

BAUWESEN

DIN

Helmuth Venzmer (Hrsg.)

Fassadensanierung

Praxisbeispiele, Produkteigenschaften,
Schutzfunktionen



Mit Normen auf CD



Rudolf Müller

Beuth

Beurteilung der Standsicherheit vorgehängter Fassadenplatten am Beispiel der Marmorfassade des Staatstheaters Darmstadt

Bestandsanalyse – Schadensbeurteilung – Sanierung



S. Siegesmund



M. Pfeifer



R. Wittenbecher

Zusammenfassung

In den sechs Jahren von 2001 bis 2007 wurden im Zuge der Grundinstandsetzung des Staatstheaters Darmstadt sowohl in architektonischer Hinsicht mit diversen Um- und Anbauten sowie in technischer Hinsicht in Bezug auf haustechnische Anlagen, Brandschutz und Tragwerk eine umfangreiche Sanierung und teilweise Ertüchtigung der Stahlbetonkonstruktionen vorgenommen. Gleichzeitig wurde die vorgehängte Marmorfassade aufgrund zahlreicher Mängel in Form von gerissenen und schüsselförmig verformten Marmorplatten mit der Gefahr des Herabfallens einer umfangreichen Untersuchung unterzogen. Sie sollte klären, ob für die Fassade generell noch eine ausreichende Standsicherheit vorliegt und nur Teile auszutauschen sind oder ob eine Komplettsanierung mit einem vollständigen Ersatz der Fassade erforderlich ist. Eine komplette Erneuerung der Fassade wurde aus Kostengründen als kaum machbar eingestuft, sodass das Ziel der Untersuchungen war, Kriterien zu erarbeiten, inwieweit bestimmte Schadensmerkmale eine Gefährdung der öffentlichen Sicherheit darstellten bzw. inwieweit die betroffenen Platten noch als ausreichend sicher eingestuft und eine Teilsanierung vorgesehen werden konnte.

Rein bautechnische Betrachtungen oder Untersuchungen, z. B. Belastungstests, statische Berechnungen usw., reichen für Natursteinfassaden und insbesondere bei solchen aus Marmor allerdings nicht aus. Vielmehr sind umfassende mineralogische und gesteintechnische Untersuchungen notwendig, die das Gesteinsgefüge der verwendeten Natursteine erfassen und Rückschlüsse auf makroskopische Eigenschaften und deren Einfluss auf bautechnische Kennwerte ermöglichen.

Summary

From 2001 to 2007, extensive renovations were undertaken at the State Theatre of Darmstadt. Architecturally, this overhaul included remodelling and new extensions to the building as well as the refurbishment of internal technical installations, fire protection systems and the partial strengthening of steel reinforced concrete structures. At the same time, the marble panels of the facade were subjected to a comprehensive investigation because of numerous damages like cracks and bowing, which could lead to the panels falling down. The study was necessary for clarifying whether the facade in general has a sufficient structural integrity, where only a few panels need to be replaced, or if a complete renewal of the entire facade is required. For reasons of cost, the latter was considered to be hardly feasible. Thus, the goal of the investigation was to develop criteria which would determine specific damage characteristics that represent a potential danger to the public, and to what extent the affected slabs could be classified as sufficiently safe, where only a partial renovation may be required.

Examinations from the engineering point of view or investigations such as loading tests, static calculations and so forth are not sufficient for marble facades. In these cases, comprehensive mineralogical and rock mechanical investigations are necessary that record the rock fabrics of the natural stones being used. Then inferences can be made on the macroscopic properties and their influence on the technical construction values.

1 Das Staatstheater Darmstadt

1.1 Allgemeines zum Gebäude

Das Staatstheater Darmstadt wurde von 1968 bis 1972 nach den Plänen des Architekten Rolf Prange, Darmstadt, erbaut. Der Bau mit seinen zwei Haupt Bühnen (Großes Haus mit 956 Plätzen und Kleines Haus mit 482 Plätzen) und bis zu acht Geschossen erstreckt sich bei einem umbauten Raum von mehr als 260 000 m³ insgesamt über eine Fläche von ca. 90 m × 190 m (Bild 1).

Das äußere Erscheinungsbild des Stahlbetongebäudes wird stark von der kubischen Form und seiner vorgehängten Natursteinfassade aus Marmor geprägt (Bild 2).

Nach rund 30 Jahren wurde eine grundlegende Sanierung des Gebäudes erforderlich. Im Jahr 2001 wurde das Ingenieurbüro Professor Pfeifer und Partner vom Hessischen Baumanagement mit der Tragwerksplanung dieser umfassenden Instandsetzungsmaßnahme einschließlich Um- und Anbau betraut.

Die beauftragten Leistungen umfassten neben der eigentlichen Tragwerksplanung u. a. auch die Analyse und Bewertung der Schäden der vorgehängten Natursteinfassade aus Marmor.

Mit Hilfe der hinzugezogenen Fachgutachter der Universität Göttingen, Geowissenschaftliches Zentrum unter der Leitung von Prof. Dr. S. Siegesmund, sowie der Universität Karlsruhe, Institut für Tragkonstruktionen der Fakultät Architektur unter Leitung von Professor M. Pfeifer, konnten die Schäden an der Fassade aufgenommen und interpretiert werden. In Zusammenarbeit mit dem Prüfenieur, Dr.-Ing. W. Schulenberg, Darmstadt, wurden die nicht mehr standsicheren Fassadenplatten bestimmt, die schließlich nach Wunsch des Architekten, Prof. A. Lederer, Stuttgart, durch Messingplatten ersetzt wurden.

1.2 Beschreibung der Fassade

Die vorgehängte Marmorfassade weist unterschiedliche Plattenformate von ca. 0,5 m² bis zu 1,6 m² auf. Dabei variiert

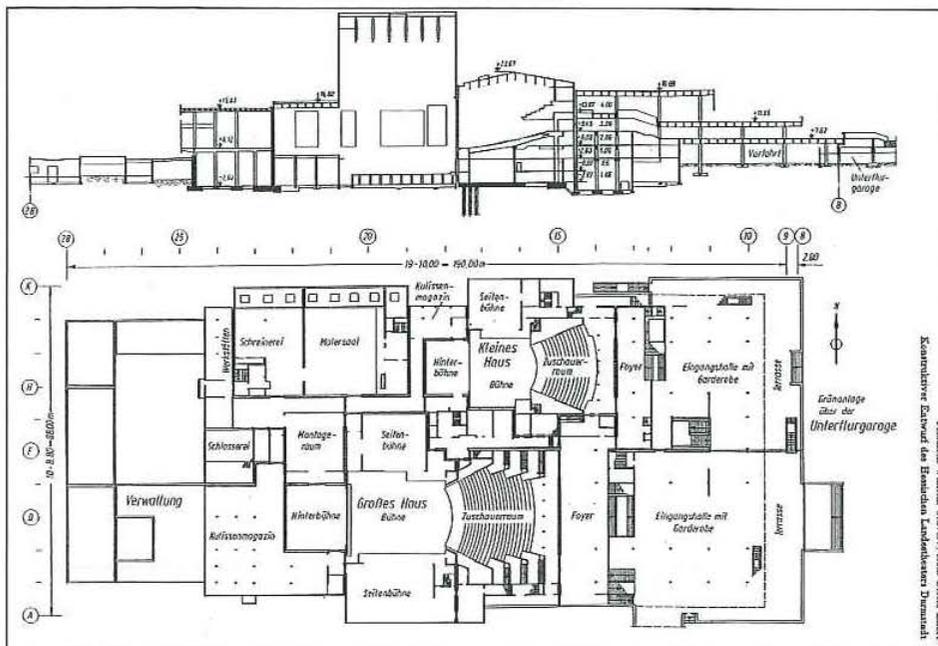


Bild 1: Grundriss und Nord-Süd-Schnitt durch das Theater vor Instandsetzung und Umbau



a) Gesamtansicht

b) Detailansicht

Bild 2: Staatstheater Darmstadt mit Marmorfassade vor der Sanierung 2002

die Plattenhöhe, während die Plattenbreite mit ca. 1,00 m nahezu einheitlich bei allen Platten konstant ist. Die Platten sind konventionell mit Einmörtelankern nach DIN 18156 mit dem tragenden Beton verbunden. Die Dorne sind horizontal in den Vertikalfugen angeordnet (Bilder 3 und 4).

Die Fassadenplatten wiesen im Jahr 2001, dem Beginn der Baumaßnahme, vereinzelt sichtbare Risschäden, Abplatzungen und Verformungen (Verbiegungen) auf (Bild 5). Bereits 1990 wurden erste Verbiegungen einzelner Fassadenplatten beobachtet.

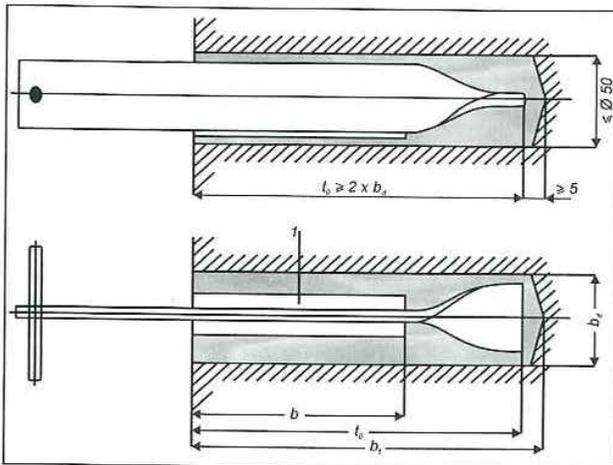


Bild 3: Auszug aus DIN 18156-3, Einmörtelanker

2 Bestandsaufnahme

2.1 Visuelle Begutachtung der Fassadenplatten – erste Bestimmung des Schadensausmaßes

Dem beauftragten Ingenieurbüro für Tragwerkplanung wurde vorab die Aufgabe gestellt, zur Quantifizierung der Sanierungskosten eine Größenordnung für den Umfang der Schädigungen an den Fassadenplatten anzugeben, ohne dass es zu diesem Zeitpunkt bereits eine Einschätzung hinsichtlich der Relevanz der Schädigungen im Bezug auf die Standsicherheit gegeben hätte. Hierzu konnte zunächst ohne Gerüst nur eine visuelle Schadenssichtung mit dem Fernglas durchgeführt werden („Platte für Platte“ der ca. 4000 Fassadenplatten). Fassadenabschnitte wurden fotografiert und die vorgefundenen, sichtbaren Schäden tabellarisch dokumentiert. Hierbei wurde auch die Größenordnung des Verbiegungsmaßes angegeben (stark oder leicht geschüsselt) und aufgrund der hiermit verbundenen erhöhten Gefahr eines Ankerdornausbruchs wurden Empfehlungen für den Austausch von Platten gegeben. Sehr viele, teils konkave, teils konvexe Verformungen sind als „geringfügig und grundsätzlich (noch) nicht kritisch einzustufen“ bewertet worden.

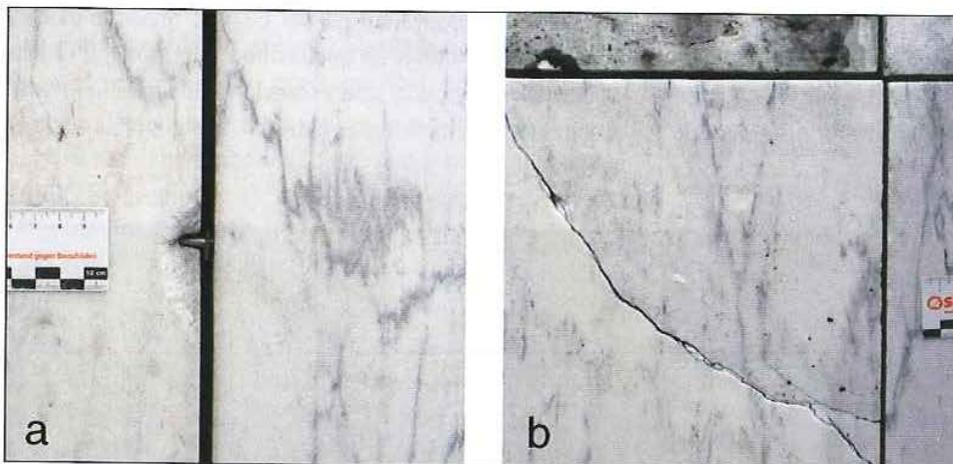


Bild 4: Schadensbilder der Fassadenplatten

- a) Ankerdornausbruch (Traganker in der vertikalen Fuge)
- b) Abriss einer Plattenecke

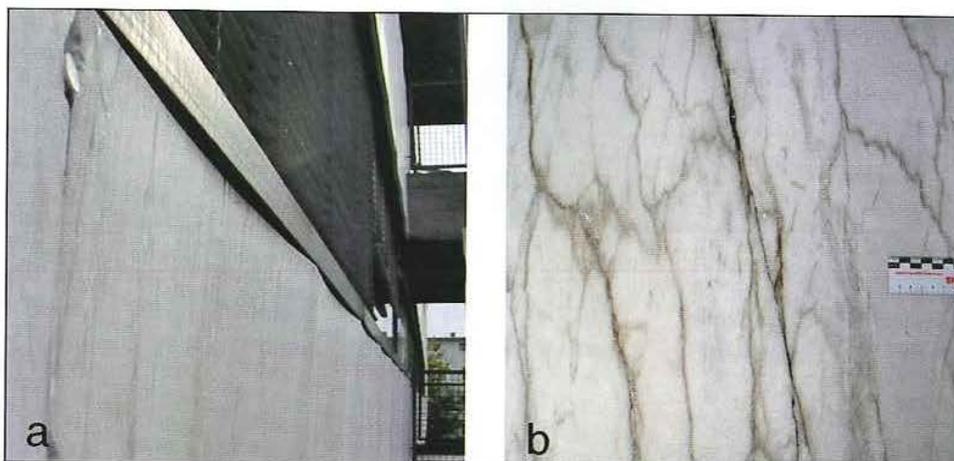


Bild 5: Geschädigte Fassadenplatten

- a) schüsselartig verformte Platten der Westfassade
- b) geschädigte Platte mit starker Rückverwitterung

Mit dem Bauherrn wurden Handlungsempfehlungen zu kurz- und längerfristigen weiteren Untersuchungen abgestimmt sowie Kriterien für den Austausch einzelner Platten festgelegt. Es wurde nach dieser ersten visuellen Untersuchung lediglich von einem Umfang von ca. 2 % bis maximal 5 % der Marmorplattenfläche ausgegangen, die abzuhängen und auszutauschen sein würden, und eine entsprechende Kostenschätzung vorgenommen (Pfeifer, 2001, Wittenbecher 2002). Es hat sich aber gezeigt, dass die alleinige Inaugenscheinnahme und die damit verbundene Schadensanamnese für die Bewertung nicht ausreichend waren. Daher wurde Prof. S. Siegesmund, der sich in den letzten Jahren auf die Natursteinschädigungen in der Architektur spezialisiert hat, von der Universität Göttingen beauftragt, die Natursteinfassade im Detail zu untersuchen, da nur so das eigentliche Ausmaß der Natursteinschäden charakterisiert werden konnte.

2.2 Untersuchungen an der Fassade

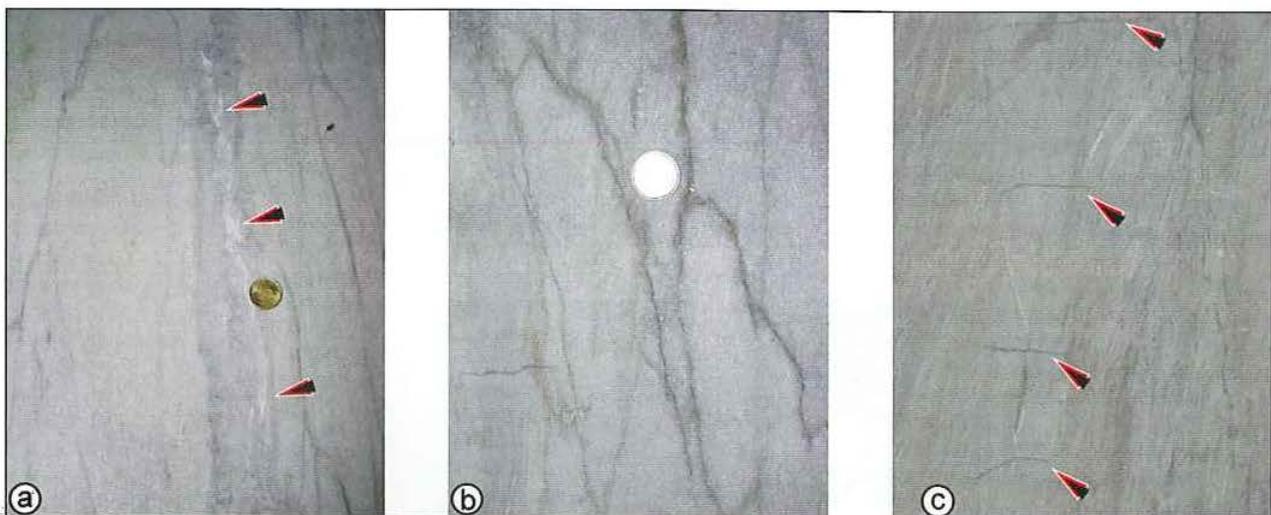
Für die Analyse der Schäden an der Fassade wurden sowohl vor Ort als auch im Labor Untersuchungen zur Feststellung der tatsächlichen Festigkeit der Fassadenplatten vorgenommen. Darüber hinaus sollte geprüft werden, ob der Verbiegungsgrad mit der Entfestigung des Materials korreliert. Übertragen auf die Fassade hätte man mit der zerstörungsfrei ermittelten Durchbiegung ggf. ein Instrument an der Hand, um die Gesteinsfestigkeit indirekt abzuschätzen. Die Kennwerte wurden an Plattenbereichen geprüft, die keine Makrorisse aufwiesen, und gelten daher nur für das Fassadenmaterial, welches frei von sichtbaren Rissen ist.

2.2.1 Makrogefüge

Der fein- bis mittelkörnige Marmor ist in mm- bis cm-Abständen von einem Netzwerk aus grauen bis bräunlichen Schlieren oder Bändern durchzogen. Diese Bänder markieren die Foliationsebene. Unter Foliation versteht man allgemein ein planares Gefügeelement, welches penetrativ im Gesteinskörper anzutreffen ist und aus der geologischen Vorgeschichte des Marmors resultiert. Von Steinmetzen, in der steinverarbeitenden Industrie als auch in den technischen Normen wird die Foliation auch als „Lager“ bezeichnet. Die Foliation ist insofern von Bedeutung, da sie eine mechanische Schwächezone darstellen kann und einen erheblichen Einfluss auf die gesteintechnischen Eigenschaften hat. Sie ist bei allen Fassadenplatten etwa gleich orientiert und steht senkrecht zur Plattenoberfläche (Bild 6).

Teilweise treten grobkörnige cm-dicke Lagen auf, die Einkristalle von bis zu über 1 cm Durchmesser enthalten und ebenfalls parallel zur Foliation orientiert sind. Weiterhin sind vereinzelt cm- bis teilweise dm-dicke Bänder aus reiner Calcitmatrix ohne Schlieren zu beobachten. Sie sind häufig im dm-Abstand von offenen Makrorissen durchzogen, die etwa senkrecht zur Foliation orientiert sind und deren Länge sich in der Regel über die gesamte Breite dieser Bänder hinweg erstreckt.

Ein weiteres Rissystem ist bei einigen Fassadenplatten parallel zur Foliation zu beobachten. Sie erreichen nicht selten dm-Länge und sind entweder mit weißlichem oder bräunlichem feinkörnigen Material verfüllt oder rückgewittert.



a) Schlieren und grobkörnige Calcitlagen (Pfeile) markieren die Foliation

b) Graue und bräunliche Schlieren, die teilweise Risse herausbilden

c) Feinkörniges, helles Calcitband mit Querrissen (Pfeile)

Bild 6: Makrogefüge des Fassadenmarmors

Die zum Zwecke gesteinsphysikalischer Analysen demonstrieren Fassadenplatten erweisen sich im Gegensatz zu vielen Platten am Gebäude, die eine ausgeprägte Rissbildung besitzen, als relativ homogen.

2.2.2 Untersuchungen in situ

Während der ersten Messkampagne im Rahmen der Schadenskartierung an der Südfassade und der südlichen Westfassade des Staatstheaters Darmstadt durch die Arbeitsgruppe von Prof. S. Siegesmund zeichnete sich bereits ab, dass die alleinige Charakterisierung des Verbiegungsgrades ohne die Berücksichtigung der sichtbaren Makrorisse bei weitem nicht ausreicht, um zu gesicherten Aussagen über die Standsicherheit der Platten zu gelangen. Es handelt sich beim verwendeten Fassadenmaterial um einen extrem heterogenen Marmor mit einer Neigung zur Herausbildung von Makrorissen, die offensichtlich mit der Petrographie des Gesteins korrespondiert.

Die sichtbaren Risse und Ausbrüche sind nicht nur von den Ankerdornen initiiert, sondern auch parallel zum makroskopisch erkennbaren Gefüge der Marmorplatten sowie in verschiedensten Positionen zu beobachten. Neben den bzw. in Verbindung mit den beobachtbaren Schädigungen sind auch die mikroskopischen Eigenschaften des Marmors, insbesondere nach einer so langen Standzeit, von entscheidender Bedeutung für die Beurteilung.

Generell können bei Marmor vielfältige Verwitterungsformen auftreten, z. B. Rückwitterung, Krustenbildung, biogene Besiedlung etc., welche aber meist auf dem oberflächennahen Bereich beschränkt bleiben (Grimm 1999, Siegesmund et al. 2007, 2008, Siegesmund und Grelk 2008). Die Prozesse, die zu der beobachteten 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. Letztere nimmt eine Schlüsselrolle ein, die erst in den letzten Jahren Gegenstand von Forschungsarbeiten wurde (Siegesmund et al. 1999, Siegesmund et al. 2000, Koch und Siegesmund 2002, Zeisig et al. 2002, Grelk et al. 2004, Koch & Siegesmund 2004, Weiss et al. 2003, 2004, Siegesmund et al. 2008, Siegesmund et al. 2010, Rüdrieh et al. 2010). 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 Mikrorissysteme 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, beispielsweise Lösungsprozesse oder Frostsprengung (Siegesmund et al. 2000).

Hinsichtlich der Verwitterungsproblematik von Marmor in seiner Verwendung als Fassadenmaterial stellt sich die Frage, welche Bedeutung extrinsische und intrinsische Einflussfaktoren auf die Plattendeformation, die Materialfestigung und letztendlich auf die Lebensdauer beziehungsweise die Standsicherheit von Marmorfassaden haben.

Im Einzelnen wurden folgende Kartierkriterien entwickelt und für jede der insgesamt über ca. 4000 Platten entsprechend systematisch erfasst:

- vertikale Durchbiegung
- horizontale Durchbiegung
- Fugenweiten
- Anzahl, Länge, Orientierung und Position von Randrissen
- Anzahl von Rissen quer zur Foliation und Länge des größten Querrisses
- Intensität von rückverwitterten Rissen
- Ausbrüche, drohende Ausbrüche, Abplatzungen und Durchbrüche
- fotografische Dokumentation aller Randrisse und Ausbrüche
- visuelle Abschätzung der mineralogischen Zusammensetzung der Schlieren
- petrographische Besonderheiten
- Anzahl der Ankerdorne.

Alle Daten wurden statistisch ausgewertet. Auf Grundlage dieser Auswertung erfolgte die Klassifizierung der Schäden. Die Unterscheidungskriterien zu den Schadenskategorien und den einzelnen Schadensklassen wurden detailliert katalogisiert und ausgewertet. Die Auswertung erfolgte anhand digitalisierter Übersichtspläne. Insgesamt wurden fünf Schadenskategorien unterschieden. Die Daten zu den Plattenschäden wurden für jede Schadenskategorie klassifiziert und in die überarbeiteten Fassadenpläne eingearbeitet (Bilder 7a bis 7e).

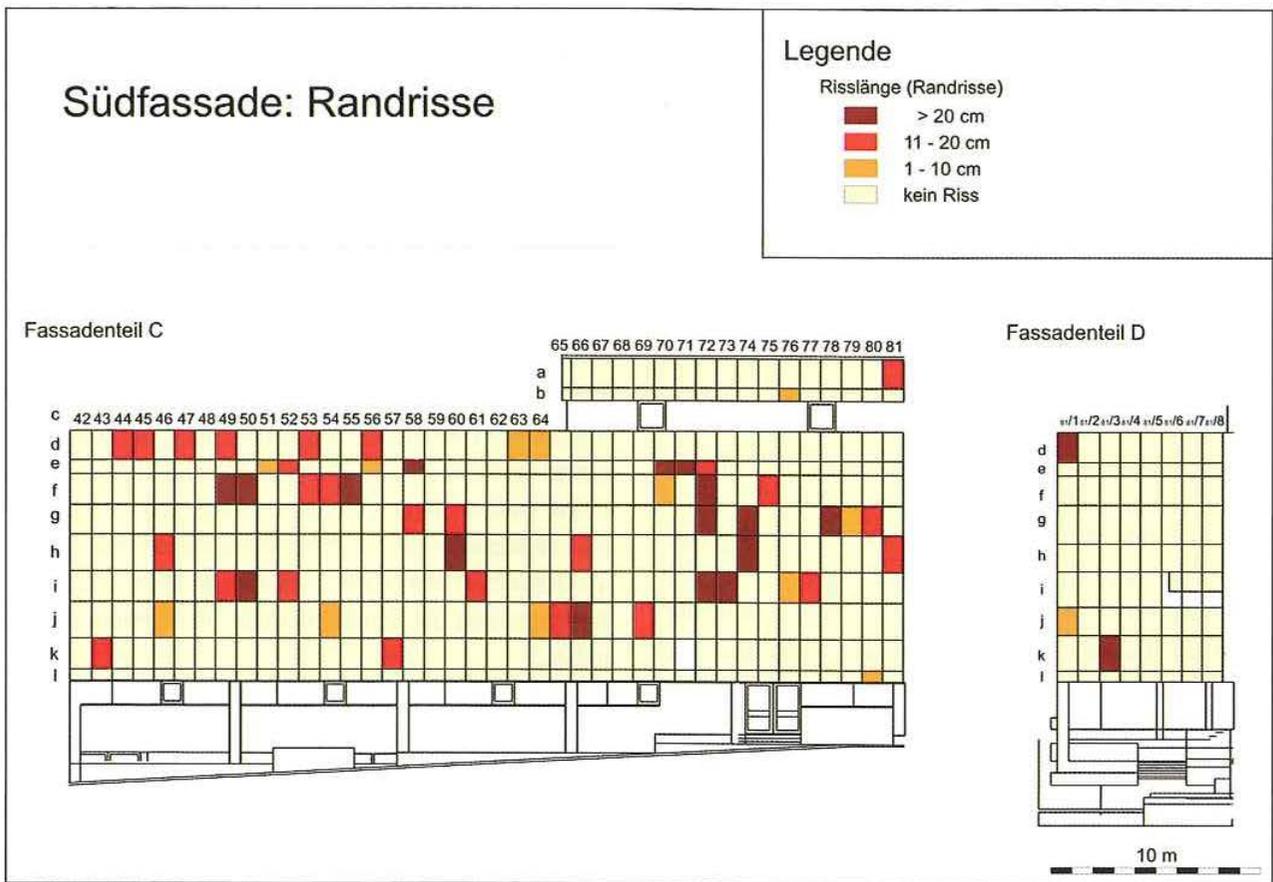


Bild 7: Fassadenpläne mit Darstellung der verschiedenen Kartierkriterien exemplarisch für die Südfassade
a) Randrisse

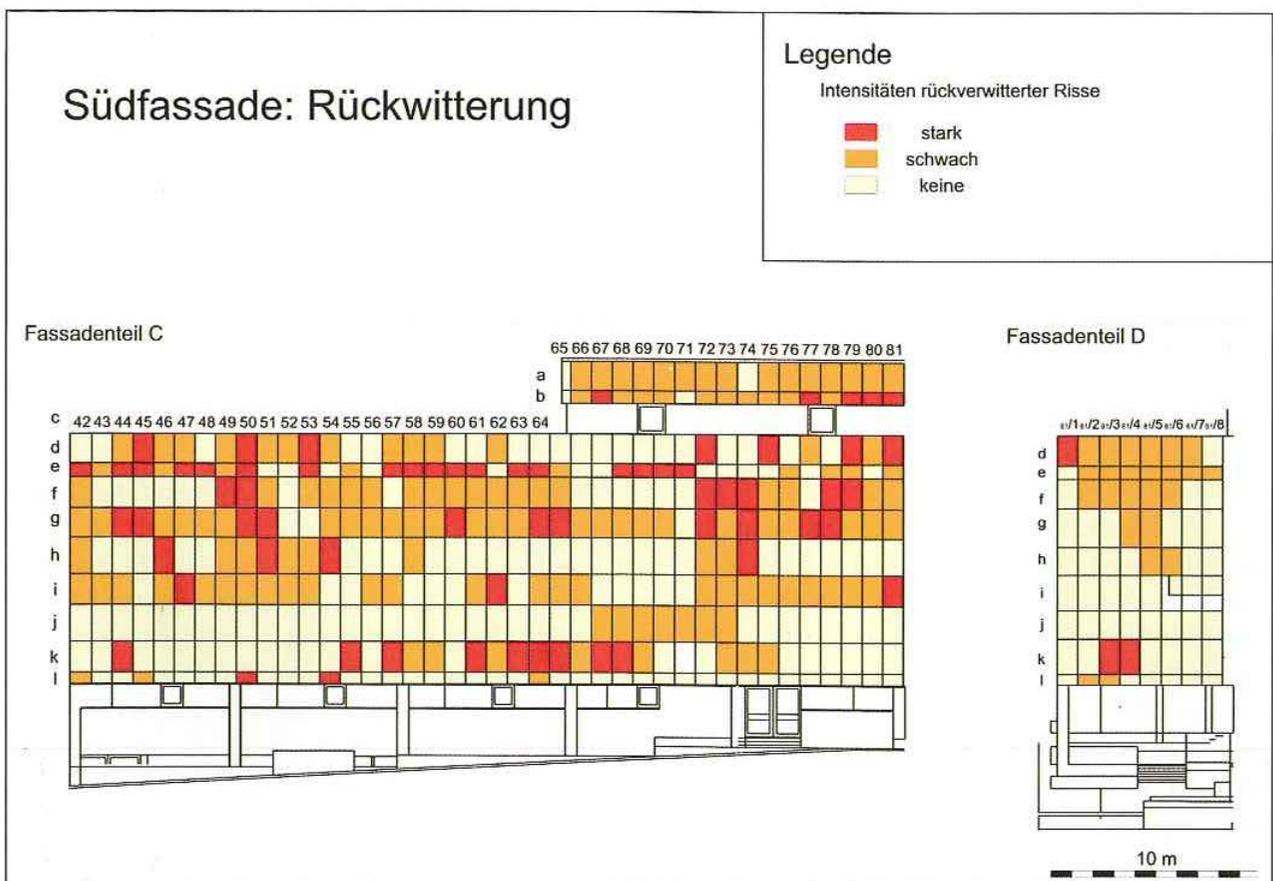


Bild 7: b) Rückwitterung

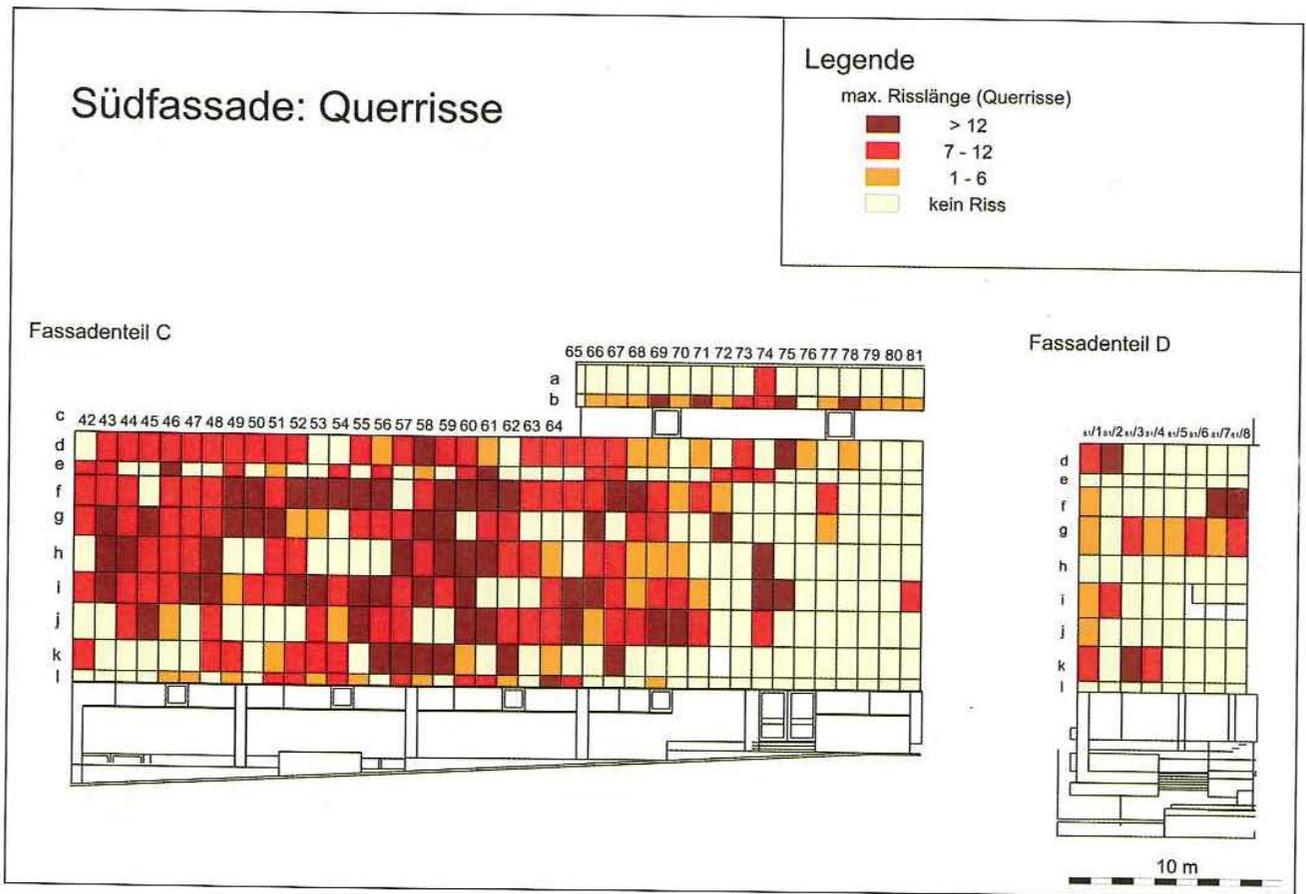


Bild 7: c) Querrisse

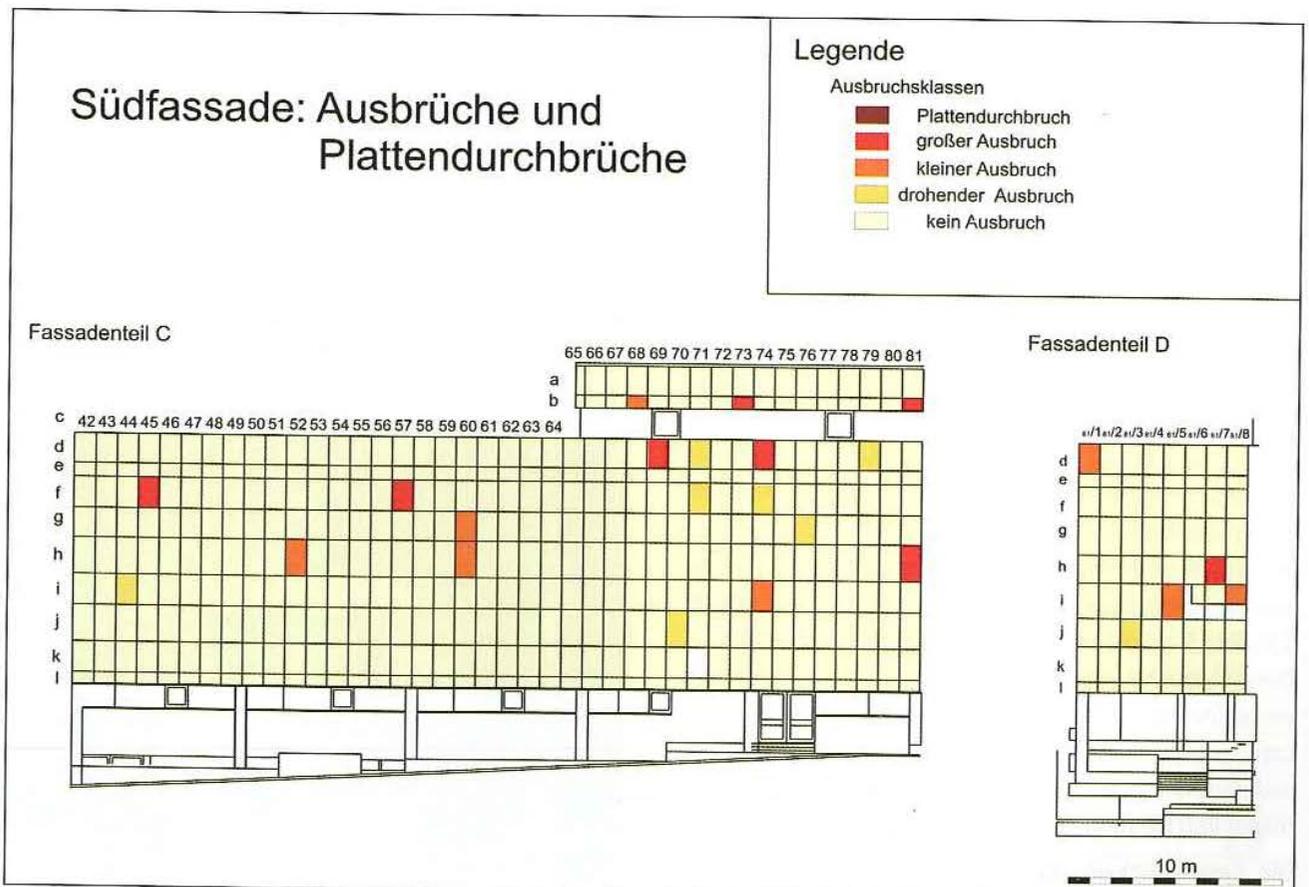


Bild 7: d) Ausbrüche und Plattendurchbrüche

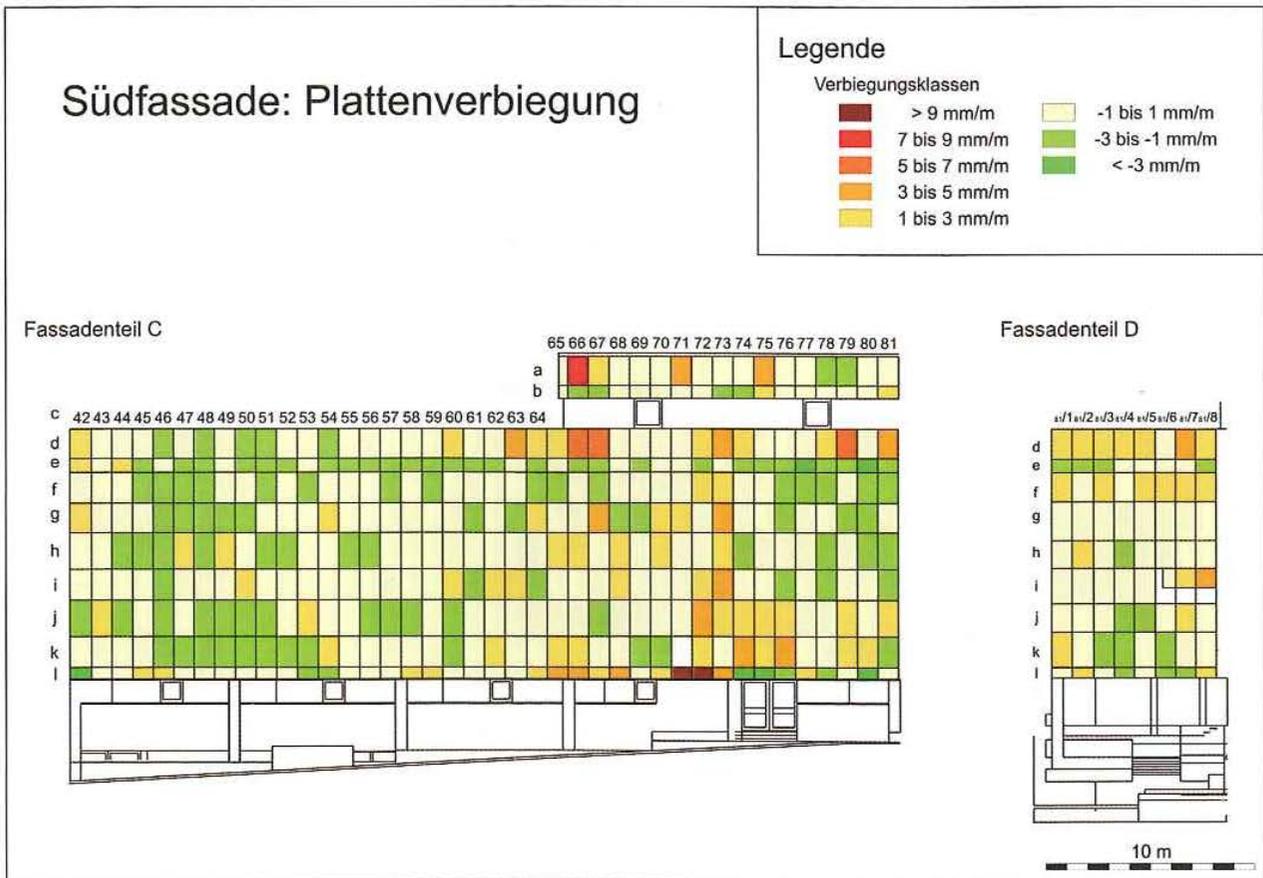


Bild 7: e) Plattenverbiegungen

Die entsprechenden Kriterien sind in der jeweiligen Legende hinsichtlich Intensität und Auswahlkriterien aufgeführt worden.

2.2.3 Biegezugfestigkeit gemäß DIN EN 13161, DIN EN 12372

Da bei dem gesamten Projekt Eile geboten war, insbesondere im Hinblick auf einen gesicherten Kostenrahmen, wurden zunächst einzelne Platten an wenig einsehbaren Bereichen abgehängt und im Labor der Universität Karlsruhe mit einer relativ geringen Stückzahl, also einer kleinen Stichprobe, auf ihre Biegezugfestigkeit untersucht. Dabei wurden Versuchskörper mit unterschiedlicher Orientierung aus den Platten herausgeschnitten, um den Einfluss der vermuteten starken Anisotropie des Materials zu berücksichtigen. Die nach DIN 18516 geforderte Sicherheit der Biegezugfestigkeit gegenüber den rechnerisch ermittelten Biegespannungen aus äußeren Lasten beträgt 3,0. Bild 8 zeigt einen Biegebelastungsversuch im Labor. Diese Versuche waren letztlich Grundlage für die schnell einzuleitenden Maßnahmen vor Ort und die dazu nötigen Entscheidungsmaßstäbe, parallel wurden aber weitere, umfangreichere Untersuchungen an der Universität Göttingen durchgeführt.

Die Biegefestigkeit, ermittelt durch die Universität Göttingen (Tabelle 1 und Bild 9), zeigt eine hohe Anisotropie und beträgt in X-Richtung parallel zur Foliation etwa das

Doppelte als in Y-Richtung senkrecht zur Foliation. Ursächlich hierfür sind zum einen die mineralisierten Bahnen, die mechanische Diskontinuitäten darstellen und in der Foliationsebene orientiert sind. Zum anderen bewirkt die Kornregelung parallel zur Foliation eine mechanische Anisotropie. Senkrecht zur Foliation (in Y-Richtung) ist die Anzahl der Korngrenzen pro Längeneinheit und damit die Häufigkeit mechanischer Schwachstellen größer als



Bild 8: Prüfung der Biegezugfestigkeit

parallel zur Foliation in X-Richtung. Hinzu kommt, dass im Laufe des Verwitterungsprozesses Mikrorisse bevorzugt senkrecht zur Y-Richtung herausgebildet werden und die Anisotropie der Biegefestigkeit weiter verstärken dürften.

Nach den Untersuchungen in Göttingen reicht die mittlere Biegefestigkeit in X-Richtung von 14,3 MPa für die unverbogene Platte Z3a (Durchbiegung 0,8 mm/m) bis 9,0 MPa in der Platte P4 (Durchbiegung 4,4 mm/m), wobei der obere Wert eine Ausnahme darstellt. Der zweithöchste Wert beträgt 11,4 MPa. Die Biegefestigkeit schwankt weitgehend unabhängig vom Grad der Verbiegung in einem engen Bereich. Beispielsweise weist die stark verbogene Platte P5 (Durchbiegung 10,3 mm/m) mit 10,5 MPa fast die gleiche Biegefestigkeit auf wie die kaum verbogene Platte P1 (Durchbiegung 0,7 mm/m) mit 10,7 MPa. In Y-Richtung liegen die Werte für die vier am schwächsten verbogenen Platten zwischen 6,5 MPa und 8,0 MPa höher als für die Platten mit höherer Durchbiegung (4,2 MPa bis 5,5 MPa), wobei sich die Festigkeiten ab einer Durchbiegung > 4,0 mm/m nicht mehr wesentlich unterscheiden. Die unteren Erwartungswerte der Biegefestigkeit lassen vergleichbare Tendenzen erkennen wie die Mittelwerte aus

den beiden Richtungen. Sie schwanken zwischen 6,2 MPa und 11,5 MPa in X-Richtung und zwischen 2,7 MPa und 5,2 MPa in Y-Richtung.

Für die Randplatten mit dem größten Format, das beim Staatstheater vorkommt, und erhöhter Windbelastung konnte mit den ermittelten Werten eine Sicherheit von 3,0 nicht gewährleistet werden. Die Biegezugfestigkeit wurde hier mit einem Wert von 5,86 MPa der unverformten Platten relativ hoch ermittelt. Dieser Wert ergibt sich im Vergleich zu den tatsächlich erzielten Werten aufgrund der geringen Stichprobe als unterer Erwartungswert bei einem Vertrauensniveau von 75 %. Der geringste Wert im Test lag dagegen bei 7,64 MPa, der höchste bei immerhin 21,34 MPa! Die rechnerisch ermittelten Spannungen der großen Randplatten hätten bei dreifacher Sicherheit jedoch einen unteren Erwartungswert von 7,2 erfordert. Um eine detaillierte Entscheidungsgrundlage für das Austauschen oder Erhalten der Platten zu bekommen, mussten im Zuge der Schadenskartierung auch genaue Aufnahmen der tatsächlichen Plattengrößen als Basis für die Berechnung der Spannungen aus den Windlasten vorgesehen werden.

Tabelle 1: Biegezugfestigkeiten der bearbeiteten Fassadenplatten mit der Belastungsrichtung parallel zur X- und Y-Richtung (Göttinger Versuche)

Platte	Richtung der Zugkraft	Anzahl n	Mittelwert \bar{x} in MPa	Größt-wert max. in MPa	Kleinst-wert min. in MPa	Standard-abweichung s in MPa	Variations-koeffizient v in %	Logarith-mischer Mittelwert \bar{x}_{ln}	Logarith-mische Standard-abweichung s_{ln}	Quantilen-faktor k_s	Unterer Erwartungs-wert *) E in MPa
P1	x	5	10.68	11.88	9.88	0.85	8.0	2.37	0.08	2.46	8.77
P1	y	6	6.86	7.68	5.22	0.87	12.7	1.92	0.14	2.34	4.93
P2	x	6	11.37	12.74	8.87	1.53	13.5	2.42	0.14	2.34	8.10
P2	y	6	6.66	7.63	5.33	0.89	13.3	1.89	0.14	2.34	4.80
P3	x	6	10.29	11.59	8.93	0.96	9.4	2.33	0.09	2.34	8.21
P3	y	6	4.24	5.38	3.21	0.76	17.9	1.43	0.18	2.34	2.74
P4	x	6	9.04	11.21	7.52	1.40	15.5	2.19	0.15	2.34	6.28
P4	y	6	4.63	5.50	3.73	0.74	16.0	1.52	0.16	2.34	3.12
P5	x	6	10.49	11.19	9.84	0.53	5.0	2.35	0.05	2.34	9.32
P5	y	6	3.59	4.16	3.30	0.32	9.0	1.27	0.09	2.34	2.92
P6	x	6	9.51	12.15	7.42	1.57	16.5	2.24	0.16	2.34	6.43
P6	y	6	4.36	5.49	3.51	0.81	18.6	1.46	0.18	2.34	2.83
Z2	x	6	10.54	11.07	9.33	0.65	6.2	2.35	0.06	2.34	9.05
Z2	y	5	6.03	7.95	4.86	1.21	20.1	1.78	0.19	2.46	3.70
Z3a	x	6	14.24	15.57	12.84	1.25	8.8	2.65	0.09	2.34	11.54
Z3a	y	6	6.01	6.45	5.56	0.34	5.7	1.79	0.06	2.34	5.25
Z4	x	6	10.48	12.95	7.59	2.18	20.8	2.33	0.22	2.34	6.16
Z4	y	6	4.31	4.55	4.13	0.19	4.4	1.46	0.04	2.34	3.89

*) Der untere Erwartungswert entspricht dem 5%-Quantil einer logarithmischen Normalverteilung bei einem Vertrauensniveau von 75 % (gemäß DIN EN 12372:1999-06).

Tabelle 2: Ankerausbruchslasten der bearbeiteten Fassadenplatten mit der Belastungsrichtung parallel zur X- und Y-Richtung (Göttinger Versuche)

Platte	Anzahl n	Mittelwert \bar{x} in kN	Größt-wert max. in kN	Kleinst-wert min. in kN	Standard-abweichung s in kN	Variations-koeffizient v in %	Logarith-mischer Mittelwert \bar{x}_{ln}	Logarith-mische Standard-abweichung s_{ln}	Quantilen-faktor k_s	Unterer Erwartungs-wert *) E in kN
P1	8	1.98	2.80	1.14	0.65	33.0	0.63	0.35	2.19	0.87
P2	8	1.83	2.32	1.36	0.35	19.1	0.59	0.19	2.19	1.18
P3	12	2.14	2.97	1.73	0.36	16.6	0.75	0.16	2.04	1.54
P4	12	1.57	1.91	1.32	0.19	12.4	0.44	0.12	2.04	1.22
P5	12	1.50	2.00	1.00	0.27	17.6	0.39	0.18	2.04	1.02
P6	9	1.37	1.76	0.99	0.22	16.2	0.30	0.17	2.14	0.95
Z3a	12	1.72	2.61	1.24	0.39	22.6	0.52	0.22	2.04	1.08
Z4	11	1.17	1.49	0.76	0.23	19.9	0.14	0.22	2.07	0.73

*) Der untere Erwartungswert entspricht dem 5%-Quantil einer logarithmischen Normalverteilung bei einem Vertrauensniveau von 75 % (gemäß DIN EN 12372:1999-06).

Für geringer belastete, unbeschädigte und unverkrümmte Innenplatten konnte mit dem oben genannten Wert eine ausreichende Sicherheit von 4,85 nachgewiesen werden. Selbst unter Anwendung des nachträglich ermittelten absoluten Mindestwertes von 2,7 MPa aus Göttingen ergab sich hier noch eine Sicherheit von mehr als zwei. Diesen Grenzwert als maßgebend für die gesamte Fassade anzusetzen, erschien jedoch zu konservativ, zumal aufgrund der Rechteckform der Fassadenplatten die größeren Biegespannungen in der tragfähigeren Richtung verlaufen.

Im Gegensatz zu den Versuchen in Göttingen schnitten bei den Tests an der Universität Karlsruhe verformte Randplatten gegenüber unverformten Platten deutlich schlechter ab und hatten eine um ca. 40 % reduzierte Biegezugfestigkeit von ca. 3,5 MPa. Für die endgültige Entscheidung wurde aus Sicherheitsgründen ein Verbleiben dieser Platten im Randbereich der Fassade bei einer rechnerischen Sicherheit von nur 1,44 ausgeschlossen.

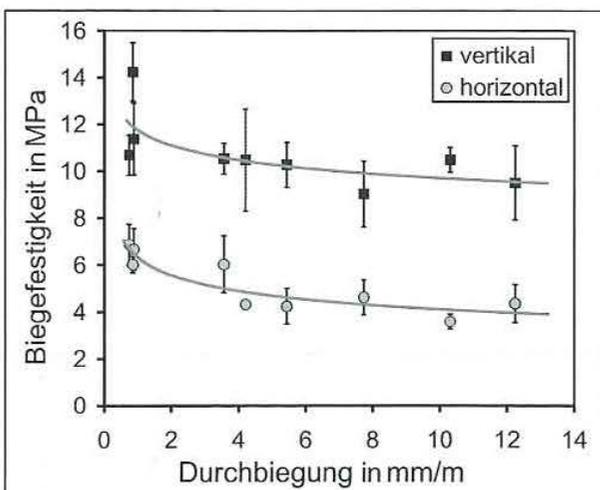


Bild 9: Biegefestigkeit in Abhängigkeit von der Verbiegung

Die Prüfwerte und statistischen Kennwerte der einzelnen Platten sind aus den Tabellen 1 und 2 ersichtlich. Die ermittelten Biegefestigkeiten als Funktion der Durchbiegung sind in Bild 9 dargestellt. Die Biegefestigkeit wurde jeweils in X- und in Y-Richtung bestimmt.

2.2.4 Ankerdornausbruchlast

Die Versuche der Universität Karlsruhe zur Ermittlung der Ankerdornausbruchlast wurden an eingebauten Platten vor Ort durchgeführt (Bild 10). Dabei wurden 11 Belastungsversuche an unverformten und 5 an verformten Platten vorgenommen. Die Aufhängungsart der Fassadenelemente wurde visuell in Hinblick auf ihre Konstruktion untersucht.

Bei diesen Versuchen vor Ort zur Feststellung der Ankertragfähigkeiten wurde soweit möglich zerstörungsfrei gearbeitet, d. h., die Ankerdorne wurden nicht grundsätzlich bis zum Bruch belastet, sondern nur bis zum dreifachen Wert der Belastung, die auf eine 1 m · 1,6 m große Randplatte im Bereich < 20 m über GOK einwirkt. Dies entspricht dem unteren Erwartungswert der Festigkeit, die die DIN 18516 für hinterlüftete Außenwandbekleidungen fordert. Ausgehend von der Vermutung bzw. Hoffnung, dass die vorhandenen Festigkeiten i. d. R. die erforderlichen übersteigen, war damit sichergestellt, dass nicht alle Beprobungen zum Ankerdornausbruch führten.

Neben zwei ausgebrochenen Platten erreichten 80 % der Platten die von der DIN 18516 geforderte dreifache Sicherheit direkt ohne Bruch. Weitere zerstörende Prüfungen an der Universität Göttingen zeigten wiederum nur geringe Abhängigkeit der Bruchlasten vom Grad der Verbiegung (Tabelle 2), was auf die Heterogenität des Marmors zurückzuführen ist. Das würde auch die hohe Streuung von



Bild 10: Zerstörungsfreie Ermittlung der Ankerdornausbruchlast (bzw. der Ankertragfähigkeit) auf der Baustelle

Einzelwerten erklären, wobei Variationskoeffizienten von bis zu 20 % beim Ausbruchlastversuch noch durchaus als normal zu betrachten sind.

Im Gegensatz zu den Biegeversuchen, bei denen durch entsprechende Präparation der Probekörper der Einfluss der Richtung der Spannungen bezogen auf die Strukturierung des Gesteins ermittelt werden konnte, liefert der Ankerdornausbruchversuch nur eine Lastgröße. Aus dieser kann nicht auf eine Zugfestigkeit des Materials geschlossen werden, weil es sich im Bereich des Ankers um einen komplexen dreidimensionalen Spannungszustand handelt.

2.2.5 Laboruntersuchungen zur Verwitterungsanfälligkeit – Materialentfestigung

Mit einem Verwitterungssimulationsversuch („Biegeversuch“) wurden die Witterungsbedingungen am Bauwerk, die letztlich zur Verformung und ggf. Entfestigung des Fassadenmarmors führen, in extremer Weise im Labormaßstab simuliert (Bild 11). 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. Entsprechende Versuchsapparaturen wurden unter Beteiligung der Arbeitsgruppe von Prof. S. Siegesmund im Rahmen eines EU-Projektes weiterentwickelt (siehe z. B. Koch und Siegesmund 2002, Koch und Siegesmund 2004 oder Siegesmund et al. 2008, Siegesmund und Grellk 2008). Es befinden sich entsprechende europäische

Normen in Vorbereitung, die solche Untersuchungen in Zukunft zwingend vorschreiben werden. Zu diesem Zweck wurden aus demontierten Fassadenplatten des Staatstheaters Darmstadt jeweils zwei Probekörper der Größe 400 mm × 100 mm × 30 mm in X- und in Y-Richtung herauspräpariert und getestet. Die Probekörper lagen während der Versuchsdurchführung auf einem mm-dicken Wasserfilm und wurden von oben mit Hilfe einer Heizmatte in 3 cm Entfernung zyklisch bestrahlt (Bild 11). Ein Zyklus umfasste eine Heizphase von 6 Stunden, in denen die Temperatur auf der Plattenoberfläche von Raumtemperatur (21 °C bis 24 °C) auf 80 °C anstieg, und eine Abkühlphase von etwa 18 Stunden, sodass ein Heizzyklus pro Tag gefahren werden konnte.

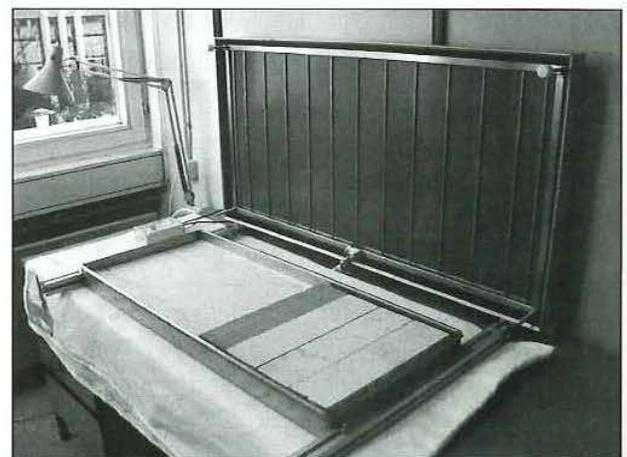


Bild 11: Verwitterungssimulationsversuch: Apparatur zum Biegeversuch. Der Deckel mit der Heizmatte rechts oben im Bild wird während der Heizphase herunter geklappt (Universität Göttingen).

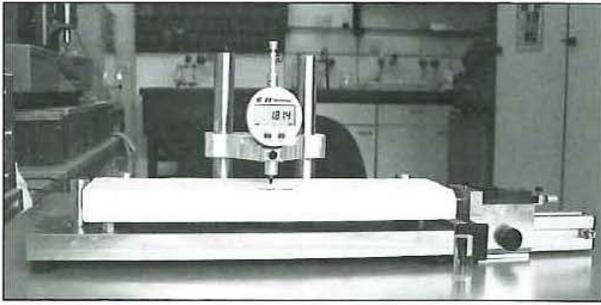


Bild 12: Messbrücke zur Erfassung der Veränderung der Probekörper in der Durchbiegung und der Längsdehnung (Universität Göttingen)

Die Veränderung der Durchbiegung der Probekörper wurde mit einer Messbrücke (Bild 12) mit einer Ablesegenauigkeit von $\pm 1 \mu\text{m}/35 \text{ cm}$ erfasst. Insgesamt wurden 40 Heizzyklen durchgeführt. Der Biegeversuch soll zeigen, wie sich das Fassadenmaterial unter fortdauernder Beanspruchung durch künstliche Verwitterung (d. h. in Abhängigkeit von Feuchte und Temperatur) verhält, um Informationen zum Schädigungspotenzial und somit erste Anhaltspunkte zur Langzeitstabilität des Marmors am Gebäude zu erhalten. Im Ergebnis zeigt sich der Marmor („Rosa Estremoz“) zunächst nur wenig verwitterungsanfällig, die dauerhafte Expansion unter Feuchteinfluss ist schwach ausgeprägt, so dass nicht zu befürchten ist, dass Dehnungsfugen zwischen den Platten in absehbarer Zeit geschlossen werden und so zu Zwängungen in den Platten führen. Die Rissporosität hat sich zwar mit zunehmender Durchbiegung deutlich erhöht. Es konnte nur eine schwache Korrelation zwischen dem Grad der Verbiegung und der Reduktion der Gesteinsfestigkeit festgestellt werden. Die vor Ort an jeder Platte messbare Durchbiegung eignet sich also nicht als Indikator für die Materialentfestigung. Die Veränderung der gesteintechnischen Werte nach künstlicher Verwitterung zeigt ein moderates Entfestigungspotenzial auf. Platten mit hoher Verbiegung behalten eine hohe Verbiegungrate bei, die mit einer Erhöhung der Rissporosität verbunden ist. Durchbiegungen $> 8 \text{ mm/m}$ sind in dieser Hinsicht als kritisch zu betrachten (s. z. B. Siegesmund et al. 2008).

2.2.6 Progressive Verbiegung unter künstlicher Verwitterung

Aus den künstlich weiter verwitterten Probekörpern aus dem Biegeversuch wurden jeweils zwei Prüfkörper ($180 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$) für die Bestimmung der Biegefestigkeiten und ein Prüfkörper ($220 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$) für die Analyse der Ausbruchlasten am Ankerdorn präpariert. Letztere sind kleiner als in der DIN EN 13364 vorgesehen und wurden daher nur mit drei Ankerdornen versehen. Es sollte das Entfestigungspotenzial bestimmt werden. Nach thermo-hygrischer Beanspruchung

von 40 Zyklen im Biegeversuch zeigt das Material eine moderate Entfestigung. Die Biegefestigkeit in X-Richtung nimmt zwischen 5 % (P1-Durchbiegung von $0,7 \text{ mm/m}$) und 30 % (P3-Durchbiegung von $5,4 \text{ mm/m}$) ab. Die Ausbruchlast am Ankerdornloch reduziert sich etwas stärker mit einer relativen Abnahme zwischen 11 % (P5-Durchbiegung von $10,3 \text{ mm/m}$) und 28 % (P3-Durchbiegung von $5,4 \text{ mm/m}$). Hier zeigt sich, dass Platten mit hoher initialer Ankerausbruchfestigkeit auch eine hohe Reduktion dieses Wertes widerfährt und umgekehrt. So musste von den Prüfingenieuren und Tragwerksplanern entschieden werden, ob gegebenenfalls Biegezugfestigkeiten von $2,68 \text{ MPa}$ oder $2,94 \text{ MPa}$ oder Ausbruchlasten am Ankerdorn von $1,13 \text{ MPa}$ oder $2,09 \text{ MPa}$ systemkritisch wären.

3 Beurteilung der Standsicherheit

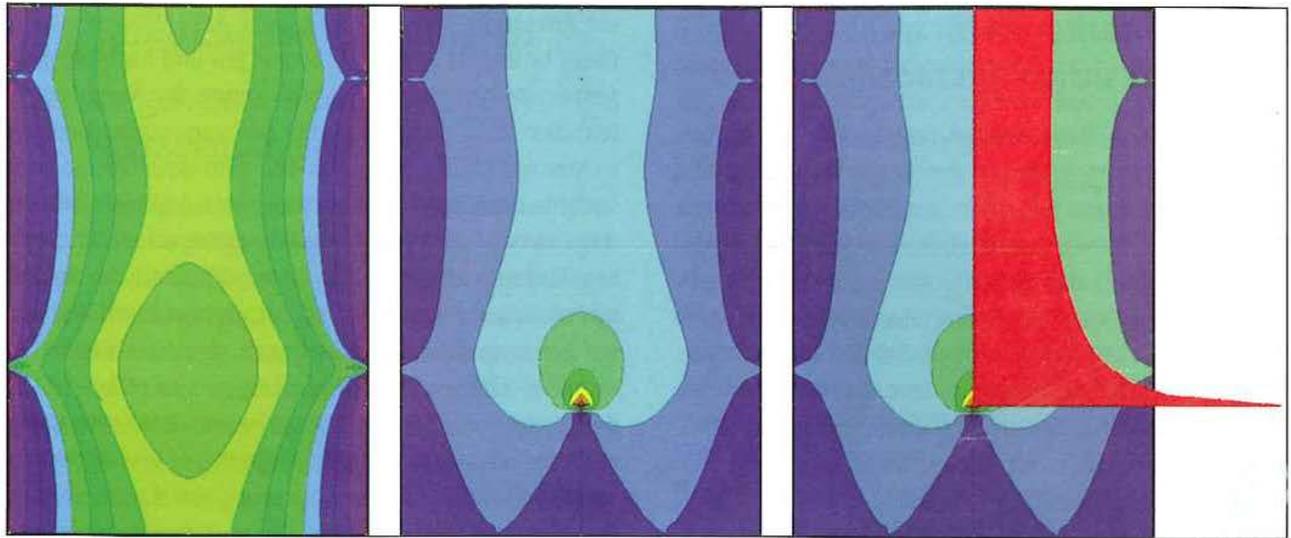
3.1 Ermittlung kritischer Risslängen anhand von FE-Berechnungen

Mit den Erkenntnissen aus den Versuchen der Universität Göttingen lagen zunächst Kennwerte aus ungestörten Probekörpern vor. Auf der Basis der erarbeiteten Schadenskataloge der Universität Göttingen war es das Ziel, kritische Risslängen bei unterschiedlichen Erscheinungsbildern zu ermitteln, um dann anhand einer erneuten visuellen Beurteilung aller Fassadenplatten eine Bewertung vornehmen und damit auf einfache Weise eine Entscheidung herbeiführen zu können, welche Platten vorerst, d. h. im gegenwärtigen Zustand, erhalten werden konnten. Diese Vorgehensweise wurde vor allem auch für eine zukünftige Überprüfung der Fassade festgelegt, sodass die Sanierung abschnittsweise auf eine längere Periode verteilt vorgenommen werden konnte. Ziel war, nur die gefährdeten Platten abzunehmen und durch neue zu ersetzen und nach einer gewissen Zeit nach fortschreitender Schädigung weiterer Platten erneut einen Teil der Platten auszutauschen.

Grundlage für die Ermittlung kritischer Risslängen bildeten Berechnungen nach der Methode der Finiten Elemente mit feiner Elementunterteilung im kritischen Bereich (Bild 13). Maßgebend waren große Platten (ca. $1,5 \text{ m}^2$), die unter Berücksichtigung der vorhandenen Lagerungsart und der maximal nach DIN 1055-1 einwirkenden Belastungen berechnet wurden.

3.2 Sicherheitsbeiwerte für verformte und unverformte Platten

Die Festlegung der kritischen Risslängen erfolgte in Abstimmung mit dem Prüfingenieur und dem Bauherrn so,



a) horizontale Biegezugspannungen ohne Riss

b) horizontale Biegezugspannungen mit Riss

c) Schnitt durch die Spannungsspitze

Bild 13: FEM-Berechnungen (Professor Pfeifer und Partner) für große Platten (1,0 m × 1,5 m) mit vertikalem Riss am unteren Plattenrand unter Windbelastung

Tabelle 3: Auswertung der Spannungsanalysen nach FE-Rechnung für eine Risslänge außerhalb des zulässigen Bereichs

Spannungen	ungerissene Platte	vert. Riss oben Mitte	vert. Riss Mitte Mitte	vert. Riss unten Mitte	hor. Riss Mitte außen
horizontal an Plattenoberseite	0,06	0,06	0,06	0,19	0,06
horizontal an Plattenunterseite	0,73	2,54	1,58	2,68	1,08
vertikal an Plattenoberseite	1,51	1,50	1,47	1,31	1,55
vertikal an Plattenunterseite	0,38	0,38	0,30	0,41	0,99

Sicherheitsbeiwerte bei ungeschüsselten Platten:

Spannungen	ungerissene Platte	vert. Riss oben Mitte	vert. Riss Mitte Mitte	vert. Riss unten Mitte	hor. Riss Mitte außen
horizontal an Plattenoberseite	97,7	97,7	97,7	30,8	97,7
horizontal an Plattenunterseite	8,0	2,3	3,7	2,2	5,4
vertikal an Plattenoberseite	3,9	3,9	4,0	4,5	3,8
vertikal an Plattenunterseite	15,4	15,4	19,5	14,3	5,9

Sicherheitsbeiwerte bei geschüsselten Platten:

Spannungen	ungerissene Platte	vert. Riss oben Mitte	vert. Riss Mitte Mitte	vert. Riss unten Mitte	hor. Riss Mitte außen
horizontal an Plattenoberseite	58,0	58,0	97,7	18,3	58,0
horizontal an Plattenunterseite	4,8	1,4	2,2	1,3	3,2
vertikal an Plattenoberseite	2,3	2,3	2,4	2,7	2,2
vertikal an Plattenunterseite	9,2	9,2	11,6	8,5	3,5

dass auch an der Risspitze noch eine ausreichende rechnerische Sicherheit gegenüber den experimentell ermittelten Biegezugfestigkeiten vorlag.

Tabelle 3 zeigt beispielhaft die Auswertung von Berechnungen mit einer bestimmten Risslänge und den damit einhergehenden Spannungen am Riss. In diesem Beispiel ergab sich rechnerisch bei einem vertikalen Riss in der

Mitte des oberen Plattenrandes eine maximale Spannungsspitze von 2,54 MPa, was mit dem festgelegten Grenzwert der unverformten Platte von 5,86 MPa eine rechnerische Sicherheit von 2,3 und mit dem Grenzwert für die verformte Platte von nur noch 1,4 ergeben hätte. Die hierbei angenommene Risslänge lag demnach außerhalb des zulässigen Bereichs.

3.3 Grenzkriterien für nicht standsichere Fassadenplatten

Die Platten des Staatstheaters zeigen ein weites Verbiegungsspektrum, wobei in der Gesamtheit, über alle vermessenen Fassadenplatten gemittelt, Verbiegungen auftreten, die konkav und konvex sein können (Siegesmund et al. 2008). Die Werte von konkaven Verbiegungen variieren um -2 mm/m, wobei vereinzelt maximale Werte von -4 mm/m beobachtet werden. Bei den konvexen Verbiegungen ist eine vergleichbare Tendenz zu beobachten, obwohl im Durchschnitt etwas höhere Verbiegungswerte beobachtet werden. Es ist keine eindeutige Tendenz zwischen Verbiegungsgrad und Exposition zu beobachten. Dies trifft im Übrigen auch für die Beziehung Verbiegungsgrad/Gebäudehöhe zu.

Im Vergleich zu anderen Gebäuden, die Verbiegungen von Marmorplatten (s. z. B. Diskussion in Siegesmund et al. 2008, Siegesmund und Grell 2008) aufweisen, ist für die Fassade des Staatstheaters Darmstadt eine weitreichende Entfestigung durch Rissbildungen evident.

Der bei diesem Projekt verwendete Biegetest stellt eine hilfreiche Untersuchungsmethode dar, die es erlauben soll, 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. 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 Bedingungen 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. 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 Verbiegungspotenzial sowohl im Labor als auch an der Fassade schwach verformen.

Aus dem Experiment kann zunächst festgestellt werden, dass die Durchbiegung bei den schwach verbogenen Platten P1 (Durchbiegung von $0,07$ mm/m) und P2 (Durchbiegung von $0,9$ mm/m) nach wenigen Zyklen zum Stillstand kommt. Bei den stark verbogenen Platten (Platten mit Durchbiegungen von 10 mm/m) werden die höchsten Zuwachsraten in Abhängigkeit von den Belastungszyklen (mit minimalen Biegefestigkeiten von $2,68$ MPa oder $2,94$ MPa oder Ausbruchslasten

am Ankerdorn von $1,13$ MPa oder $2,09$ MPa) ermittelt. Diese Untersuchungen (Verbiegungen und nachfolgende gesteintechnische Prüfungen) gelten für Marmorplatten des Rosa Estremoz, die frei von makroskopisch sichtbaren Rissen sind. Aus den sehr detaillierten Fassadenkartierungen hat sich allerdings ergeben (Bild 7), dass neben der Verbiegung vor allem die Ausbildung von Rissen kritisch für die Standsicherheit der Fassade ist. Es konnte gezeigt werden, dass sehr oft Platten, welche so gut wie nicht verbogen sind, von Besorgnis erregend offenen Rissen durchzogen sind. Das spricht dafür, dass die Spannungen, die mit der Verbiegung einhergehen würden, durch progressives Risswachstum abgebaut werden und sich nicht a priori durch extreme Verbiegungen ausdrücken. Dies wiederum bedeutet, dass die o. g. gesteintechnischen Eigenschaften nicht als Grenzfestigkeiten anzusehen sind. Deshalb wurde die Messung von Biegezugfestigkeiten an bereits deutlich rissgeschädigten Platten nachträglich ausgeführt. An diesen Platten wurden auch Biegefestigkeiten nach DIN EN 12372 ermittelt. Bei verschiedenen Proben, die durch deutliche Querrisse charakterisiert waren, war es unmöglich, entsprechende Standardprüfkörper herzustellen, da diese bereits bei der Präparation – also beim Sägen – durchgebrochen sind. Das heißt, dass diese Prüfkörper sehr geringe Festigkeiten hatten.

Nach den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen vor Ort und im Labor, auf der Basis visueller Schadensbeurteilungen und auf Basis der durchgeführten rechnerischen Untersuchungen wurden schließlich vom Bauherrn und dem Prüflingenieur Kriterien aufgestellt, die als Grenze der Standsicherheit definiert wurden und als Maßstab für die Entfernung von Fassadenplatten und deren Ersatz herangezogen wurden.

Kriterien für eine Abhängung waren im Einzelnen:

- Randplatten (2 Platten vom jeweiligen Fassadenrand entfernt) mit einem Verformungsgrad > 5 mm/m
- alle gerissenen Randplatten
- Platten mit Rissen oder Ausbrüchen im Ankerdornbereich
- erkennbare Risse mit mehr als 30 cm Länge. Die gegenüber Längsrissen (s. o.) kritischeren Querrisse sind in ihrer Länge aufzudaddieren, wenn sie „nahe“ beieinander liegen (ca. 5 cm)
- Innenplatten bei einem Verformungsgrad > 15 mm/m
- starke Rückverwitterung (gemäß der Kartierung der Uni Göttingen). Diese korreliert oft mit Rissen, deren Resttragfähigkeit nicht beurteilt werden kann.

4 Handlungsempfehlungen

4.1 Vorgehensweise bei der Fassadensanierung

Anhand der oben dargestellten leicht zu prüfenden Kriterien und der vorgelegten Detailkartierungen der Arbeitsgruppe von Prof. S. Siegesmund konnten Tragwerksplaner und Prüfsingenieur nach Gerüststellung innerhalb von ca. 4 Stunden die gesamte Nordfassade des Theaters mit ca. 1650 Platten abarbeiten, beurteilen und mittels Markierung vor Ort die Grundlage für den zeitnahen Austausch bieten. Im Ergebnis wurden ca. 8 % der Platten der Nordfassade als kritisch eingestuft. Witterungsbedingt stärker geschädigt waren die Süd- und vor allem die Westseite der Fassade. Insgesamt mussten ca. 10 % der Fassadenfläche aus Standsicherheitsgründen anhand der aufgestellten Kriterien ausgetauscht werden.

Wie eingangs erwähnt, stand das gesamte Projekt unter hohem Kosten- und Zeitdruck. Ein vollständiger Rück- und Neubau der Fassade schied aus Kostengründen aus. Unter Berücksichtigung der hier dargestellten Ergebnisse wurde eine sukzessive Sanierung über einen längeren Zeitraum hinweg vorgesehen. Anhand der erarbeiteten Kriterien konnten die Maßnahmen zunächst auf eine Fläche von ca. 10 % der Fassade beschränkt werden. Von dem beauftragten Ingenieurbüro wurde schließlich die folgende Vorgehensweise empfohlen:

- Findung der kritischen Plattenbereiche aus der Sicht der Verkehrssicherheit

Nach Forschungen von Prof. Dr. Stein von der Universität Wageningen/NL, Institut für Geologie und Bodenkunde, ist bei Natursteinfassaden davon auszugehen, dass diese im Versagensfall selbst bei Bemessungssturm nahezu senkrecht nach unten fallen. In Plattenstirnflächen durch Ankerdorne gehaltene Platten kippen im ungünstigsten Fall von der vertikalen in die horizontale Lage und fallen dann mit geringem Abstand zur Gebäudeaußenkante senkrecht nach unten. Sofern sich in einem Bereich von 2,0 m zur Gebäudeaußenkante ein Verkehrsweg befindet, sind die darüber befindlichen Platten, die die o. g. Kriterien nicht erfüllen, zu entfernen. Als unkritisch wären demnach die Platten zu bezeichnen, die nicht auf Verkehrswege fallen können und etwa im Bereich von nicht begehbaren Flachdächern (Seitenbühnen, Verwaltungstrakt etc.) oder erhöhten Pflanzbereichen liegen. Ausgenommen hiervon sind niedrige Pflanzbereiche, die von spielenden Kindern als Versteck benutzt werden können. Als bedingt kritisch können Bereiche angesehen werden, die nur im Ausnahmefall als Verkehrswege dienen, z. B. Fluchtwege, die nur durch einseitig zu öffnende Türen im Katastrophenfall betreten werden können. Dieser Einschätzung liegt die Über-

legung zu Grunde, dass zwei Katastrophenfälle, Brand und maximaler Bemessungswind mit Bruch von Fassadenplatten, mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit nicht gleichzeitig auftreten. Ausgenommen von dieser Argumentation sind Platten, die durch starke Rissbildung so weit vorgeschädigt sind, dass eine Zerstörung auch ohne Wind eintreten kann. Die Ergebnisse dieser Einstufung werden farblich für alle Fassadenflächen dargestellt, wobei Rot für kritische Bereiche, Gelb für bedingt kritische Bereiche und Grün für unkritische Bereiche steht.

- Vorgehensweise für die kritischen (roten) Bereiche: kurzfristig

Die Fassade wird, wie oben beschrieben, so eingerüstet, dass sie aus der Nähe komplett besichtigt und beurteilt werden kann. Dabei sollen alle Platten mit Schädigungen oder Merkmalen, die außerhalb der zulässigen Grenzen liegen, markiert und kurzfristig abgenommen werden. Die Beurteilung erfolgt visuell durch Feststellung von sichtbaren Rissen, Anrissen und von vorn erkennbaren Strukturschwächungen sowie durch Messung der Risslängen und des Verformungsgrades mit einem einfachen Biegemeter (siehe z. B. Siegesmund et al. 2007 oder Siegesmund und Grell 2008).

- Vorgehensweise für die bedingt kritischen (gelben) und unkritischen (grünen) Bereiche: kurzfristig

In den unkritischen Bereichen sollten nur gegebenenfalls vorhandene Fassadenplatten mit sehr starker sichtbarer Rissbildung (z. B. im Ankerdornbereich oder auf der Oberseite durchgehende Längs- oder Querrisse), die eine baldige völlige Zerstörung und Herabfallen mit einem damit verbundenen optischen Problem erwarten lassen, entfernt werden. Eine Anwendung der o. g. Kriterien ist jedoch nicht erforderlich.

- Weitere Handlungsempfehlungen: mittel- und langfristig

Auf der Basis unserer Untersuchungen (Schadenskartierungen und Gesteinsuntersuchungen) ist unzweifelhaft festzustellen, dass die Fassadenplatten hinsichtlich ihrer Verwölbungen überraschend geringere Verbiegungswerte aufweisen, verglichen mit gleichartigen Fassaden. Allerdings ist das Schadenspotenzial durch die intensiven Risschädigungen als kritisch für die Standsicherheit einzuschätzen. Grenzkriterien hierfür wurden von den Tragwerksplanern und Prüfstatikern festgelegt. Für ein durchzuführendes Monitoring in der Zukunft ist besonders das fortschreitende Risswachstum zu berücksichtigen. Es ist davon auszugehen, dass, im Gegensatz zu anderen Marmorarten, der Rosa Estremoz des Staatstheaters Darmstadt nicht durch deutliches Verbiegen, sondern durch Risswachstum und Rissbildung entfestigt. Mittel- und langfristig ist eine weitere Untersuchung der Fassade, z. B. in zweijährigem Turnus, in ausgewählten Teilbereichen

vorzunehmen. Neben der weiteren Beobachtung der verformten und vorgeschädigten Platten zur Erforschung der Schadensentwicklung sollte je Himmelsrichtung ein gut



Bilder 14 und 15: Marmorfassade nach der Sanierung mit Messingplatten

zugänglicher, gut einrüstbarer und repräsentativer Fassadenbereich ausgewählt werden, der mindestens drei vertikale Fassadenreihen von oben nach unten erfasst.

4.2 Ausführung

Die Fassadensanierung wurde nach den oben angegebenen Kriterien und der geschilderten Vorgehensweise durchgeführt. Es blieb lediglich die Frage offen, wodurch die abgenommenen Fassadenplatten ersetzt werden sollten.

Nachdem aufgrund der Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen Marmor als Austauschmaterial ausschied, wurden verschiedene geeignete Materialien an Musterflächen für den Austausch einzelner Platten untersucht.

Auf Vorschlag des Architekten wurden schließlich 2 mm starke, gekantete Messingplatten ausgewählt (Bilder 14, 15 und 16).

Sämtliche Plattenabhängungen sowie die Aufhängung der neuen Messingpaneele wurden im Herbst 2006 abgeschlossen. Die „neue“ Fassade mit ihrem Patchwork-Charakter hat schnell die Zustimmung nicht nur der Theaterbesucher gefunden.



Abb 16: Marmorfassade Nordseite nach der Sanierung mit Messingplatten, neues Eingangsbauwerk aus weißem Sichtbeton rechts

5 Literatur

- [1] Pfeifer, M., Universität Karlsruhe, Institut für Tragkonstruktionen: Bericht zur Bestandsuntersuchung des Staatstheaters Darmstadt, 11/2001
- [2] Wittenbecher, R., Professor Pfeifer und Partner: Visuelle Schadensuntersuchung an den Platten der Marmorfassade des Staatstheaters Darmstadt, 01/2002
- [3] Grimm, W. D., 1999. Beobachtungen und Überlegungen zur Verformung von Marmorobjekten durch Gefügauflockerung. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft* 150/2, S. 195–236
- [4] Siegesmund, S., Koch, A. & J. Ruedrich, 2007. Ursachen mangelnder Formbeständigkeit von Fassadenplatten: Fallstudie Universitätsbibliothek der Universität Göttingen. *Z. dt. Ges. Geowiss.*, 158/3: S. 630–648
- [5] S. Siegesmund, J. Rüdrieh & A. Koch, 2008. Marble Bowing: Comparative studies of different public building facades. In: S. Siegesmund, R. Snethlage & J. Ruedrich: Monumental future: climate change, air pollution, stone decay and conservation. *Environmental Geology* 56: 473–494. (DOI10.1007/s00254-008-1307-z)
- [6] S. Siegesmund & B. Grelk, 2008. Das Marmor-Problem. *Naturstein* 9: S. 96–101
- [7] Siegesmund, S., T. Weiß, A. Vollbrecht & K. Ullemeyer, 1999. Marble as a natural building stone: rock fabrics, physical and mechanical properties. *Z. d. Deut. Geol. Ges.* 150 (2): 237–258
- [8] Siegesmund, S., Ullemeyer, Weiß, T., & E. Tschegg, 2000. Physical weathering of marbles caused by anisotropic thermal expansion. *Int. Journ Earth Sciences* 89: 170–182
- [9] Koch, A. & Siegesmund, S. On site damage analysis of buildings showing bowing of marble slabs: Fabric vs. type and degree of damage. *Geol. Soc. Spec. Publ.* 205: 298–314
- [10] 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
- [11] Koch, A. & S. Siegesmund, 2004. The combined effect of moisture and temperature on the anomalous behaviour of marbles. *Environmental Geology* 46/3-4: 350–363
- [12] Zeisig, A., Siegesmund, S. & T. Weiss, 2002. Thermal expansion and its control on the durability of marbles. *Geol. Soc. Spec. Publ.* 205: 64–79
- [13] Weiss, T., S. Siegesmund & E. Fuller jr. 2002. Microstructure-based finite element modelling of microcrack formation in marbles. *Geol. Soc. Spec. Publ.* 205: 88–101
- [14] Weiss, T., Siegesmund, S. & E. Fuller, 2003. Thermal degradation of marbles: Indications from finite element modelling. *Building and Environments* 38: 1251–1260
- [15] Siegesmund, S., Kracke, T., Ruedrich, J. & R. Schwarzbürg. Jewish cemetery in Hamburg Altona (Germany). State of marble deterioration and provenance. *Eng. Geology* (in press)
- [16] Ruedrich, J., Rieffel, Y., Pirskawetz, St. Alpermann, A., U. Joksch, U., Gengnagel, C., Weise, F., Plagge, R., Zhao, J. & S. Siegesmund. Development and assessment of protective winter covers for marble statues of the Schlossbrücke, Berlin (Germany). *Environmental Earth Science*
- [17] Nordtest Method NT BUILD 499. 2002. Cladding Panels: Test for Bowing. Nordtest project 1443-99/1

Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim Hessischen Staatshochbauamt für die Publikationsgenehmigung. S. Siegesmund bedankt sich bei seinen Mitarbeitern, und zwar bei T. Weiss, A. Koch, J. Ruedrich und St. Mosch für die Unterstützung.

Bildnachweis:

Bilder 1 bis 13: Professor Pfeifer und Partner, Institut für Tragkonstruktionen der Uni Karlsruhe, Arbeitsgruppe Prof. S. Siegesmund