feuchtegehalt auf das Verwitterungsverhalten von Marmor als Außenwandbekleidung hat. In Kap. 6.2.3 (vgl. Abb. 6.11) konnte gezeigt werden, dass bei kontinuierlichen Temperaturwechseln die Restdehnung im Kontakt mit Wasser weiter voranschreitet, wobei die Dehnungsrate bei wechselndem Feuchtegehalt höher ist als bei permanenter Anwesenheit von Wasser. Die Feuchtewechsel wurden derart durchgeführt, dass die Probe im Verlauf eines Temperaturzyklus während der Heizphase nass gehalten wurde und in der Abkühlphase trocken war.

Übertragen auf das in-situ Verhalten am Gebäude lässt sich mit dieser Beobachtung die expositionsabhängige Verbiegung an der Marmorfassade des SUB-Gebäudes erklären (vgl. Abb. 4.17). Für die Verkleidung wurde ebenfalls die Marmorvarietät Carrara Venato Gioia verwendet. Die Plattenverbiegung nimmt dort von unten nach oben an allen Fassaden zu, wobei die nach Westen exponierte Wand die höchsten Durchbiegungen zeigt. Die Fassadenplatten der Ostfassade sind am schwächsten verbogen. Der entscheidende Einflussfaktor ist hier der Wind, welcher vornehmlich aus dem Westen weht und in seiner mittleren Geschwindigkeit mit der Höhe am Gebäude zunimmt. Die DIN 1055-4 geht bei der Ermittlung des Staudrucks zur Berechnung der Windlast von einer Zunahme der Windgeschwindigkeit von 28,3 m/s (< 8 m Höhe) bis 35,8 m/s (8-20 m Höhe) aus. Je stärker der Wind, desto stärker wird Regenwasser gegen die Fassade gedrückt und desto stärker ist der Trocknungseffekt nach einem Niederschlagsereignis (Abb. 9.2). Die Windgeschwindigkeit bestimmt also die Intensität von Feuchtewechseln, welche wie im Laborversuch Einfluss auf die Höhe der Deformation in Form der Plattenverbiegung hat. Die stärkere Austrocknung auf den Plattenvorderseiten bewirkt dort entsprechend die größere Restdehnung, so dass die Platten sich konvex nach außen wölben müssen.

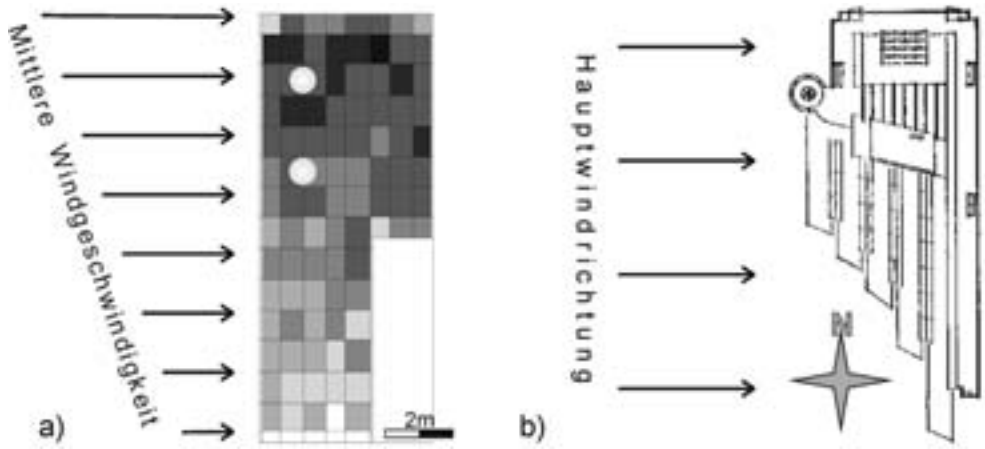


Abb. 9.2: Zusammenhang zwischen der Austrocknung durch Wind und der Plattenverbiegung an der Marmorfassade des SUB-Gebäudes: a) Mittlere Windgeschwindigkeit und Plattenverbiegung nehmen von unten nach oben zu; b) die zur Hauptwindrichtung exponierten Fassadenplatten der Westfassade sind am stärksten verbogen, wogegen die Platten auf der Ostseite die schwächste Durchbiegung zeigen (vgl. Kap. 4.2.3.2).

Die Frage, die sich dabei stellt ist, wie dieser Prozess genau vonstatten geht und auf welche Weise die Feuchtigkeit im Kornverband wirkt. Winkler (1994, 1996a) erklärt in seiner Theorie zur Ursache der Plattenverbiegung, dass bei einer relativen Luftfeuchtigkeit nahe 100 % Wasser in Form von geordneten Moleküllagen („ordered water") von den Porenwänden in Kapillarporen < 0,1 µm adsorbiert wird und durch Expansion während Temperaturzyklen das Gestein weiter dehnt. Daraus wird geschlussfolgert, dass die Platten sich konvex nach außen wölben, wenn die Sonneneinstrahlung und die Feuchtigkeit nur von außen wirken, und sich nach innen wölben, wenn die relative Luftfeuchtigkeit in einem geschlossenen Hohlraum hinter der Platte nahe 100 % verbleiben kann. Dieser Ansatz würde aber nicht erklären, warum sich die hinterlüfteten Fassadenplatten aus Peccia Marmor an den Campusgebäuden in Göttingen (vgl. Kap. 4.1) in der Mehrzahl nach innen verbiegen, zumal die sich nach außen wölbenden Fassadenplatten aus Carrara Marmor am benachbarten SUB-Gebäude (vgl. Kap. 4.2) vergleichbaren Witterungsbedingungen ausgesetzt sind.

Damit stellt sich in diesem Zusammenhang die zweite wichtige Frage, nämlich die nach der Ursache konkaver und konvexer Plattenverbiegung, die mit der Frage nach dem Prozess des Verbiegens eng verknüpft ist. Bei beiden scheint Feuchtigkeit eine entscheidende Rolle zu spielen. Wie die Platten auf Feuchtigkeit reagieren, scheint materialspezifisch zu sein und vom Marmortyp abzuhängen. Einen Hinweis darauf liefert zum Beispiel die in Kap. 4.1.3.2 (vgl. Abb. 4.7) beschriebene Beobachtung von der Nordfassade des Juridicums. Während dort die regulären Platten aus Peccia Marmor konkav (nach innen) verbogen sind, zeigen fünf Ersatzplatten aus Carrara Marmor, die später angebracht wurden, aber ansonsten den gleichen Rahmenbedingungen unterliegen (Verankerung, Oberflächenbearbeitung, Mikroklima), eine deutlich konvexe (nach außen gerichtete) Verbiegung.

Ein weiterer Hinweis auf die Abhängigkeit von den Materialeigenschaften ist, dass die beiden Marmortypen Carrara und Peccia unterschiedlich auf die Exposition reagieren (vgl. Kap. 4.1.3.2 und 4.2.3.2). Hier sei nur als Beispiel herausgegriffen, dass der Carrara Marmor an der Ostfassade des SUB-Gebäudes am schwächsten verbogen ist, wogegen beim Peccia Marmor an den Ostfassaden des Oeconomicums und des Theologicums genau das Gegenteil der Fall ist. Was beide Marmortypen gemeinsam haben, ist eine relativ niedrige Durchbiegung in den untersten Fassadenzeilen.

Dass ein Feuchtegradient in der Platte möglicherweise den Verbiegungssinn (konkav oder konvex) bei ein und demselben Marmor am Gebäude bestimmt, darauf deutet die Beobachtung an vielen Gebäuden (z.B. an der Marmorfassade der Landesbank in Kiel) hin. Marmorplatten zeigen in der Nähe von Abluftschächten oftmals einen zur übrigen Fassade entgegengesetzten Verbiegungssinn. Wie der Wind verändert hier die warme Abluft den Trocknungsverlauf und damit letztendlich den Feuchtegradienten im Marmor. Ähnliche bauphysikalische Einflüsse dürften auch Heizungsrohre hinter der Außenwand, die Isolierung und andere bauliche Besonderheiten haben.

Die Rolle des Temperaturgradienten wird als nicht so entscheidend angenommen. Generell werden auf der Rückseite der Fassadenplatten alle Temperaturschwankungen verringert. Bei starker Sonneneinstrahlung ist die Rückseite kühler und bei Kälte durch die Wärmeabstrahlung vom Gebäude und der windgeschützten Lage wärmer. Wenn sich die Höhe der täglichen Temperaturamplitude deutlich auf die Dehnungsrate des Marmors auswirken sollte, dann müssten sich alle Marmorplatten tendenziell nach außen Verbiegen. Ferner müssten beispielsweise an der Südfassade des SUB-Gebäudes aufgrund der intensiveren Erwärmung der Plattenoberflächen signifikant höhere Vebiegungen festzustellen sein als an der Nordfassade, was aber nicht der Fall ist (vgl. Abb. 4.17). Des Weiteren können deutliche Unterschiede in der Durchbiegung zwischen einzelnen Fassadenzeilen nicht durch Unterschiede in der Oberflächentemperatur erklärt werden (vgl. Abb. 4.12).

Zusammenfassend wird angenommen, dass ein Feuchtigkeitsgradient in der Fassadenplatte unter der Wirkung von Temperaturzyklen durch Tag-Nacht-Wechsel zu unterschiedlichen Restdehnungsraten innerhalb der Platte führt, so dass diese sich verbiegen muss. Der Feuchtegradient kann dabei sowohl in der Plattentiefe (vorne-hinten) gegeben sein, als vermutlich auch lateral (innen-außen), was im Ergebnis gleichfalls eine Schüsselung bewirkt. Einen Hinweis auf den Einfluss lateraler Feuchtegradienten liefert die in Kap. 8.1.1 geschilderte Beobachtung, dass die beiden äußeren Platten einer Vierergruppe am Oeconomicum stärker zylindrisch gewölbt sind als die beiden Innenplatten (vgl. Abb. 8.7). Die verbesserte Luftzufuhr an den langen Kanten der beiden Außenplatten führt dort wahrscheinlich zu einem höheren Feuchtegradienten, woraus eine stärkere horizontale Einwölbung mit einem entsprechenden Einfluss auf die Verbiegegeometrie resultiert.

Wie sich indes die Feuchtigkeit auf den Verbiegungsprozess auswirkt, kann hier nicht abschließend geklärt, sondern nur vermutet werden. Am konkreten Beispiel des Carrara Marmors der SUB-Fassade konnten unterschiedliche Restdehnungsraten zwischen Vorder- und Rückseite ausgemacht werden, die aus unterschiedlichen Feuchteverhältnissen resultieren. Dieses Materialverhalten wird in Abb. 9.3 genauer betrachtet um zu prüfen, ob die Dehnungskurven der einzelnen Feuchtezustände Hinweise auf die Wirkungsweise des Wassers im Kornverband liefern. Es ist hier die thermische Deh-

nung als Funktion der Temperatur der Probe Carrara 1a in Y-Richtung nach wiederholter thermischer Beanspruchung im trockenen, im nassen und im abwechselnd nassen und trockenen Zustand wiedergegeben (vgl. Abb. 6.11).

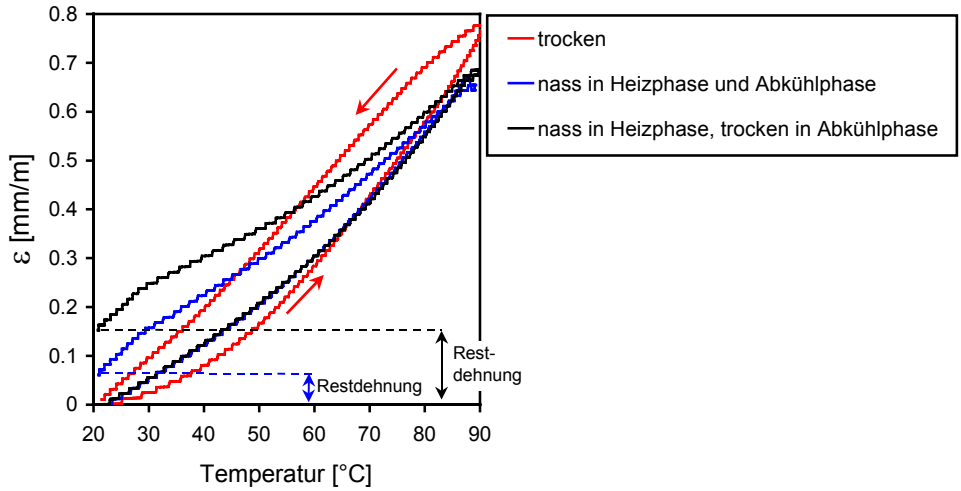


Abb. 9.3: Darstellung der thermischen Längenänderung (ε) als Funktion der Temperatur aus verschiedenen Temperaturzyklen der Restdehnungskurve „C1a-Y“ aus Abb. 6.11: Zyklus 7 (trocken), Zyklus 12 (permanent nass) und Zyklus 14 (trocken in der Abkühlphase).

Folgende Beobachtungen fallen dabei auf:

- Die Dehnungskurven unter nassen Bedingungen sind in der Heizphase zunächst steiler im Vergleich zur Dehnungskurve unter trockenen Bedingungen, erreichen aber insgesamt einen niedrigeren Maximalwert. Der Pufferungseffekt (vgl. Kap. 6.1), der bei der roten Kurve in Abb. 9.3 zu einem allmählichen Anstieg führt, fällt bei Anwesenheit von Wasser geringer aus.
- Während des Abkühlens schrumpft die Probe, wenn sie beim Aufheizen feucht gehalten wurde, deutlich langsamer als unter trockenen Bedingungen, was nach Wiederabkühlung zu einer Restdehnung führt. Diese ist höher, wenn die Probe während der Abkühlphase trocken ist.

Einen Teil dieses Verhaltens ließe sich erklären, wenn man sich die Wirkung von Wasser als „Schmiermittel“ vorstellt. Die thermischen Spannungen, die aus der Expansion der einzelnen Calcit-Kristalle resultieren, werden bei Anwesenheit von Wasser eher in die Dehnung des Gesamtgesteins umgewandelt. Die Tatsache, dass nach feuchter Aufheizphase die Dehnungskurve bei trockener Abkühlung weniger steil fällt als bei nasser Abkühlung, ließe sich mit der Abwesenheit von Wasser als Gleitmittel entlang der Korngrenzen erklären. Die schrumpfenden Körner „verhaken“ sich gleichsam beim Abkühlen, so dass sie weniger leicht in ihre Ausgangsposition zurückfinden. Warum aber bei dauerhaft nassen Bedingungen überhaupt eine Restdehnung entsteht, kann damit nicht erklärt werden. Die Eigenschaft als Gleitmittel müsste bei dieser Modellvorstellung eher dazu führen, dass das Gestein vollständig zurück kontrahiert. Möglicherweise lagern sich Wassermoleküle beim Erwärmen an den Enden

von sich öffnenden Korngrenzen an, die dann ein vollständiges Zurückgleiten des Korns in die ursprüngliche Position verhindern und die Weitung der Korngrenzen von Temperaturzyklus zu Temperaturzyklus vorantreibt. Diese Vermutungen bleiben Spekulation und erfordern entsprechende weiterführende Untersuchungen im molekularen Skalenbereich.

9.2.2 Plattenverbiegung: Laboruntersuchung versus in situ Schadensanalyse

Der in dieser Arbeit verwendete Biegetest (vgl. Kap. 3.3.2.4) nach Nordtest Method NT BUILD 499 stellt eine hilfreiche Untersuchungsmethode dar, die es erlaubt, die Langzeitstabilität eines bestimmten Marmortyps abzuschätzen. Er gibt Auskunft über das Verbiegungspotenzial eines Marmors. Bei der Interpretation der Ergebnisse stellt sich die Frage, ob die ermittelten Werte auf die Gebäudefassade übertragen werden können und die realen Verhältnisse annähernd widerspiegeln. Zu diesem Zweck werden die künstlich erzeugten Durchbiegungen der Marmorproben Peccia und Carrara 1a (vgl. Abb. 6.12a,b) mit der Verbiegungsrate der Fassadenplatten am Oeconomicum (verkleidet mit Peccia Marmor) und am SUB-Gebäude (gleiche Varietät wie die Probe Carrara 1) verglichen.

Bei diesem Vergleich sind zunächst einige Überlegungen zu berücksichtigen. Die Gegenüberstellung von Verbiegungen aus dem Labor und von den Fassaden kann nicht im direkten Vergleich der ermittelten Werte erfolgen. Die Durchbiegung ist zwar sowohl unter künstlichen als auch unter natürlichen Bedingungen eine Funktion der klimatischen Beanspruchung. Diese wird im Labor als Anzahl der Temperaturzyklen und an der Fassade als Zeit (Expositionsdauer) zum Ausdruck gebracht. Die eine Größe kann aber nicht in die andere umgerechnet werden, da die Art der jeweiligen klimatischen Beanspruchung nicht vergleichbar ist. Darüber hinaus müssten Nebeneffekte wie die unterschiedliche Plattendimension beim Biegetest und an der Fassade berücksichtigt werden. Ein Vergleich kann also nur relativ erfolgen, d.h. ein Marmor, der sich am Gebäude stark verbiegt, sollte dies auch unter dem Einfluss künstlicher Verwitterung tun. Dagegen sollte sich ein Marmor mit niedrigem Verbiegepotenzial sowohl im Labor als auch an der Fassade schwach verformen.

Die Durchbiegungen der Fassadenplatten vom SUB-Gebäude und vom Oeconomicum sind als Mittelwert aller Zeilenmittelwerte der absoluten Durchbiegungen berechnet worden. Diese Berechnungsweise hat gegenüber dem einfach aus allen Plattenverbiegungen gebildete Mittelwert den Vorteil, dass eine unproportionale Verteilung der Platten am Gebäude hinsichtlich unterschiedlicher Expositionen nicht ins Gewicht fällt. Beispielsweise sind am SUB-Gebäude die meisten Fassadenplatte an der am schwächsten verformten Ostfassade angebracht, so dass deren Durchbiegewerte bei der Berechnung eines Gebäudemittelwertes überrepräsentiert wären. Für die Berechnung der Zeilenmittelwerte wurden sinnvollerweise die Absolutwerte der Plattenverbiegungen herangezogen, um konkave und konvexe Durchbiegungen gleichwertig zu behandeln und miteinander vergleichen zu können. Der Vergleich zwischen den Gebäuden Oeconomicum und SUB ist zulässig, da sie weniger als 100 m voneinander entfernt sind und somit von den gleichen klimatischen Verhältnissen ausgegangen werden kann.

Nach 12 Jahren beträgt die mittlere Durchbiegung an der SUB-Fassade (Carrara Marmor) 5,0 mm/m, was einer Verbiegungsrate von 0,42 mm/m pro Jahr entspricht (Tab. 9.1). Der Durchschnitt an der Fassade des Oeconomicums (Peccia Marmor) beträgt nach einer wesentlich längeren Expositionsdauer von 35 Jahren dagegen nur 4,5 mm/m, woraus eine Verbiegungsrate von 0,13 mm/m pro Jahr resultiert. Das bedeutet einen Unterschied in der Verbiegungsrate zwischen beiden Fassadenverkleidungen von etwas mehr als Faktor 3.

Demgegenüber ist die mittlere Verbiegung nach 40 Temperaturzyklen im Biegetest 1,48 mm/m für die Probe Carrara 1a (vgl. Abb. 6.12b) und 0,48 mm/m für den Peccia Marmor (vgl. Abb. 6.12a; Tab. 9.1). Beim Peccia Marmor ist zu berücksichtigen, dass die Schnittlage „PE-Z“ an der Fassade des Oeconomicums nicht realisiert ist (vgl. Abb. 4.4). Daher wurden für den Mittelwert nur die X- und die Y-Richtung herangezogen. Wiederum ist die Verbiegungsrate beim Carrara Marmor etwa dreimal höher als beim Peccia Marmor, was als Indiz für die Zuverlässigkeit des Biegetests gewertet werden kann.

Tabelle 9.1: Vergleich der Durchbiegungsrate der Marmore Peccia und Carrara Venato Gioia unter dem Einfluss natürlicher und künstlicher Verwitterung.

	natürliche Verwitterung (Fassade)				**künstliche Verwitterung (Biegetest)**
Marmortyp	Gebäude	mittlere Durchbiegung *) [mm/m]	Expositions-dauer [a]	Verbiegungs-rate [mm/m×a]	Durchbiegung nach 40 Temperaturzyklen [mm/m]
Carrara Venato Gioia	SUB-Gebäude	5.0	12	**0.42**	**1.48**
Peccia	Oeconomicum	4.5	35	**0.13**	**0.48 **)**

*) Mittelwert aus den Zeilenmittelwerten der absoluten Durchbiegungswerte
**) Mittelwert aus X- und Y-Richtung, da Z-Richtung am Gebäude nicht verwirklicht

Neben der Intensität konnte im Biegetest auch die Abhängigkeit der Durchbiegung von der Schnittlage der Fassadenplatten aus Peccia Marmor diagnostiziert werden (vgl. Abb. 6.12a), was an der Nordfassade des Oeconomicums seine Entsprechung findet (vgl. Abb. 4.11). Der hier angewendete Biegetest scheint sich also als Instrument für die Auswahl ausreichend formstabiler Marmortypen zu bewähren. Die hier vorgestellten Untersuchungen stellen jedoch nur erste Ergebnisse dar. Für die Extrapolation der Laborresultate auf die Fassade sind umfangreiche Untersuchungen notwendig, welche die Komplexität aller Einflussfaktoren berücksichtigt (vgl. auch Grelk et al. 2004).

9.2.3 Schadensanalyse als Basis für Langzeitprognosen

Wenn an einer Marmorfassade nach wenigen Jahren der Exposition Plattenverbiegungen sichtbar werden, stellt sich für den Gebäudeeigentümer bzw. dem verantwortli-

chen Entscheidungsträger die Frage, wie lange die Platten noch ohne Sicherheitsrisiko für vorbeilaufende Passanten an der Fassade bleiben können. In der Regel stehen dabei zwei gegensätzliche Interessen im Konflikt miteinander. Auf der einen Seite muss die Stabilität der Marmorplatten auch bei hohen Windbelastungen gewährleistet sein. Auf der anderen Seite steht das Bestreben, Geldmittel zu sparen und aus diesem Grund notwendige Maßnahmen so spät wie möglich und so früh wie nötig einzuleiten. Langzeitprognosen zum Verwitterungsverhalten des Fassadenmarmors stellen daher für den Gebäudeeigentümer wertvolle Informationen dar.

Im Folgenden soll am Beispiel des SUB-Gebäudes diskutiert werden, welche Hinweise die hier ermittelten Ergebnisse auf die Langzeitstabilität der Marmorfassade geben können. Sowohl der Vergleich zwischen den Durchbiegungen aus den Jahren 2000 und 2003 (vgl. Kap. 4.2.3.6) als auch der Verlauf der Durchbiegung des Fassadenmarmors unter künstlicher Verwitterung (vgl. Kap. 8.2.5.1) weisen eindeutig darauf hin, dass der Verwitterungsprozess, der mit einer irreversiblen Verformung (Expansion, Verbiegung), Gefügeauflockerung (vgl. Kap. 8.2.1) und Entfestigung (vgl. Kap. 8.2.3) einher geht, kontinuierlich fortschreitet. Es stellt sich daher die dringende Frage, wann eine kritische Gesteinsfestigkeit unterschritten wird, bei der die Standsicherheit der Marmorplatten nicht mehr gewährleistet werden kann.

Die Bemessung dieser Untergrenze war nicht Gegenstand der eigenen Untersuchungen, sondern wurde von einem beauftragten Ingenieurbüro auf Basis der zu erwartenden Windlasten festgelegt. Die kritischen Werte sind hier exemplarisch für das am häufigsten auftretende Plattenformat von 104 x 74 x 4 cm (Höhe x Breite x Dicke) berechnet worden. Für den in die Berechnung einfließenden Staudruck wurde eine Höhe von 8-20 m am Gebäude nach DIN 1055 angesetzt. Demnach beträgt die zu erwartende Biegebeanspruchung 0,8 MPa und die kritische Ankerausbruchlast 0,31 kN.

Es gilt nun zu prüfen, ob bzw. wann unter den zeitabhängig nachlassenden Materialfestigkeiten der Marmorplatten diese kritischen Festigkeitswerte erreicht werden. In Kap. 8.2.3 wurde eine nichtlineare Korrelation zwischen der Plattenverbiegung und der Biegefestigkeit (Abb. 8.26a) bzw. der Ankerausbruchfestigkeit (Abb. 8.26b) festgestellt. Die Trendkurven zeigen den Verlauf einer Potenzfunktion. Unter der Annahme, dass diese Funktion repräsentativ für alle Fassadenplatten am Gebäude ist und über die Zeit hinweg konstant bleibt, lässt sich mit Hilfe der Durchbiegung der zeitliche Verlauf der Entfestigung berechnen. Dazu muss weiterhin die Geschwindigkeit bekannt sein, mit der die einzelnen Platten sich verbiegen. Den Ergebnissen in Kap. 4.2.3.6 kann entnommen werden, dass diese näherungsweise konstant ist (vgl. Abb. 4.26), was bedeutet, dass sich abhängig von der Exposition stark verbogene Platten auch weiterhin stark verbiegen und schwach verbogene Platten sich auch zukünftig schwach weiter verformen werden. So kann für jeden Durchbiegungsgrad eine spezifische Trendkurve errechnet werden, welche die zeitliche Abnahme der zulässigen Biegespannungen und Ausbruchlasten widerspiegelt (Abb. 9.4). Die für die Standsicherheitsbewertung maßgebenden Festigkeitswerte sind dabei die unteren Erwartungswerte (vgl. Anhang 5), die nach DIN 18516-3 mit einem Sicherheitsfaktor von 3,0 zu dividieren sind.

Die Kombination von gesteinsmechanischen Untersuchungen einerseits und statischen Berechnungen andererseits ermöglicht schließlich eine Prognose, wann eine

Fassadenplatte mit gegebener Durchbiegung eine kritische Gesteinsfestigkeit unterschreitet. Selbst Platten mit einer Durchbiegung >11 mm/m (3,1 % aller Platten am Gebäude) würden demnach in absehbarer Zeit die kritische Biegespannung von 0,8 MPa nicht unterschreiten (Abb. 9.4a). Dagegen wäre die kritische Ausbruchlast von 0,31 kN für die gleiche Biegeklasse bereits in etwa acht Jahren im Jahr 2013 erreicht (Abb. 9.4b).

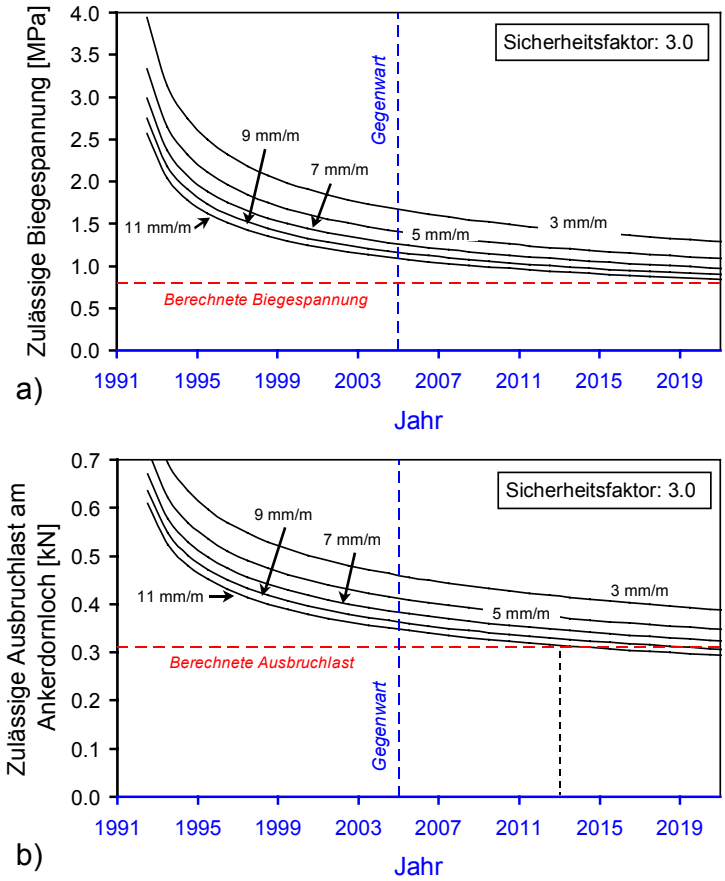


Abb. 9.4: Graphische Darstellung eines Ansatzes zur Berechnung des Zeitpunktes, wann bei gegebener Plattenverbiegung die kritische Festigkeit einer Marmorplatte unterschritten wird. Es sind die Trendlinien a) der zulässigen Biegespannung und b) der zulässigen Ausbruchlast für fünf verschiedene Biegegrade dargestellt. Der Abszissenwert des Schnittpunktes, bei dem eine Trendlinie die rote waagrechte Linie der kritischen Festigkeit kreuzt, liefert den Zeitpunkt, ab dem die Standsicherheit nicht mehr gewährleistet ist.

Dieser Berechnungsansatz stellt eine Möglichkeit dar, wie die erhobenen Daten miteinander in Zusammenhang gebracht werden können, um so zu einer Prognose zum zeitlichen Verlauf der Standsicherheit zu gelangen. Es bleibt zu bedenken, dass die Trendkurven mittels einer kleinen Stichprobe von nur acht Platten berechnet wurden und mit einem statistischen Fehler behaftet sind. Des Weiteren wurden Zwängungen,

die aus der Verankerungsweise und aus der Plattenverformung resultieren, nicht berücksichtigt. Sie können die vorhandenen (kritischen) Biegespannungen und Ausbruchlasten noch erhöhen, so dass die alleinige Betrachtung der Windlasten bei der Standsicherheitsbeurteilung der Platten nicht ausreichend ist. Darüber hinaus bleibt die Möglichkeit unberücksichtigt, dass die Entfestigung des Fassadenmaterials über die Zeit hinweg auch abrupt verlaufen kann. Wenn die Mikrorissbildung entlang von Korngrenzen immer weiter fortschreitet, wird die Bildung von Makrorissen immer wahrscheinlicher, wie die Ergebnisse in Kap. 4.2.3.3 zeigen. Die relative Häufigkeit von sichtbaren Rissen und sich daraus entwickelnden Ausbrüchen nimmt mit dem Grad der Durchbiegung zu. Solche Risse stellen Schwächezonen dar und werden bei mechanischer Belastung wie Windsog oder Winddruck bevorzugt aktiviert. Der Widerstand gegen Materialversagen ist dann extrem herabgesetzt.

10 Literaturverzeichnis

Akesson, U., Lindqvist, J.E., Schouenborg, B., Grelk, B. 2004. Relationship between microstructure and bowing properties of calcite marble claddings. In: Microstructures in granites and marbles in relation to their durability as a construction material (edited by Akesson, U.). Earth Science Centre, Thesis for Doctoral degree A95, Göteborg, Paper VI.

Alnaes, L., Koch, A., Schouenborg, B., Akesson, U., Moen, K. 2004. Influence of rock and mineral properties on the durability of marble panels. Proceedings of the International Conference on Dimension Stone 2004, 14-17 June 2004, Prague, 245-251.

Bain, G. W. 1940. Geological, Chemical and Physical Problems in the Marble Industry. American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, Technical Publication 1261, 1-16.

Barsottelli, M., Fratini, F., Giorgetti, G., Manganelli Del Fa, C., Molli, G. 1998. Microfabric and alteration in Carrara marble: a preliminary study. Science and Technology for Cultural Heritage 7(2), 115-126.

Baumer, A., Eckardt, P. 2000. Die Naturbausteine des Tessins. Naturbaustein Sonderausgabe Januar 2000, 4-8.

Birch, F. 1960. The velocity of compressional waves in rocks up to 10 kilobars (part 1). Journal of Geophysical Research 65, 1083-1102.

Bortz, S. A. 1999. Review of durability testing in the United States and Europe. ASTM Symposium on Dimension Stone Cladding: Design, Evaluation, Construction and Repair. October 27th, New Orleans.

Bortz, S. A., Erlin, B., Monk, C.B. 1988. Some field problems with thin veneer building stones. In: New Stone Technology, Design and Construction for Exterior Wall Systems (edited by Donaldson, B.). American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 11-31.

Bouineau, A., Perrier, R. 1995. La décohésion granulaire, maladie des revêtements de façades en marbre. Mines et Carrières - Industrie Minérale Août-Septembre 147, 32-35.

Bucher, K., Frey, M. 1994. Petrogenesis of metamorphic rocks. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

Bucher, W. H. 1956. Role of gravity in orogenesis. Bulletin of the Geological Society of America 67, 1295-1318.

Bunge, H. J. 1982. Texture analysis in material science. Butterworths, London.

Burkhard, M. 1993. Calcite-twins, their geometry, appearance and significance as stress-strain markers and indicators of tectonic regime: a review. Journal of Structural Geology 15, 351-368.

Cantisani, E., Canova, R., Fratini, F., Manganelli De Fa, C., Mazzuoli, R., Molli, G. 2000. Relationships between microstructures and physical properties of white

Apuan marbles: inferences on weathering durability. Periodico di Mineralogia 69/3, 257-268.

Carmignani, L., Kligfield, R. 1990. Crustal extension in the Northern Apennines: the transition from compression to extension in the Alpi Apuane Core Complex. Tectonics 9, 1275-1303.

Cavallucci, F., Garzonio, C.A., Giovannini, P., Fratini, F., Manganelli Del Fa, C. 1997. Mechanical decay process in lapideous materials (Carrara marbles): Preliminary study of creep phenomena. Proceedings of the 4th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean, 91-100.

Chilingar, G.V. 1964. Relationship between porosity, permeability and grain size distribution of sands and sandstones. In: Deltaic and Shallow Marine Deposits I (edited by van Straaten, L. M. J. U.), Elsevier, 71-75.

Cohen, J.M., Monteiro, P.J.M. 1991. Durability and Integrity of Marble Cladding. A State-of-the-Art Review. Journal of Performance of Constructed Facilities 5(2), 113-124.

Dahms, M., Bunge, H.-J. 1989. The iterative series-expansion method for quantitative texture analysis, I. General Outline. Journal of Applied Crystallography 22, 439-447.

Dandekar, D.P. 1968. Variation in the elastic constants of calcite with pressure. AGU Transactions 49(1), 323.

Darcy, H. 1856. Les fontains publiques de la ville de Dijon. Dalmont, Paris.

DIN 1055-4. 1986. Lastannahmen für Bauten; Verkehrslasten, Windlasten bei nicht schwingungsanfälligen Bauwerken. Beuth, Berlin.

DIN 18516-3. 1990. Außenwandverkleidungen hinterlüftet; Naturwerkstein; Anforderungen, Bemessung. Beuth, Berlin.

DIN EN 12372. 1999. Prüfverfahren für Naturstein - Bestimmung der Biegefestigkeit unter Mittellinienlast. Beuth, Berlin.

Dunakin, R.C., Lindborg, U., Rowcliffe, D.J. 1999. Mechanical and environmental crack propagation in marble. Euromarble - National Heritage Board; Proceedings of the 10th Workshop; Stockholm.

Duyster. 1991. Strukturgeologische Untersuchungen im Moldanubikum (Waldviertel, Österreich) und methodische Untersuchungen zur bildanalytischen Gefügequantifizierung von Gneisen. Doktorarbeit, Universität Göttingen, 185 S.

Erlin, B. 1989. When is a bow not a bow? Stone World February 1989, 86-88.

Fale, P., Vintem, C., Henriques, P., Midoes, C., Carvalho, J. 2004. GIS: a tool to re-planning extractive industry - The Estremoz Anticline case study. Proceedings of the International Conference on Dimension Stone 2004, 14-17 June 2004, Prague, 127-131.

Fei, Y. 1995. Thermal Expansion. In: Mineral Physics and Crystallography (edited by Ahrens, T. J.). American Geophysical Union, Washington, 29-44.

Fleischer, G. 2002. Beurteilung von Ultraschalluntersuchungen an Natursteinobjekten in der Denkmalpflege. Dissertation, Technische Universität Wien, 184 S.

Franzini, M. 1995. Stones in monuments: natural and anthropogenic deterioration of marble artifacts. European Journal of Mineralogy 7, 735-743.

Füchtbauer, H. 1988. Sediment-Petrologie. Teil 2: Sedimente und Sedimentgesteine. Schweizerbart, Stuttgart.

Garzonio, C.A., Fratini, F., Manganelli Del Fa, C., Giovannini, P., Blasi, C. 1995. Analyses of geomechanical decay phenomena of marbles employed in historical monuments in Tuscany. Mechanics of Jointed and Faulted Rock, 259-263.

Grelk, B., Goltermann, P., Schouenborg, B., Koch, A., Alnaes, L. 2004. The laboratory testing of potential bowing and expansion of marble. Proceedings of the International Conference on Dimension Stone 2004, 14-17 June 2004, Prague, 253-259.

Grimm, W.D. 1999. Beobachtungen und Überlegungen zur Verformung von Marmorobjekten durch Gefügeauflockerung. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft 150/2, 195-236.

Hugman, R.H.H., Friedman, M. 1979. Effects of texture and composition on mechanical behaviour of experimentally deformed carbonate rocks. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin 63(9), 1478-1489.

IGM. 2000. Portugal - Exploration and Mining (online version). Instituto Geologico e Mineiro, Lisbon.

Jahns, E. 1995. Quantifizierte seismische Anisotropie: Ein skalenübergreifender Vergleich am Beispiel des KTB. Cuvillier Verlag, Göttingen.

Jelinek, V. 1981. Characterization of the magnetic fabric of rocks. Tectonophysics 79, 63-67.

Jessell, M.W. 1987. Grain boundary migration microstructures in a naturally deformed quartzite. Journal of Structural Geology 9, 1007-1014.

Jornet, A., Rück, P. 2000. Bowing of Carrara marble slabs: A case study. Proceedings of the International Congress "Quarry - Laboratory - Monument", Pavia 2000 1, 355-360.

Jornet, A., Teruzzi, T., Rück, P. 2002. Bowing of Carrara marble slabs: comparison between natural and artificial weathering. In: Understanding and managing of stone decay (SWAPNET 2001) (edited by Prikryl, R., Viles, H.A.). Karolinum Press, Prague, 161-170.

Karhapää, E., Koskinen, P., Pyy, H., Silvennoinen, K., Sipari, P. 1994. Weather resistance tests with Carrara type white marble. VTT Technical Research Centre of Finland, Laboratory of Structural Engineering, Internal Report RTE5-IR-2/1994, 1-20.

Kieslinger, A. 1932. Zerstörung an Steinbauten, ihre Ursache und ihre Abwehr. Deuticke, Leipzig, Wien.

Kieslinger, A. 1934. Gesteinskundliche Untersuchungen an alten Grabsteinen. Geologie und Bauwesen 6, 1-21.

Kleber, W. 1990. Einführung in die Kristallographie. VEB Verlag Technik, Berlin.

Klopfer, H. 1985. Feuchte. In: Lehrbuch der Bauphysik. Teubner, Stuttgart.

Koch, A., Siegesmund, S. 2002. Bowing of marble panels: on-site damage analysis from the Oeconomicum building at Goettingen (Germany). Geological Society Special Publications 205, 291-306.

Koch, A., Siegesmund, S. 2004a. Bowing of marble panels: on-site damage analysis from the University Library Building at Goettingen (Germany). Proceedings of the 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Stockholm June 27 - July 2, 2004 1, 171-178.

Koch, A., Siegesmund, S. 2004b. The combined effect of moisture and temperature on the anomalous expansion behaviour of marble. Environmental Geology 46, 350-363.

Köhler, W. 1988. Preservation problems of Carrara Marble sculptures in Potsdam Sanssouci ("Radial structural destruction of Carrara Marble"). Proceedings of the 6th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Torun, 653-662.

Köhler, W. 1991. Untersuchungen zu Verwitterungsvorgängen an Carrara-Marmor in Potsdam-Sanssouci. Berichte zu Forschung und Praxis der Denkmalpflege in Deutschland, Steinschäden - Steinkonservierung 2, 50-53.

Kownatzki, R. 1997. Verwitterungszustandserfassung von Natursteinbauwerken unter besonderer Berücksichtigung phänomenologischer Verfahren. Aachener Geowissenschaftliche Beiträge 22, 1-256.

Kranz, R. L. 1983. Microcracks in rocks: a review. Tectonophysics 100(1-3), 449-480.

Leiss, B., Ullemeyer, K. 1999. Texture characterisation of carbonate rocks and some implications for the modeling of physical anisotropies, derived from idealized texture types. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft 150/2, 259-274.

Leiss, B., Weiss, T. 2000. Fabric anisotropy and its influence on physical weathering on different types of Carrara marbles. Journal of Structural Geology 22, 1737-1745.

Logan, J.M. 2004. Laboratory and case studies of thermal cycling and stored strain on the stability of selected marbles. Environmental Geology 46, 456-467.

Logan, J.M., Hadedt, M., Lehnert, D., Denton, M. 1993. A case study of the properties of marble as building veneer. International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences and Geomechanics 30, 1531-1537.

Markgraf, S.A., Reeder, R.J. 1985. High-temperature structure refinements of calcite and magnesite. American Mineralogy 70, 590-600.

Matthes, N. 1993. Mineralogie. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

Molli, G., Conti, P., Giorgetti, G., Meccheri, M., Oesterling, N. 2000. Microfabric study on the deformational and thermal history of the Alpi Apuane marbles (Carrara marbles), Italy. Journal of Structural Geology 22, 1809-1825.

Molli, G., Heilbronner, R. 1999. Microstructures associated with static and dynamic recrystallization of Carrara marble (Alpi Apuane, NW Tuscany, Italy). Geologie en Mijnbouw 78, 119-126.

Moore, A.C. 1970. Descriptive terminology for the textures of rocks in granulite facies terrains. Lithos 3, 123-127.

Newman, J. 1994. The influence of grain size distribution on methods for estimating paleostress from twinning in carbonates. Journal of Structural Geology 16, 1589-1601.

Nordtest Method NT BUILD 499. 2002. Cladding Panels: Test for Bowing. Nordtest project 1443-99/1.

Nordtest Method NT BUILD 500. 2002. Cladding Panels: Field Method for Measurement of Bowing. Nordtest project 1443-99/2.

O'Connell, R. J., Budiansky, B. 1974. Seismic velocities in dry and saturated cracked solids. Journal of Geophysical Research 79(35), 5412-5426.

Oliveira, J.T., Oliveira, V., Picarra, J.M. 1991. Tracos gerais da evolucao tectono-estratigrafica da Zona de Ossa Morena, em Portugal: sintese critica do estado actual dos conhecimentos. Comun. Serv. Geol. Portugal 77, 3-26.

Passchier, C.W., Trouw, R.A.J. 1996. Microtectonics. Springer, Berlin, Heidelberg.

Picarra, J.M., Le Menn, J. 1994. Ocorncia de crinides em marmores do Complexo Vulcano-Sedimentar Carbonatado de Estremoz: implicaes estratigraficas. Comunicaes Instituto Geolgico e Mineiro 80, 15-25.

Poschlod, K. 1990. Das Wasser im Porenraum kristalliner Naturwerksteine und sein Einfluss auf die Verwitterung. Münchner geowissenschaftliche Abhandlungen: Reihe B, Allgemeine und angewandte Geologie 7, 1-62.

prEN 13364. 1999. Prüfverfahren für Naturstein - Bestimmung der Ausbruchlast am Ankerdornloch. European Committee for Standardization, Brüssel.

Rasolofosaon, P.N.J., Rabbel, W., Siegesmund, S., Vollbrecht, A. 2000. Characterization of crack distribution: fabric analysis versus ultrasonic inversion. Geophysical Journal International 141, 413-424.

Rao, K.V.K., Naidu S.V.N., Murthy K.S. 1968. Precision lattice parameters and thermal expansion of calcite. Journal of Physical and Chemical Solids 29, 245-248.

Reeder, J. 1983. Carbonates: Mineralogy and chemistry. Reviews in Mineralogy, Mineralogical Society of America 11, 1-400.

Rosenholtz, J.L., Smith, D.T. 1949. Linear thermal expansion of calcite, var. Iceland spar, and Yule Marble. The American Mineralogist 34, 846-854.

Royer-Carfagni, G. 1999a. On the thermal degradation of marble. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 36, 119-126.

Royer-Carfagni, G. 1999b. Some considerations on the warping of marble facades: the example of Alvar Aalto's Finland Hall in Helsinki. Construction and Building Materials 13, 449-457.

Rüdrich, J. 2003. Gefügekontrollierte Verwitterung natürlicher und konservierter Marmore. Dissertation, Universität Göttingen, 158 S.

Rüdrich, J., Weiß, T., Siegesmund, S. 2001. Deterioration characteristics of marbles from the Marmorpalais Potsdam (Germany): a compilation. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft 152/2-4, 637-664.

Sage, J.D. 1988. Thermal microfracturing of marble. In: Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites (edited by Marinos, P.G., Koukis, G.C.). Balkema, Rotterdam, 1013-1018.

Sander, B., Felkel, E., Drescher, F.K. 1929. Festigkeit und Gefügeregel am Beispiel eines Marmors. Neues Jahrbuch für Mineralogie 59 (Abt. A), 1-26.

Scheffzük, C., Siegesmund, S., Koch, A. 2004a. Strain investigations on calcite marbles using neutron time-of-flight diffraction. Environmental Geology 46, 468-476.

Scheffzük, C., Siegesmund, S., Koch, A. 2004b. Residual strain investigations using neutron TOF-diffraction on marble building stone. Proceedings of the International Conference on Dimension Stone 2004, 14-17 June 2004, Prague, 103-106.

Schild, M., Siegesmund, S., Vollbrecht, A., Mazurek, M. 2001. Characterization of granite matrix porosity and porespace geometry by in situ and laboratory methods. Geophysical Journal International 146(1), 111-125.

Schouenborg, B., Grelk, B., Alnaes, L., Brundin, J.A., Blasi, P., Yates, T., Marini, P., Tschegg, E., Unterweger, R., Tokarz, B., Koch, A., Bengtsson, T., Mladenovic, A., Goralczyk, S. 2003. TEAM - Testing and Assessment of Marble and Limestone Cladding. International Symposium on Industrial Minerals and Building Stones 2003, Istanbul.

Schouenborg, B., Grelk, B., Brundin, J.A., Alnaes, L. 2000. Buktningsprovning av marmor för fasadbeklädning. NORDTEST-projekt 1443-99: SP Rapport 2000 28, 1-31.

Siegesmund, S. 1996. The significance of rock fabrics for the geological interpretation of geophysical anisotropies. Geotektonische Forschungen 85, 1-123.

Siegesmund, S., Koch, A. 2002. Ursachen für Schäden von Natursteinfassaden. Naturstein 8/2002, 52-57.

Siegesmund, S., Ullemeyer, K., Weiss, T., Tschegg, E.K. 2000a. Physical weathering of marbles caused by anisotropic thermal expansion. International Journal of Earth Sciences 89, 170-182.

Siegesmund, S., Vollbrecht, A., Chlupac, T., Nover, G., Dürrast, H., Müller, J., Weber, K. 1993. Fabric-controlled anisotropy of petrophysical properties observed in KTB-core samples. Sci. Drilling 4, 31-54.

Siegesmund, S., Weiss, T., Tschegg, E. K. 2000b. Control of marble weathering by thermal expansion and rock fabrics. 19. Int. Congress Deterioration and Conservation of Stone, Venice 19-24, 205-213.

Siegesmund, S., Weiß, T., Vollbrecht , A., Ullemeyer, K. 1999. Marble as a natural building stone: rock fabrics, physical and mechanical properties. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft 150/2, 237-258.

Skinner, B.J. 1966. Thermal expansion. In: Handbook of physical constants (edited by Clark, S.P.). Geological Society of America 97(75-96).

Snethlage, R. 1984. Steinkonservierung: Forschungsprogramm des Zentrallabors für Denkmalpflege, 1979-1983. Arbeitsheft / Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege 22, 203 S.

Snethlage, R., Ettl. H., Sattler, L. 1999. Ultraschallmessungen an PMMA-getränkten Marmorskulpturen. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft 150/2, 387-396.

Spry, A. 1983. Metamorphic textures. Pergamon Press, Oxford.

Stocksiefen, W. 1996. Marmorschäden: Analyse und Therapie. Naturstein 12/1996, 154-157.

Strohmeyer, D. 2003. Gefügeabhängigkeit technischer Gesteinseigenschaften. Dissertation, Universität Göttingen, 254 S.

Suenson, E. 1942. Byggematerialer. Band 3: Natursten. Jul. Gjellerups Forlag, Kopenhagen.

Thomasen, S.E., Ewart, C.S. 1984. Durability of thin-set marble. Proceedings of the 3rd International Conference on Durability of Building Materials and Components; American Society for Testing and Materials, 313-323.

Trewitt, T.J., Tuchmann, J. 1988. Amoco may replace marble on Chicago headquarters. ENR March, 11-12.

Tröger, W.E. 1967. Optische Bestimmung der gesteinsbildenden Minerale: Teil 2. Schweitzerbart, Stuttgart.

Tschegg, E.K., Widhalm, C., Eppensteiner, W. 1999. Ursachen mangelnder Formbeständigkeit von Marmorplatten. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft 150/2, 283-297.

Turner, F.J. 1968. Metamorphic petrology, mineralogical and field aspects. McGraw Hill, New York.

Ullemeyer, K., Spalthoff, P., Heinitz, J., Isakov, N. N., Nikitin, A. N., Weber, K. 1998. The SKAT texture diffractometer at the pulsed reactor IBR-2 at Dubna: experimental layout and first measurements. Nuclear Instruments and Methods in Physics research 412, 80-88.

Weiß, G. 1992. Die Eis- und Salzkristallisation im Porenraum von Sandsteinen und ihre Auswirkungen auf das Gefüge unter besonderer Berücksichtigung gesteinsspezifischer Parameter. Münchner geowissenschaftliche Abhandlungen: Reihe B, Allgemeine und angewandte Geologie 9, 1-118.

Weiß, T. 1998. Gefügeanisotropie und ihre Auswirkung auf das seismische Erscheinungsbild: Fallbeispiele aus der Lithosphäre Süddeutschlands. Geotektonische Forschungen 91, 1-156.

Weiß, T., Leiss, B., Oppermann, H., Siegesmund, S.. 1999. Microfabric of fresh and weathered marbles: Implications and consequences for the reconstruction of the Marmorpalais Potsdam. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft 150/2, 313-332.

Weiß, T., Rasolofosaon, P.N.J., Siegesmund, S. 2001. Thermal microcracking in Carrara marble. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft 152/2-4, 621-636.

Weiß, T., Rasolofosaon, P.N.J., Siegesmund, S. 2002a. Ultrasonic wave velocities as a diagnostic tool for the quality assessment of marble. Geological Society Special Publications 205, 149-164.

Weiß, T., Siegesmund, S., Fuller, E.R. 2002b. Thermal stresses and microcracking in calcite and dolomite marbles via finite element modelling. Geological Society Special Publications 205, 89-102.

Weiß, T., Siegesmund, S., Rasolofosaon, P.N.J. 2000. The relationship between deterioration, fabric, velocity and porosity constraint. Proceedings of the 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Venice Vol. 1, 215-223.

Widhalm, C., Eppensteiner, W., Tschegg, E.K. 1999. Meßmethoden zur Beschreibung von Gefügeanisotropien in Marmor. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft 150/2, 275-281.

Widhalm, C., Tschegg, E., Eppensteiner, W. 1996. Anisotropic thermal expansion causes deformation of marble cladding. Journal of Performance of Constructed Facilities 10, 5-10.

Wimmenauer, W. 1985. Petrographie der magmatischen und metamorphen Gesteine. Enke Verlag, Stuttgart.

Winkler, E.M. 1994. Stone in Architecture. Spinger, New York.

Winkler, E. M. 1996a. Technical note: properties of marble as building veneer. International Journal of Rock Mechanics, Mineral Science and Geomechanics 33(2), 215-218.

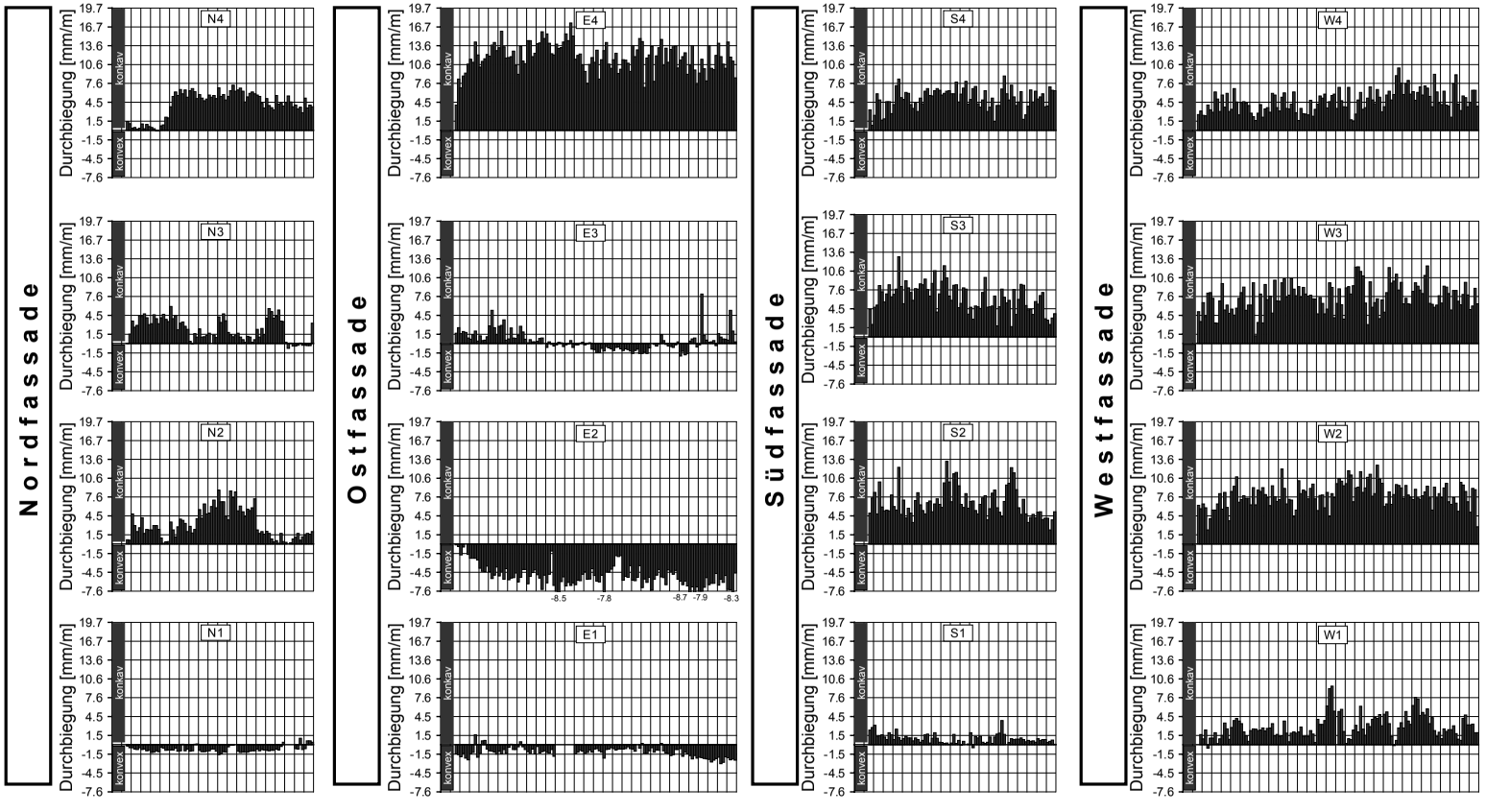
Winkler, E.M. 1996b. Buttressed Expansion in Granitic Rocks in the Field and on Buildings. 4. Internationales Kolloquium Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen, Technische Akademie Esslingen 17.-19. Dez. 1996, 537-542.

Zeisig, A., Siegesmund, S., Weiss, T. 2002. Thermal expansion and its control on the durability of marbles. Geological Society Special Publications 205, 65-80.

Zezza, U. 1993. L'anisotropia fisico-meccanica delle pietre da costruzione e il rilevamento in situ sul patrimonio architettonico a mezzo prove non-distruttive. Atti del Convegno Internazionale "Il recupero degli edifici antichi. Manualistica e nuove tecnologie", 29 - 30 ottobre 1993, Napoli, 425-432.

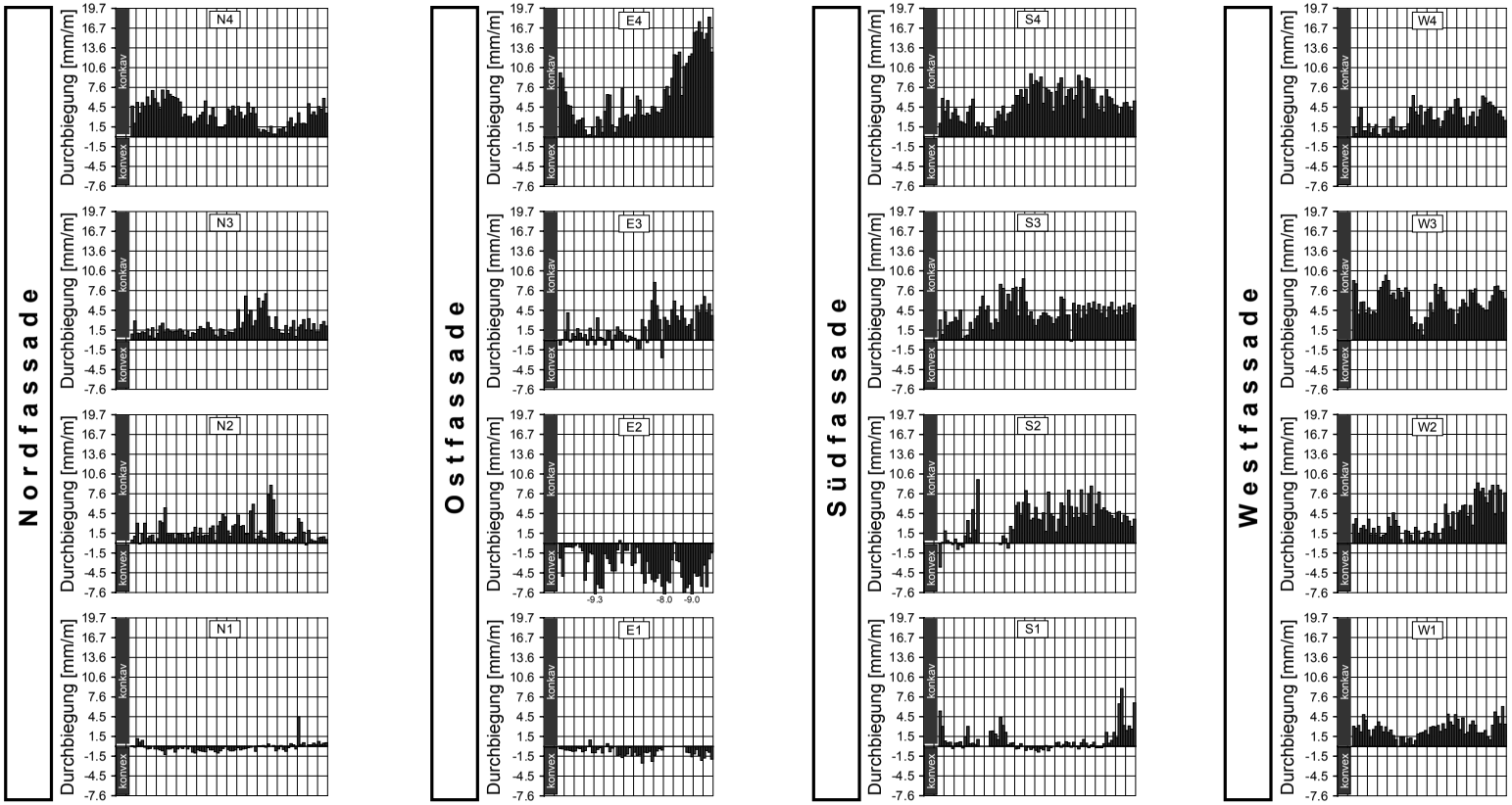
Zezza, U., Massara, E.P., Massa, V., Venchi-Arutti, D. 1985. Effect of temperature on intergranular decohesion of the marbles. Proceedings of the 5th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Lausanne 1, 131-140.

Anhang 1: Quantifizierung der Durchbiegung der Fassadenplatten des Oeconomicums



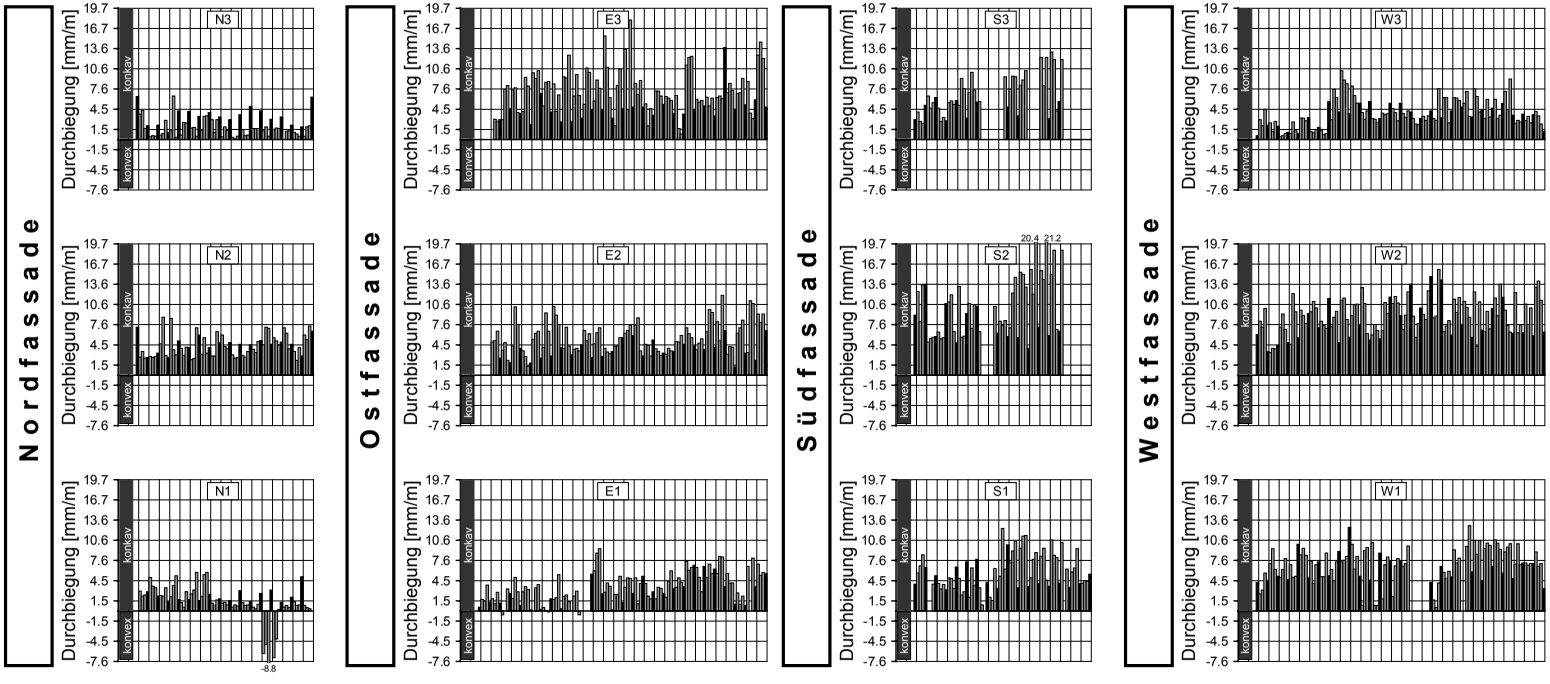
Darstellung der Einzelwerte der Durchbiegung der Fassadenplatten des Oeconomicums. Jedes Histogramm zeigt die Plattenverbiegungen einer einzelnen Fassadenzeile. Horizontale Linien markieren die Grenzen der Schadensklassen, vertikale die Lücke zwischen Vierer-Gruppen.

Anhang 2: Quantifizierung der Durchbiegung der Fassadenplatten des Theologicums



Darstellung der Einzelwerte der Durchbiegung der Fassadenplatten des Theologicums. Jedes Histogramm zeigt die Plattenverbiegungen einer einzelnen Fassadenzeile. Horizontale Linien markieren die Grenzen der Schadensklassen, vertikale die Lücke zwischen Vierer-Gruppen.

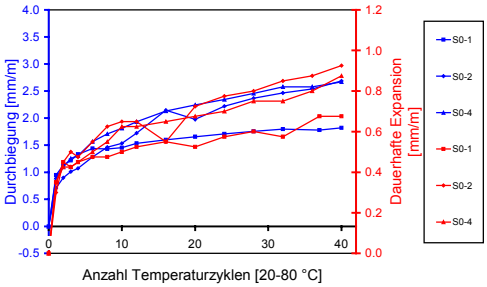
Anhang 3: Quantifizierung der Durchbiegung der Fassadenplatten des Juridicums

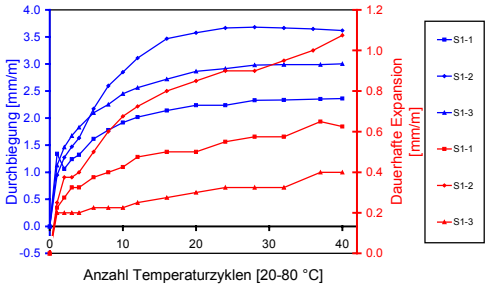


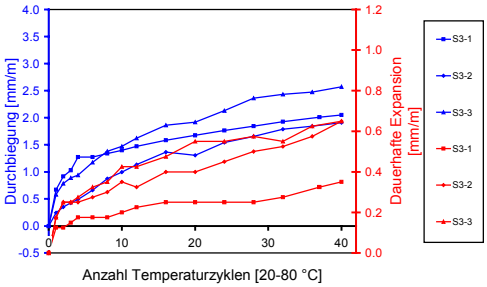
Darstellung der Einzelwerte der Durchbiegung der Fassadenplatten des Juridicums (graue Säulen: 71 cm breite Platten; schwarze Säulen: 55 cm breite Zwischenplatten). Jedes Histogramm zeigt die Plattenverbiegungen einer einzelnen Fassadenzeile. Horizontale Linien markieren die Grenzen der Schadensklassen.

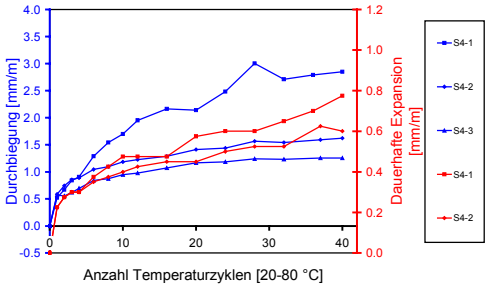
Anhang 4: Biegetest an Marmorplatten des SUB-Gebäudes

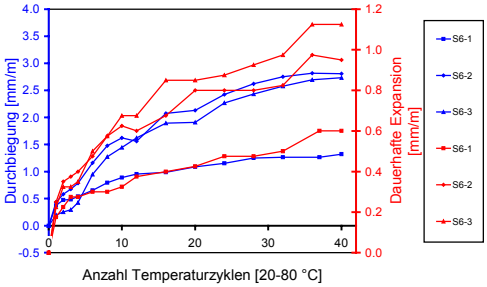
Einzelergebnisse aus dem Biegeversuch (vgl. Kap. 3.3.2.4) von jeweils drei Probekörpern aus sechs Fassadenplatten: Zuwachs der Durchbiegung (blaue Kurven) und der Länge (rote Kurven) der einzelnen Probekörper.

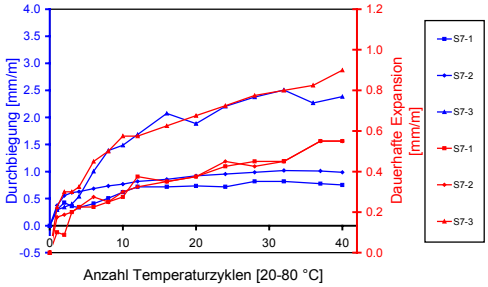












Anhang 5: Mechanische Eigenschaften demontierter Fassadenplatten des SUB-Gebäudes

Tabelle 1: Prüfergebnisse und statistische Kennwerte aus der Bestimmung der Biegefestigkeit unter Mittellinienlast nach EN 12372.

Platte	Anzahl n	Mittelwert $\bar{x}$ [MPa]	Größtwert max. [MPa]	Kleinstwert min. [MPa]	Standardabweichung s [MPa]	Variationskoeffizient v [%]	Logarithmischer Mittelwert $\bar{x}_{ln}$	Logarithmische Standardabweichung s_{ln}	Quantilenfaktor k_s	Unterer Erwartungswert *) E [MPa]
S0	8	**9.51**	10.59	7.95	0.84	8.8	2.25	0.09	2.19	7.76
S1	10	**11.71**	13.52	9.84	1.28	10.9	2.45	0.11	2.10	9.22
S2	10	**5.57**	6.06	4.94	0.36	6.5	1.71	0.07	2.10	4.84
S3	10	**4.80**	5.77	3.70	0.60	12.5	1.56	0.13	2.10	3.63
S4	10	**4.42**	5.08	4.05	0.38	8.7	1.48	0.08	2.10	3.69
S5	10	**5.97**	6.90	5.11	0.61	10.1	1.78	0.10	2.10	4.81
S6	10	**4.76**	5.21	4.20	0.27	5.6	1.56	0.06	2.10	4.22
S7	10	**3.94**	4.66	3.29	0.42	10.7	1.37	0.11	2.10	3.14

*) Der untere Erwartungswert entspricht dem 5%-Quantil einer logarithmischen Normalverteilung bei einem Vertrauensniveau von 75% (gemäß EN 12372: 1999).

Tabelle 2: Prüfergebnisse und statistische Kennwerte aus der Bestimmung der Ausbruchlast am Ankerdornloch nach prEN 13364.

Platte	Anzahl n	Mittelwert $\bar{x}$ [MPa]	Größtwert max. [MPa]	Kleinstwert min. [MPa]	Standardabweichung s [MPa]	Variationskoeffizient v [%]	Logarithmischer Mittelwert $\bar{x}_{ln}$	Logarithmische Standardabweichung s	Quantilenfaktor k_s	Unterer Erwartungswert *) E [MPa]
S0	8	**9.51**	10.59	7.95	0.84	8.8	2.25	0.09	2.19	7.76
S1	10	**11.71**	13.52	9.84	1.28	10.9	2.45	0.11	2.10	9.22
S2	10	**5.57**	6.06	4.94	0.36	6.5	1.71	0.07	2.10	4.84
S3	10	**4.80**	5.77	3.70	0.60	12.5	1.56	0.13	2.10	3.63
S4	10	**4.42**	5.08	4.05	0.38	8.7	1.48	0.08	2.10	3.69
S5	10	**5.97**	6.90	5.11	0.61	10.1	1.78	0.10	2.10	4.81
S6	10	**4.76**	5.21	4.20	0.27	5.6	1.56	0.06	2.10	4.22
S7	10	**3.94**	4.66	3.29	0.42	10.7	1.37	0.11	2.10	3.14

*) Der untere Erwartungswert entspricht dem 5%-Quantil einer logarithmischen Normalverteilung bei einem Vertrauensniveau von 75% (gemäß prEN 13364: 1999).

Danksagung

Die Durchführung der vorliegenden Arbeit wurde durch die Mitarbeit im EU-Forschungsprojekt „Testing and Assessment of Marble and Limestone“ (TEAM) G5RD-CT-2000-00233 und die finanzielle Unterstützung durch die Europäischen Kommission ermöglicht. Den „TEAM-mates“ danke ich für die Zusammenarbeit und für viele interessante Diskussionen.

Bei Prof. Dr. Siegfried Siegesmund (Geowissenschaftliches Zentrum der Universität Göttingen) bedanke ich mich für die Vergabe der Arbeit, die jahrelange Betreuung und das stete Interesse am Fortgang meiner Arbeit. Ich danke recht herzlich Prof. Dr. Rolf Snethlage (Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege) für die Übernahme des Korreferats und die interessanten Denkanstöße.

Meinen Kollegen Dr. Jörg Rüdrich und Dr. Thomas Weiß gilt mein ganz besonderer Dank für die Zusammenarbeit, die Diskussionen und die Hilfestellungen in mannigfaltiger Weise.

Mein Dank gebührt weiterhin:

- Lothar Laake und seinen Kollegen aus der Metallwerkstatt für das unermüdliche Engagement und die Hilfsbereitschaft bei der Entwicklung des Biegetests und bei technischen Problemen aller Art

- Andre Hüpers, Christian Müller und Gordon Maslowski für die Zusammenarbeit bei den Gebäudekartierungen auf dem Campus

- Michael Sosnitza für die Probenahme in Italien und die Hilfe bei so manchem technischen Problem

- Günther Tondock für die technische Unterstützung bei Festigkeitsprüfungen und beim Biegetest

- Peter Mattner von der Uni-Gärtnerei und Herrn Herwig für die Bereitstellung des Hubsteigers für die Fassadenkartierung

- Dr. Giancarlo Molli (Universität Pisa) für die wertvolle Unterstützung bei der Probenahme im Carrara-Gebiet

- Robert Förster und seinen Kollegen vom Gebäudemanagement der Universität Göttingen für die Unterstützung bei den Fassadenkartierungen

- Dr. Klaus Ullemeyer und Dr. Peter Spalthoff für die Texturmessungen am Joint Institute for Nuclear Research in Dubna (Russland) und die Hilfe bei der Datenauswertung

- Dr. Daniel Strohmeyer und Andreas Hoffmann für die gute Zusammenarbeit

- Ralf Gautier, Rüdiger Pfaar, Madlen Seidel, Tobias Vogt und Christian Huhs für ihre Mitwirkung bei den Laboruntersuchungen

- Maren Köhler für die Korrekturen und die fürsorgliche Unterstützung in der Endphase

- Kristin für das Licht am Ende des Tunnels

Lebenslauf

Name:	Andreas Koch
Geburtstag:	08. Januar 1973
Geburtsort:	Stadtsteinach
Staatsangehörigkeit:	Deutsch

Wissenschaftlicher Bildungsgang:

12/2000 – 10/2005	Promotionsarbeit zum Thema „*Deformation von Fassadenplatten aus Marmor: Schadenskartierungen und gesteinstechnische Untersuchungen zur Verwitterungsdynamik von Marmorfassaden*“ bei Prof. Dr. Siegesmund am Geowissenschaftlichen Zentrum der Universität Göttingen
12/2000 – 09/2005	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Geowissenschaflichen Zentrum der Universität Göttingen (GZG)
12/2000 – 08/2005	Mitarbeit im EU-Forschungsprojekt „Testing and Assessment of Marble and Limestone“ G5RD-CT-2000-00233
10/1994 – 12/2000	Studium der Geologie / Paläontologie an der Georg-August-Universität Göttingen
12/2000	Diplom Geologie / Paläontologie; Thema der Diplomarbeit: „*Verwitterungscharakteristik ausgewählter Bausandsteine*“
07/1996	Vordiplom Geologie / Paläontologie
10/1993 – 09/1994	Studium der Psychologie an der Georg-August-Universität Göttingen

Studienbegleitende Tätigkeiten:

02/2005 – 11/2005	Schadensanalyse an der Marmorfassade des Staatstheaters in Darmstadt im Auftrag des Hessischen Baumanagements (Koordination der Untersuchungen, Datenauswertung, Berichte zu gesteinstechnischen Laboruntersuchungen und zur Schadenskartierung)
05/2003 – 09/2004	Schadensanalyse an der Marmorfassade des Hauptgebäudes der Niedersächsischen Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen im Auftrag des Gebäudemanagements der Universität Göttingen (Koordination der Untersuchungen, Datenauswertung, Abschlussbericht)

10/1996 – 06/2000	Studentische Hilfskraft am Institut für Geologie und Dynamik der Lithosphäre in Göttingen
09/1998 – 06/1999	Praktikum (4 Wochen) am Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung in Hannover (Quartärkartierung)
11/1997 – 03/1998	Praktikum (8 Wochen) am Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven (gefügekundliche und petrophysikalische Untersuchung von Meereis)

Bisherige Publikationen:

Rezensierte Artikel:

Fischer, C., Koch, A. 2005. Die Porenraumentwicklung eines schwarzen Dachschiefers bei oxidativer Verwitterung. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 156(1), 75-79.

Koch, A., Siegesmund, S. 2004. The combined effect of moisture and temperature on the anomalous expansion behaviour of marble. Environmental Geology 46, 350-363.

Scheffzük, C., Siegesmund, S., Koch, A. 2004. Strain investigations on calcite marbles using neutron time-of-flight diffraction. Environmental Geology 46, 468-476.

Koch, A., Siegesmund, S. 2002. Bowing of marble panels: on-site damage analysis from the Oeconomicum building at Goettingen (Germany). Geological Society Special Publications 205, 291-306.

Koch, A., Siegesmund, S. 2001. Gesteinstechnische Eigenschaften ausgewählter Bausandsteine. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft 152(2-4), 681-700.

Weitere Artikel:

Koch, A., Siegesmund, S. 2005. Bausandsteine im Fokus. Naturstein 5/2005, 84-91.

Scheffzük, C., Siegesmund, S., Koch, A. 2004. Residual strain investigations using neutron TOF-diffraction on marble building stone. Proceedings of the International Conference on Dimension Stone 2004, 14-17 June 2004, Prague, 103-106.

Koch, A., Siegesmund, S. 2004. Bowing of marble panels: on-site damage analysis from the University Library Building at Goettingen (Germany). Proceedings of the 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Stockholm June 27 - July 2, 2004, 171-178.

Grelk, B., Goltermann, P., Schouenborg, B., Koch, A., Alnaes, L. 2004. The laboratory testing of potential bowing and expansion of marble. Proceedings of the International Conference on Dimension Stone 2004, 14-17 June 2004, Prague, 253-259.

Alnaes, L., Koch, A., Schouenborg, B., Akesson, U., Moen, K. 2004. Influence of rock and mineral properties on the durability of marble panels. Proceedings of the International Conference on Dimension Stone 2004, 14-17 June 2004, Prague, 245-251.

Siegesmund, S., Koch, A. 2002. Ursachen für Schäden von Natursteinfassaden. Naturstein 8/2002, 52-57.

Heinrichs, T., Siegesmund, S., Kubersky, J., Hettwer, C., Gussone, N., Koch, A., Dahmen, O., Klose, A., Northoff P., Tischer, A., Strohmeyer, D. 1999. Bericht 1998 über geologische Aufnahmen auf Blatt 178 von St. Veit im Defereggental. Jahrbuch der geologischen Bundesanstalt, Wien 142/3, 312-328.

Siegesmund, S., Heinrichs, T., Schuster, G., Steenken, A., Kubersky, J., Hettwer, C., Gussone, N., Koch, A., Dahmen, O., Klose, A., Nordhoff, P. 1998. Bericht 1997 über geologische Aufnahmen auf Blatt 178 von St. Veit im Defereggental. Jahrbuch der geologischen Bundesanstalt, Wien 141/3, 308-320.

Kurzbeiträge:

Koch, A., Siegesmund, S. 2005. Deterioration of marble cladding: Facade assessment as a basis approach for restoration measures. EGU General Assembly 2005, Vienna, Austria: Geophysical Research Abstracts (Vortrag).

Koch, A., Grelk, B., Siegesmund, S. 2005. Correlation between rock properties and the in situ behaviour of marble used as cladding material at buildings. EGU General Assembly 2005, Vienna, Austria: Geophysical Research Abstracts (Poster).

Schouenborg, B., Grelk, B., Alnaes, L., Brundin, J.A., Blasi, P., Yates, T., Marini, P., Tschegg, E., Unterweger, R., Tokarz, B., Koch, A., Bengtsson, T., Mladenovic, A., Goralczyk, S. 2003. TEAM - Testing and Assessment of Marble and Limestone Cladding. International Symposium on Industrial Minerals and Building Stones 2003, Sept 15-18, Istanbul (Abstract).

Koch, A., Siegesmund, S. 2003. Bowing of marble panels: On-site damage analysis from the Oeconomicum Building at Goettingen (Germany). EGS-AGU-EUG Joint Assembly 2003, Nice, France: Geophysical Research Abstracts Vol. 5 (Poster).

Koch, A., Siegesmund, S. 2001. Gesteinstechnische Eigenschaften ausgewählter Bausandsteine. Arbeitstreffen zum Kulturgüterschutz, Göttingen, 29.-30. März 2001 (Vortrag).