Restaurierung antiker Tempel: Experimentelle Untersuchungen zum Ausziehverhalten von Verankerungen im Marmor

Bei der Restaurierung antiker griechischer Tempel werden einzelne Marmorblöcke zu einem Bauteil, beispielsweise einem Architrav, zusammengebaut. Wegen der Forderung nach Reversibilität der Eingriffe erfolgt dies an der Akropolis von Athen durch Anwendung von in Zementmörtel eingelassenen Titanstäben mit Gewinde in vorgebohrten Löchern. Diese Art der Restaurierung entspricht einer Teilsanierung der Architrave. Im hier vorliegenden Beitrag werden experimentelle Untersuchungen zum Ausziehverhalten dieser Verankerungsstäbe vorgestellt. Die Versuche werden an einer speziell entworfenen Versuchsanordnung durchgeführt. Das Versagen erfolgt bei allen Versuchen an der Grenzfläche zwischen Mörtel und Bohrlochwand. Es zeigt sich, dass die Gewindeform das Tragverhalten entscheidend beeinflusst. Ferner werden mögliche Grenzzustände definiert.

Restoration of antique temples: Experimental investigations on the pull-out behaviour of anchors in marble. In restoration works of antique Greek temples individual marble blocks are connected together to form a single element, e. g. an architrave. Due to the demand of reversibility of the intervention, this is done in the Acropolis of Athens by means of titanium threaded bars that are inserted in the marble, in predrilled holes filled with cement mortar. This way of restoration corresponds to a partial rehabilitation of the architraves. This paper presents experimental investigations on the pull-out behaviour of such anchors. The tests are performed in specially designed equipment. Failure takes place for all tests in the interface between the mortar and the marble. It has been shown that the form of the thread influences considerably the carrying capacity. Possible limit states are introduced.

ken gehören antike griechische Tempel, die im heutigen Zustand oft nicht mehr als aus Einzelsäulen, den daraufliegenden Architraven und den Metopen bestehen, während eine große Anzahl einzelner, teilweise gebrochener Marmorsteine als Teile des ursprünglichen Bauwerks im Umfeld liegen (Bild 1).

Für die Erhaltung und Restaurierung dieser jahrtausendalten Monumente sind mehrere Teilprobleme zu lösen, zu denen die Gewährleistung der Tragsicherheit, der Gebrauchstauglichkeit und der Dauerhaftigkeit des Monuments gehören. Eins davon ist der Zusammenbau einzelner Marmorblöcke zu einem Bauteil, wie beispielsweise einem Architrav (Bild 1). Die Anwendung von Klebern oder Epoxidharzen scheidet dabei wegen der Forderung nach Reversibilität aus.

1 Problemstellung

Die Planung und Ausführung struktureller Eingriffe in Bauwerke des Kulturerbes unterliegen keinen normativen Baubestimmungen, sind jedoch spezialisierte interdisziplinäre Aufgaben, an die extrem hohe Anforderungen gestellt werden. Die ergeben sich aus den in der Charta von Venedig [1] formulierten Prinzipien, den speziellen Eigenschaften des Tragsystems, der Art der Baustoffe und dem Erhaltungszustand des Monuments. Die übliche Kriterien von gewöhnlichen Baumaßnahmen wie Zeit und Geld spielen dabei keine wichtige Rolle, wohl aber andere und teilweise widersprüchliche, wie die Erhaltung des ursprünglichen Systems, der geringste Eingriff und die Reversibilität der Maßnahmen. Zu diesen Bauwer-



Bild 1. Restaurierungsarbeiten an der Akropolis Athen Fig. 1. Restoration works on the Acropolis Athens

Daher wurde bei der Restaurierung der Monumente an der Akropolis von Athen schon in den 1980-er Jahren eine innovative Methode, durch Anwendung von in Zementmörtel eingelassenen Titanstäben mit Gewinde in vorgebohrten Löchern in den Steinen, entwickelt (Bild 2) [2] bis [5].

Die Dimensionierung der Verbindungsstäbe erfolgte unter den Annahmen elastischen Verhaltens, isotroper Materialeigenschaften, Ebenbleiben der Querschnitte, vernachlässigbarer Zugfestigkeit des Mörtels und Verformungskompatibilität zwischen Zugstab und Marmor [6], [7]. Das Bemessungsmoment wird dabei als das aus der Belastung nach der Restaurierung erzeugte Moment bestimmt. Dieser Vorgang entspricht einer Teilrehabilitierung. Bei einer vollen Rehabilitierung ist das Bemessungsmoment größer, gleich dem Moment, bei dem die Zugfestigkeit des intakten Marmors erreicht wird.



Bild 2. Zusammenbau von Marmorblöcken mit Gewindestangen aus Titan Fig. 2. Connection of marble blocks with threaded titanium bars

Die Interventionsprinzipien fordern die Vermeidung des Abtrags großer Mengen vom authentischen Material durch die Bohrungen und daher die Begrenzung, so weit wie möglich, der Anzahl, der Abmessungen und der Verankerungstiefe der Verbindungsstäbe. Hinzu kommt, dass die üblicherweise angewandte Verankerungslänge 25 d (d Stabdurchmesser), wenn die Steinteile zu klein sind, nicht realisierbar ist. Entscheidender Faktor dabei ist das Ausziehverhalten des Systems Marmor - Zementmörtel -Verbindungsstab, ohne dass der Marmor bricht. Trotz der offensichtlichen Bedeutung dieses Sachverhalts fehlt in der internationalen Forschung seine systematische Untersuchung, bei der die angesprochenen theoretischen Ansätze für Ausziehnachgiebigkeit und -festigkeit wegen der angenommenen Verformungskompatibilität zwischen Ankersstäben und Marmor als unendlich groß angenommen werden. Experimentelle Untersuchungen [23], [24] an einer genauen Replik des aus mehreren Steinen zusammengesetzten fünften äußeren Architravs der nördlichen Säulenreihe des Parthenon im Maßstab 1:2 (Bild 3) zeigen, dass diese Annahme nicht zutrifft. Bild 4 stellt die experimentell ermittelte Last-Mittendurchbiegungs-Kurve des auf Sechs-Punkt-Biegung belasteten zusammengesetzten Modells dar. Die gestrichelten Linien zeigen die entsprechenden Kurven des intakten ungerissenen Steins, berechnet mit E-Modul gleich dem E-Modul des Marmors, bzw. 1/8 dieses Wertes. Man erkennt, dass die Anfangssteifigkeit des zusammengesetzten Modells etwa 1/8, die Beanspruchbarkeit etwa 25 % des intakten ungerissenen Steins beträgt. Eine volle Rehabilitierung kann also durch diese Technik nicht erzielt werden. Der nichlineare Kurvenverlauf infolge der Schlupfverformungen der Stäbe fängt sogar bei etwa 40 % der Traglast an.

Das Ausziehproblem ist für Bewehrungsstäbe im Beton [8] bis [14], Dübelanker im Beton [15], oder Kunstfaser im Beton [16] bis [19] experimentell und theoretisch ausführlich untersucht worden. Das Ausziehverhalten ist von Bedeutung auch in der Biomechanik, insbesondere bei der Anwendung von Schrauben zum Zusammenhalten von Wirbeln [20] bis [22].

In diesem Beitrag werden experimentelle Untersuchungen zum Ausziehverhalten von Gewindestangen im Marmor, nach der bei den Restaurierungsarbeiten an der Akropolis angewandten Technik, vorgestellt.

2 Versuchskörper

Die Ausziehkraft hängt von mehreren Parametern, wie der Verankerungstiefe, der Gewindegeometrie (Tiefe, Abstand und Neigung des Gewindes), den mechanischen Eigenschaften der Baustoffe (Marmor, Metallstab, Zementmörtel) und den Eigenschaften der Kontaktflächen ab. Die möglichen Versagensarten sind:

- Bruchversagen des Metallstabs
- Bruchversagen des Marmorkörpers
- Ausziehen des Stabs



Bild 3. Modell eines Architravs der Akropolis im Maßstab 1 : 2 unter Sechs-Punkt-Biegung [23], [24] Fig. 3. Model of an architrave of the Acropolis in scale 1 : 2 under six-point bending [23], [24]



Bild 4. Last-Mittendurchbiegungs-Kurve des intakten und des zusammengesetzten Modells nach Bild 3 Fig. 4. Load-deflection-curve of the continuous and the repaired model of fig. 3

St. Kourkoulis/St.-A. Papanicolopulos/A. Marinelli/I. Vayas · Restaurierung antiker Tempel: Experimentelle Untersuchungen zum Ausziehverhalten von Verankerungen im Marmor

Zur Untersuchung des Ausziehverhaltens wurde eine kleine Verankerungstiefe gewählt, so dass die beiden anderen Versagensarten nicht vorkommen. Ziel der experimentellen Untersuchung war, zum Zweck der Optimierung den Einfluss der Gewindegeometrie auf die Ausziehkraft zu bestimmen. Mit den Versuchen sollte das Ausziehverhalten von Einzelstäben untersucht werden, da in der Regel ihre Abstände ausreichend groß sind, so dass sie sich nicht gegenseitig beeinflussen.

Die Versuchskörper bestehen aus prismatischen Marmorblöcken quadratischer Grundfläche 80 mm \times 80 mm. Die Einführung der Stäbe erfolgte nach der bei der Akropolis angewandten Technik und wurde vom bei den Restaurierungsarbeiten beschäftigten Personal ausgeführt. Dazu werden in den Versuchskörper durch einen Diamantenbohrer Löcher Durchmessers 14 mm, etwas größer als der Außendurchmesser der Stäbe von 12 mm, gebohrt. Es entsteht ein relativ glattes Bohrloch, das mit Wasser gereinigt wird. Anschließend wird der Zementmörtel in das Loch gegossen (Bild 5). Zum Schluss wird der Gewindestab, solange der Mörtel noch flüssig ist, schraubenartig in das Loch eingeführt und in seiner Endposition, parallel zu den Längsseiten des Versuchskörpers, durch eine spezielle Vorrichtung bis zum Erhärten des Mörtels gehalten (Bild 6).

Wie eingangs erwähnt, sollte durch die Versuche der Einfluss der



Bild 6. Haltevorrichtung der Verankerungsstäbe Fig. 6. Set-up for restraining of the anchor bars

Gewindeform auf das Ausziehverhalten untersucht werden, der unabhängig vom Material der Stäbe ist. Daher wurde Baustahl höherer Festigkeit statt Titan als Material der Verankerungsstäbe gewählt. Das erfolgte aus Kostengründen und zur Vereinfachung des Gewindeschnitts, da die Gewindegeometrien nicht genormt sind. Die Versuchsparameter waren die Gewindesteigung und die Gewindetiefe, für die jeweils drei Werte untersucht wurden (Bild 7). Ihre Kombination ergibt $3 \times 3 = 9$ Gewindegeometrien, für die drei identische Versuche, also insgesamt $3 \times 9 = 27$ Versuche, durchzuführen waren. Die geometrischen Eigenschaften der Gewindestäbe sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Dort werden aus Vergleichsgründen die entsprechenden Werte des metrischen Gewindes wiedergegeben. Man erkennt, dass schließlich 25 statt 27 Versuche durchgeführt wurden. Die Verankerungslänge betrug 12,5 d, also halb so groß als die bei den Restaurierungsarbeiten verwendete. Zu Vergleichszwecken wurden zwei Versuche mit noch kleineren Verankerungslängen 9,2 d durchgeführt.



Bild 5. Versuchskörper und Eingießen des Zementmörtels Fig. 5. Test specimen and injection of the cement mortar



Bild 7. Parameter der Gewindegeometrie und Verankerungsstäbe Fig. 7. Parameters of the thread geometry and anchor bars



St. Kourkoulis/St.-A. Papanicolopulos/A. Marinelli/I. Vayas · Restaurierung antiker Tempel: Experimentelle Untersuchungen zum Ausziehverhalten von Verankerungen im Marmor

Tabelle 1. Geometrische Kennwerte der untersuchten Gewindestäbe und desmetrischen GewindesTable 1. Geometrical characteristics of the thread bars and metric thread

Nr. des Versuchs- körpers	Bezeichnung	Außen- durchmesser D _{ext} (mm)	Innen- durchmesser D _{int} (mm)	Gewinde- steigung (mm)	Anzahl der Versuchs- körper
1.	1.5-2	12	10,5	2	3
2.	1.5-3	12	10,5	3	2 + 1*
3.	1.5-4	12	10,5	4	3
4.	2.5-2	12	9,5	2	3
5.	2.5-3	12	9,5	3	2 + 1*
6.	2.5-4	12	9,5	4	3
7.	3.5-2	12	8,5	2	3
8.	3.5-3	12	8,5	3	3
9.	3.5-4	12	8,5	4	1
M12	_	12	9,5	1,75	_

Verankerungslänge aller Versuchskörper 150 mm (= 12,5 d) mit Ausnahme der mit * gekennzeichneten, für die gilt 110 mm (= 9,2 d)

3 Materialeigenschaften

Vor der eigentlichen Untersuchung wurden die Materialeigenschaften der Bestandteile der Versuchskörper, der Marmorsteine, der Verankerungsstäbe und des Zementmörtels bestimmt.

3.1 Dionyssosmarmor

Für die Steinblöcke wurde Dionyssosmarmor verwendet, der bei den Restaurierungsarbeiten an der Akropolis verwendet wird, da er aus dem selben Berg, der Penteli, aus dem der ursprüngliche Marmor des Monuments stammt, kommt und ähnliche Eigenschaften besitzt. Dieser Marmor besteht um 98 % aus Kalzit, hat eine Dichte von 2730 kg/m³ und eine sehr geringe Porosität, zwischen 0,3 und 0,7 %. Die Korngröße ist etwa $0,43 \times 10^{-3}$ m, und die Kristalle haben eine gleichmäßige Polygonform mit Abmessungen zwischen 900 μ m \times 650 μ m und 950 μ m \times 874 μ m. Seine Farbe ist weiß, mit einigen grauen Venen parallel zur Schieferungsrichtung und vereinzelten lokalen Silberfärbungen wegen der Anwesenheit kleiner Mengen von Miscovit und Chlorit [25].

Aus mechanischer Sicht ist der Dionyssosmarmor ein anisotropes Material mit drei Anisotropierichtungen, eine senkrecht zur Schieferebene, Richtung π und zwei in der Schiefer-



Bild 8. Anisotropierichtungen des Dionyssosmarmors Fig. 8. Directions of anisotropy of the Dionyssos marble

ebene, Richtungen κ und M. (Bild 8). Experimentelle Untersuchungen an direkten Zugproben und einaxialen Druckproben [26], [27] zeigen, dass die mechanischen Kennwerte in den beiden letzten Richtungen ähnlich sind (Tabelle 2). Daher kann der Dionyssosmarmor als transversal-isotrop betrachtet werden, dessen mechani-

Tabelle 2. Mechanische Kennwerte des DionyssosmarmorsTable 2. Mechanical characteristics of the Dionyssos marble

	Elastizitätsmodul E [GPa]	Querdehnungszahl v	Zugfestigkeit f _t [MPa]
Starke Richtung (κ)	84,5	0,26	10,8
Zwischenrichtung (M)	79,5	0,26	9,5
Schwache Richtung (π)	50,0	0,11	0,3

sches Verhalten mit Hilfe von fünf Materialkonstanten beschrieben werden kann: zwei Elastizitätsmoduli, E und E', in der und senkrecht zur Isotropieebene (E in den Richtungen κ und M, E' in Richtung π), zwei Querdehnzahlen, v und v', und einen Schubmodul G parallel zur Isotropieebene.

Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Dionyssosmarmors zeigt, dass er einen doppelten E-Modul besitzt, da sein E-Modul unter Druck etwa 1,15-mal größer als der E-Modul unter Zug ist (Bild 9). Es wurde noch experimentell gezeigt, dass die Druckfestigkeit von den Versuchskörperabmessungen abhängt (Bild 10). Interessant ist, dass diese Abhängigkeit nicht monoton ist, sondern es eine bestimmte Größe gibt, bei der die Druckfestigkeit einen maximalen Wert erreicht (Bild 10).

3.2 Zementmörtel

Der Zementmörtel wurde vom Personal der Akropolis vorbereitet und besaß die gleiche Zusammensetzung der entsprechenden Restaurierungsarbeiten. Davon wurden zylindrische Probekörper mit einem Verhältnis Durchmesser zu Länge $\approx 1/2$, die zunächst unter einachsigem Druck belastet wurden (Bild 11a). Während der Belastung wurden mit Hilfe von DMS die axialen und transversalen Dehnungen an drei Punkten des Umfangs gemessen. Das Versagen war spröde, unter kompletter Zerstörung der Proben. Charakteristische Spannungs-Dehnungs-Diagramme werden in Bild 11c dargestellt. Aus den Versuchen können hinreichend zuverlässige Werte der mechanischen Kenngrößen bestimmt werden: E-Modul ≈ 15,5 GPa, Querdehnungszahl v ≈ 0,26, Proportionalitätsgrenze $f_p \approx$ 10 MPa und Druckfestigkeit $\hat{f_u} \approx$ 35 MPa. Mit den gleichen Proben wurde der Brazilian-Versuch, antidiametraler Druckversuch, durchgeführt



Bild 9. Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Dionyssosmarmors parallel zur starken Anisotropierichtung

Fig. 9. Stress-strain diagram of the Dionyssos marble parallel to the strong direction of anisotropy



Bild 10. Effekt der Versuchskörpergröße des Dionyssosmarmors Fig. 10. Scale effect of the Dionyssos marble

(Bild 11b). Die damit geschätzte Zugfestigkeit beträgt 2 MPa.

3.3 Stahl der Verankerungsstäbe

Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Stahls wurde mit Hilfe genormter Zugversuche ermittelt (Bild 12). Aus den Versuchen wurden folgende Werte ermittelt: E-Modul 210,3 GPa, Fließgrenze 470 MPa, Zugfestigkeit 585 MPa, Querdehnungszahl 0,28 und Bruchdehnung 10 %.

4 Versuchsanordnung

Die Versuchsanordnung für Ausziehversuche ist nicht genormt. Die in der Literatur vorgefundenen Anordnungen unterscheiden sich im Wesentlichen in folgenden Punkten:

- die Festhaltung der Versuchskörper, entweder auf der Seite, wo gezogen wird, oder auf der gegenüberliegenden Seite [28], [29]. Sie beeinflusst die Spannungsverteilung, das Versagensbild und die Art, wie die Verformungen gemessen werden.

- die genaue Geometrie und die Abmessungen der Versuchskörper und der Kopfplatten

- die Beschreibung der Ausziehentwicklung: In einigen Arbeiten wird die Last in Abhängigkeit der aufgebrachten Verschiebung [8], [12], [30], in anderen die Last in Abhängigkeit des Schlupfs des Verankerungsstabs vom Probekörper [18], [31] beschrieben

Dadurch besaß die hier entworfene und hergestellte Versuchsanordnung einige Originalitätselemente (Bild 13). Zunächst wurde die Festhaltung des Versuchskörpers an der



Bild 11. Druckversuch a), *Versagensform des Brazilian-Versuchs b)*, *Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Druckversuchs c) Fig. 11. Compression test a)*, *failure mode of the Brazilian test b)*, *stress-strain-curve of the compression test c)*



Bild 12. Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Stahls der Verankerungsstäbe Fig. 12. Stress-strain diagram of the anchor steel

Seite, an der die Zuglast ausgeübt wird, gewählt, weil sie durch geeignete Formung der Proben die direkte Messung des Schlupfs zwischen Stab und Mörtel und dem Marmorkörper erlaubt. Die Zuglast wird direkt auf den Verankerungsstab ausgeübt, während die Vertikalbewegung des Marmorkörpers durch eine, mit vier Gewindestangen nach unten verankerte, starre Kopfplatte behindert war. Die Kopfplatte war mit einem Loch versehen (Bild 14a), um a) den Durchgang des Verankerungsstabs und b) die unbehinderte Bildung des Bruchkegels des Marmors, falls dies der Fall sein sollte, zu erlauben. Die Bedingung b) wird durch ein großes Loch erfüllt. Ein zu großes Loch würde aber das Spannungsfeld des Marmorkörpers in der Nähe des Ankerstabs beeinflussen. So wurde schließlich der Lochdurchmesser mit Hilfe geeigneter Vorversuche bestimmt, so dass beide widersprüchlichen Bedingungen annähernd erfüllt werden konnten.

Das Messsystem beinhaltete: – eine Kraftmessdose mit Empfindlichkeit 5 N zur Messung der von der Maschine auf den Verankerungsstab aufgebrachten Last

einen Klammerwegaufnehmer zur Messung eventueller Verformungen der Gewindestangen (Bild 14d)
einen Wegaufnehmer an der Maschinentraverse zur Messung der eingeprägten Verschiebung (Bild 14e)
einen durch das untere Loch des Marmorkörpers bis zum Veranke-

rungsstab reichenden Wegaufnehmer zur Messung des Schlupfs zwischen dem Stab und dem Marmorkörper (Bild 14b) einen DMS zur Messung der Dehnungen des Verankerungsstabs und eventueller Sekundärbiegungseffekte (Bild 14c)

Die Belastung wurde weggesteuert aufgebracht. Die Last wurde von einer INSTRON-Maschine mit 250 kN Kapazität, unter quasi-statischen Bedingungen, mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min aufgebracht. Die bei den Versuchen registrierte Maximallast war nicht größer als 50 kN, so dass mit ausreichender Sicherheit angenommen werden kann, dass die Steifigkeit der Maschine für alle Messungen ausreichend war. Alle Messergebnisse wurden mit Hilfe des Programms LABVIEW elektronisch registriert und gespeichert.





Wegen der kleinen Verankerungslängen erfolgte das Versagen bei allen Versuchen durch Herauszziehen der Stäbe aus dem Marmor und immer an der Grenzfläche zwischen Mörtel und Bohrlochwand (Bild 15). Der Mörtel blieb größtenteils intakt und haftete am Stab. Nach Versuchsende wurde bei einigen Versuchskörpern der gesamte Stab herausgezogen. Es zeigt sich, dass ein Versagen an der Grenzfläche zwischen Ankerstange und Mörtel am Stabende nicht vollständig ausgeschlossen werden kann. Ebenso wurde ein Abschuppen einer dünnen Marmorschale wegen der



Bild 14. Details der Versuchsanordnung Fig. 14. Details of the experimental set-up



Bild 15. Ankerstab und Marmorblock nach Versuchsende Fig. 15. Anchor bar and marble block after the test

Haftung am Mörtel beobachtet, was aber ohne Bedeutung für das Tragverhalten ist.

Die Last-Verformungs- und die Last-Schlupf-Kurven, P-δ bzw. P-s, eines typischen Versuchs sind in Bild 16 dargestellt. Die Last-Verformungs-Kurve ist zunächst linear, weil in diesem Bereich kein Schlupf stattfindet. Dann fängt ein messbarer Schlupf an, und die Neigung der P-δ-Kurve ändert sich leicht. An dieser Last beginnt offensichtlich eine Lösung der Kontinuität an der Grenzfläche Mörtel - Marmor durch lokale Überschreitung der Schubfestigkeit der Grenzschicht mit Bildung der ersten Risse. Die Neigung der P-δ-Kurve wird allmählich kleiner, bis zum Erreichen der Maximallast. Danach fällt die Last mehr oder weniger plötzlich ab, wegen der vollständigen Lösung der Kontinuität an der Grenzfläche und Überschreitung ihrer Schubfestigkeit über die gesamte Verankerungslänge. Während dieser Phase steigt die Neigung der P-s-Kurve leicht an. Nach dem plötzlichen Lastabfall stabilisiert sich die Last auf etwa 40 % des Maximalwerts, während die Neigung der s-δ-Kurve konstant, gleich der Geschwindigkeit der Wegaufbringung, wird. Der Ursprung dieser Restfestigkeit ist noch nicht geklärt, sie kann

an der Reibung, beispielsweise durch mögliche Dilatation des Mörtels, oder einer ungewollten Schiefstellung des Stabs relativ zum Loch, liegen.

Die Last-Schlupf-Kurven aller Versuche, bei denen Schlupfmesswerte aufgenommen werden konnten, sind in Bild 17 dargestellt. Jedes Bild a) bis h) enthällt nach Tabelle 1 drei Kurven für identische Versuchskörper, mit Ausnahme der Bilder b) und e), bei denen ein Versuch mit kleineren Verankerungstiefen durchgeführt wurde. Man erkennt die große Streuung der Ergebnisse, offensichtlich bedingt durch die, unplanmäßige, leicht unterschiedliche Herstellung und die Streuung der Marmoreigenschaften.

Die Schubspannungen in der Verbundfuge können nach Gl. (1) ermittelt werden:

$$\tau = \frac{P}{\left(\pi \cdot d_{\rm loch}^2 / 4\right) \cdot L} \tag{1}$$

worin

- P Last an einem bestimmten Zustand
- d_{loch} Durchmesser der Bohrung im Marmor
- L Verankerungslänge des Stabs

Bild 18 stellt die experimentell ermittelten Schubspannungen charakteristischer Zustände dar. Folgende Zustände werden als charakteristisch definiert:

a) Beginn des Schlupfs, bis zu dem die Verformungskompatibilität zwischen Ankerstab und Marmor gilt

b) Erreichen der Maximallast, die dem Grenzzustand der Tragfähigkeit entspricht

c) Erreichen von 1 mm Schlupf, der dem Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit entspricht, da später die Fuge zu weit klafft



Bild 16. Typische Last-Verformungs- und Last-Schlupf-Kurven Fig. 16. Typical load-deformation and load-slip curves







d) Versuchskörper Nr. 4 d) Specimen No 4









b) Versuchskörper Nr. 2 (untere Kurve mit kleineren Verankerungslänge)
b) Specimen No 2 (lower curve has a smaller anchor length)



e) Versuchskörper Nr. 5 (untere Kurve mit kleineren Verankerungslänge)
e) Specimen No 5 (lower curve has a smaller anchor length)

h) Versuchskörper Nr. 9 h) Specimen No 9



Bild 17. Experimentelle Last-Schlupf-Kurven (a–h) Fig. 17. Experimental load-slip curves

Bild 18 zeigt die Mittelwerte aus den drei identischen Versuchen sowie den Mittelwert minus eine Standardabweichung. Folgendes ist zu erkennen:

a) Größere Gewindesteigungen wirken negativ auf die Festigkeit.

b) Die mittlere Gewindetiefe besitzt bessere Eigenschaften für alle Gewindesteigungen.

Bild 19 stellt das Verhältniss der Schubspannungen bei Schlupfbeginn bzw. bei 1 mm Schlupf zu den Maximalwerten dar. Man erkennt, dass das mitteltiefe Gewinde stabilere und duktilere Verhältnisse für alle Gewindesteigungen aufweist, indem sich die Schubspannungen von Schlupfbeginn bis 1 mm Schlupf zwischen 65 % und 90 % des Maximalwerts bewegen.

Aus den hier beschriebenen experimentellen Untersuchungen können folgende Schlüsse zum Ausziehverhalten von Verankerungen im Marmor gezogen werden:

a) Beim Herausziehen der Stäbe aus dem Marmor erfolgt das Versagen an der Grenzfläche zwischen Mörtel und Bohrlochwand.

b) Die Gewindeform spielt eine entscheidende Rolle für das Tragverhalten der Verankerung.

c) Die beste Gewindeform ist ähnlich der des metrischen Gewindes.

d) Bedingt durch die Herstellung und die Eigenschaften des Naturmaterials Marmor streut das Ausziehtragverhalten mehr oder weniger stark.

e) Geeignete Grenzzustanddefinitionen sind für den Grenzzustand der Tragfähigkeit das Erreichen der Maximallast und für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit das Erreichen von 1 mm Schlupf.

f) Bei Monumentrestaurierungen sollten zur Erzielung der Reversibilität der Eingriffe die Verankerungen im Marmor so entworfen werden, dass das Herausziehen der Stäbe der kritische Versagensmechanismus ist und nicht der Marmor- oder der Verankerungsbruch.

g) Diese Art der Restaurierung entspricht einer Teilrehabilitierung von Biegeelementen, wie den Architraven griechischer Tempel.

Zur Zeit werden begleitende rechnerische Untersuchungen mit Finiten Elementen durchgeführt. Die Untersuchungen laufen im Rahmen eines europäischen Forschungsprogramms Namens "PROHITECH:







Bild 18. Experimentelle Schubspannungen der Verbundfuge für verschiedene Zustände; a) Beginn des Schlupfes, b) Maximallast, c) bei 1 mm Schlupf Fig. 18. Experimental shear stresses of the boundary surface at various states; a) start of the slip, b) maximal load, c) 1 mm slip



Bild 19. Schubspannungsverhältnisse charakteristischer Zustände; a) Beginn des Schlupfes zu Maximalwerten, b) 1 mm Schlupf zu Maximalwerten Fig. 19. Ratios of the shear stresses for characteristic states; a) start of the slip to maximal values, b) at 1 mm slip to maximal values

Earthquake Protection of Historical Buildings by Reversible Mixed Technologies". Der EU wird für die finanzielle Unterstützung gedankt. Gedankt sei auch dem Leiter der Restaurierungsarbeiten der Akropolis Dr. *Nikos Toganidis* für die Erlaubnis zur Benutzung des Baustellenlabors, Dipl.-Ing. *Antigone Vrouva* für ihre wertvollen Hinweise, dem technischen Personal des Parthenon für die Herstellung der Verankerungen und DIONYSSOS MARBLE für die kostenlose Marmorlieferung.

Literatur

- [1] International Council on Monuments and Sites (ICOMOS), The International Charter of Venice, 1964.
- [2] Zambas, C., Ioannidou, M., Papanikolaou, A.: The use of Titanium reinforcements for the restoration of marble architectural members of Acropolis Monuments, IIC Congress on Case Studies in the Conservation of Stone and Wall Paintings, The International Institute for Conservation of Historic and Artisttic Works, Bologna, Italy, pp. 138–143, 1986.

- [3] Zambas, C.: Structural problems for the restoration of the Parthenon, Study for the Restoration of the Parthenon, Ministry of Culture, Committee for the Preservation of the Acropolis Monuments, vol. 2a, Athens, 1989, pp. 153–180 (in Greek with summary in English).
- [4] *Ioannidou, M.*: Structural problems of the Propylaea, Study for the Restoration of the Propylaea, Ministry of Culture, Committee for the Preservation of the Acropolis Monuments, vol. 1, Athens, 1994, pp. 339–448 (in Greek with summary in English).
- [5] Zambas, C.: Structural repairs to the monuments of the Acropolis – the Parthenon, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, V. 92, November 1992, pp. 166–176.
- [6] Ioannidou, M., Pashalides, B.: Joining the beams of the Propylaia with titanium reinforcements, Proceedings of the 5th International Meeting for the Restoration of the Acropolis Monuments, 4–6 October 2002, pp. 291–300, Committee for the Preservation of the Acropolis Monuments Publications, Athens, Greece. 2002.
- [7] Mentzini, M.: Joining epistyles and drums of Parthenon using titanium reinforcement: A new approach, Proceedings of the 5th International Meeting for the Restoration of the Acropolis Monuments, 4–6 October 2002, pp. 233–242, Committee for the Preservation of the Acropolis Monuments Publications, Athens, Greece. 2002.
- [8] Atkinson, C., Avila J., Betz, E., Smelser, R. E.: The rod pull-out problem, theory and experiment, J. Mech. Phys. Solids, 30(3), pp. 97–120, 1982.
- [9] Murakami, H., Hegemier, G. A.: On simulating steel-concrete interaction in reinforced concrete. Part I: theoretical development, Mechanics of Materials, 5, pp. 171–185, 1986.
- [10] Colak, A.: Parametric study of factors affecting the pull-out strength of steel rods bonded into precast concrete panels, Int. J. of Adhesion & Adhesives, 21, pp. 487–493, 2001.
- [11] *Obata, M., Inoue, M., Goto, Y.*: The failure mechanism and the pull-out strength of a bond-type anchor near a free edge, Mechanics of Materials, 28, pp. 113–122, 1998.
- [12] Banholzer, B., Brameshuber, W., Jung, W.: Analytical evaluation of pullout tests – the direct problem, Cement & Concrete Composites, 27, pp. 93–101, 2005.
- [13] Banholzer B., Brameshuber, W., Jung, W.: Analytical evaluation of pullout tests – the inverse problem, Cement & Concrete Composites, 28, pp. 564–571, 2006.

St. Kourkoulis/St.-A. Papanicolopulos/A. Marinelli/I. Vayas · Restaurierung antiker Tempel: Experimentelle Untersuchungen zum Ausziehverhalten von Verankerungen im Marmor

- [14] RILEM/CEB/FIP RECOMMENDA-TION. – Bond test for reinforcing steel, Materials and Structures, 6 (32), 1973.
- [15] Eligehausen, R., Appl, J., Lehr, B., Meszaros, J., Fuchs, W.: Tragverhalten und Bemessung von Befestigungen mit Verbunddübeln unter Zugbeanspruchung, Beton- und Stahlbetonbau 99 (2004), H. 7, 561–570.
- [16] *Pinchin, D. J., Tabor, D.*: Inelastic behaviour on steel wire pull-out from Portland cement mortar, J. of Materials Science, 13, pp. 1261–1266, 1978.
- [17] Bartos, P.: Analysis of pull-out tests on fibres embedded in brittle matrices, J. of Materials Science, 15, pp. 3122–3128, 1980.
- [18] de Lorenzis, L., Rizzo, A., La Tegola, A.: A modified pull-out test for bond of near-surface mounted FRP rods in concrete, Composites: part B, 33, pp. 589–603, 2002.
- [19] Al-Mahmoud, F., Castel, A., Francois, R., Tourner, C.: Effect of surface pre-conditioning on bond of carbon fibre reinforced polymer rods to concrete, Cement & Concrete Composites, to appear, 2007.
- [20] Shelton, J. C., Loukota, R. A.: Pullout strength of screws from cortical bone in the maxillo-facial region, J. of Materials Science: Materials in Medicine, 7, pp. 231–235, 1996.
- [21] Chazistergos, P., Ferentinos, G., Magnissalis, E. A., Kourkoulis, S. K.: The pull-out strength of transpedicular screws in posterior spinal fusions, 16th European Conference on Fracture, Alexandroupoli, Hellas, Abstracts of the

ECF16, *E. E. Gdoutos* (Ed.), Springer, Dordrecht, pp. 417–418, 2006.

- [22] Zhang, Q. H., Tan, S. H., Chou, S. M.: Effects of bone materials on the pull-out strength in human spine, Medical Engineering and Physics, 28, pp. 795–801, 2006.
- [23] Paschalides, V., Mentzini, M., Kourkoulis, S. K., Vardoulakis, I.: Experimental evaluation of a new method for the calculation of the put-togetherreinforcement of fractured structural members (in Greek), 1st Nat. Conf. Greek Association of Mechanical Engineers, Athens, Greece, March 28–30, 2005, p. B56/72-83, 2005.
- [24] Kourkoulis, S. K., Ganniari-Papageorgiou, E., Mentzini, M.: Experimental and numerical evaluation of a new method for joining together fragmented structural members, Heritage, Weathering and Conservation (HWC-2006) Conference, Madrid, Spain, June 2006. Published in: "Heritage, Weathering and Conservation", R. Fort et al. (Eds.), Balkema, The Netherlands, pp. 657–665, 2006.
- [25] *Tassogiannopoulos, A. G.*: A Contribution to the Study of the Properties of Structural Natural Stones of Greece, Phd Dissertation, Nat. Techn. Univ. of Athens, Greece, 1986.
- [26] Vardoulakis, I., Kourkoulis, S. K., Exadaktylos, G. E., Rosakis, A.: Mechanical properties and compatibility of natural building stones of ancient monuments: Dionysos marble, Proceedings of the Interdisciplinary Workshop "The building stone in monuments",

Athens, November 2001, IGME Publishing, Eds. *M. Varti-Mataranga* and *Y. Katsikis*, pp. 187–210, 2002.

- [27] Vardoulakis, I., Kourkoulis, S. K.: Mechanical properties of Dionysos marble: Final report of the Environment Project EV5V-CT93-0300: "Monuments under seismic action". Nat. Techn. Univ. of Athens, Athens, Greece, 1997.
- [28] Yue, C. Y., Loi, H. C.: Factors which influence the reliability of the assessment of interfacial bonding in fibrous composites using the pull-out test, Int. J. of Adhesion and Adhesives, 21, pp. 309–323, 2001.
- [29] Yue, C. Y., Loi, H. C.: Effect of the loading system on the stress distribution in the fully embedded fibre pullout test, J. Mat. Sci., 29, pp. 1901–1909, 1994.
- [30] Tsai, K. H., Kim, K. Y.: The micromechanics of fiber pull-out, J. Mech. Phys. Solids, 44 (7), pp. 1147–1177, 1996.
- [31] Alwan, J. M., Naaman, A. E., Hansen, W.: Pull-out work of steel fibers from cementitious composites: Analytic investigation, Cement & Concrete Composites, 13, pp. 247–255, 1991.

Autoren dieses Beitrages:

Assoc. Prof. Dr.-Ing. Stavros Kourkoulis, Dipl.-Ing. Stefanos-Aldo Papanicolopulos, Laboratory of Strength of Materials, Dipl.-Ing. Aikaterini Marinelli, Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Ioannis Vayas, Laboratory of Stool Structures. National Technical Univer-

of Steel Structures, National Technical University of Athens, Griechenland