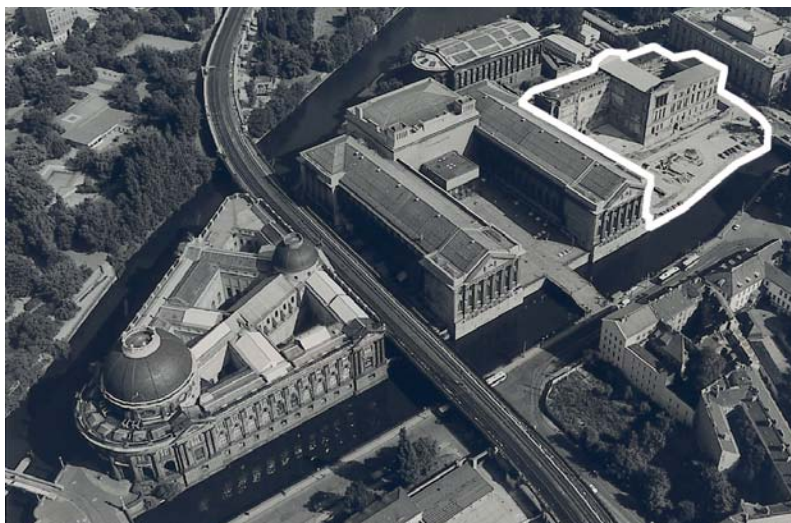


Tragsicherheitsbewertung von Kalksteinsäulen im Neuen Museum Berlin

G. Eisele, Ingenieurgruppe Bauen, Karlsruhe;
M. Gutermann, Institut für Experimentelle Statik, Hochschule Bremen, Bremen
K. Steffens, Prof. Dr.-Ing. Steffens Ing.-GmbH, Bremen

Das Neue Museum auf der Museumsinsel in Berlin wurde 1841 - 55 nach Plänen von Friedrich August Stüler erbaut. Zum Kriegsende schwer beschädigt und teilweise ausgebrannt, begannen 1985 erste Wiederaufbauarbeiten. Abgeschlossen ist bisher die Generalsanierung der Alten Nationalgalerie sowie des Pergamonmuseums.

Der Wiederaufbau des Neuen Museums ist eine Herausforderung für alle Baubeteiligten. Dem Tragwerksplaner stellt sich die anspruchsvolle Aufgabe, einzigartige denkmalgeschützte Konstruktionen aus Baustoffen und Bauarten unversehrt zu erhalten, die heute weder genormt noch gebräuchlich sind, und darüber hinaus gleichzeitig die heutigen Nutzungsanforderungen sicher zu stellen. Beispielhaft für ein historisches Tragelement sind Kalksteinsäulen, die hier in unterschiedlichen Bereichen ein wesentliches Element des Lastabtrags darstellen. Alte Tragelemente verfügen in der Regel über erstaunliche Tragfähigkeiten, die allerdings selten durch rechnerische Nachweisführung allein bestätigt werden können. Es soll im Folgenden exemplarisch aufgezeigt werden, wie sich rechnerische und experimentelle Tragsicherheitsanalysen ergänzen und auf diese Weise historische Konstruktionselemente von höchster denkmalpflegerischer Bedeutung einer modernen Nutzung zugeführt werden können.



*Bild 1:
Luftbild Museumsinsel
mit dem Neuen
Museum, Berlin*

1 Einführung

In den einzelnen Ausstellungsräumen sind in den Mittelachsen Säulen aus unterschiedlichen Natursteinmaterialien (Sandstein, Kalkstein, Marmor) eingebaut worden (Bild 2a und Bild 2b).



a) 1850



b) 2005

Bild 2a und 2b: Kalksteinsäulen damals und heute

Die Säulenschäfte sind aus so genanntem „Pyrenäen-Marmor“ gefertigt. Es handelt sich dabei um keinen klassischen Marmor, sondern um einen Kalkstein der Sorte „marbre campan melange“. Verschiedenfarbige Maserungen in unterschiedlichen Orientierungen verleihen dem Stein ein edles und dekoratives Aussehen (Bild 3).



Bild 3: Eingelagerte Säulenschäfte

Die Säulen erhalten zukünftig außer den Eigenlasten höhere Nutzlasten aus Museumsbetrieb und zum Teil Lasterhöhungen durch Einbau eines zusätzlichen Technikgeschosses unter dem Dach. Ein zunächst überschlägig

durchgeführter Nachweis der Kalksteinsäulenschäfte deutete unter der günstigen Annahme eines homogenen Querschnitts auf weit ausreichende Traglastreserven hin. Der rechnerische Tragsicherheitsnachweis war jedoch nicht zuverlässig zu erbringen, da das innere Tragverhalten der Gesteinsschichten tatsächlich inhomogen ist und auch idealisiert nicht ausreichend modelliert werden konnte. Zudem spielt der Erhaltungszustand der einzelnen Säulenbauteile eine erhebliche Rolle. Aufgrund der langen Standzeit als ungeschützte Ruine hatten Witterungseinflüsse auf die Werkstoffe eingewirkt. So mussten die Säulen einer genaueren Überprüfung unterzogen werden. 8 Säulen stehen noch an ihren ursprünglichen Einbauorten. Zwei unbeschädigte und vier zerbrochene Säulen sind im Depot eingelagert.

2 Versuchsprogramm

Ultraschalluntersuchungen sowie verfeinerten Radaruntersuchungen lieferten Anhaltswerte, die eine Kategorisierung aller Werkstücke erlaubte. Es wurden Risse, Klüfte und Bruchzonen detektiert, an einer Säule konnte ein Metalldübel geortet werden, der offensichtlich bereits vor dem Einbau der Säule zu Reparaturzwecken eingesetzt worden war. Der Grad der Verzahnung und die geometrische Form sind in jeder Fuge unterschiedlich und rechnerisch nicht erfassbar. Deshalb muss die Tragsicherheit der Säulen rechnerisch und experimentell (hybride Nachweisführung) ermittelt werden, wozu ein mehrstufiges Verfahren konzipiert wurde:

- Stufe 1: Tastversuche zur Beurteilung des Verbundverhaltens
- Stufe 2: Belastungsuntersuchung an den 2 ausgebauten Säulen
- Stufe 3: Untersuchung der im NMU eingebauten Säulen

3 Methodik

Zum Verständnis des hybriden Vorgehens zur Lösung der komplexen statischen Probleme im Neuen Museum kann das Prinzip von Belastungsversuchen in-situ gemäß Bild 4 und Bild 5 und nachvollzogen werden ([1] u. [2]).

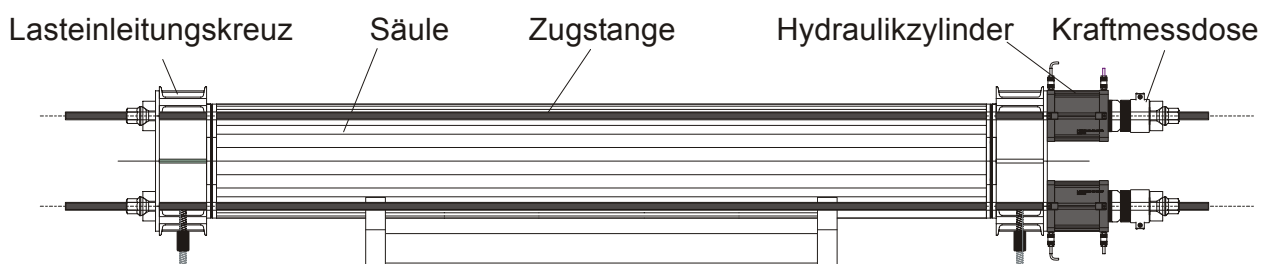


Bild 4: Versuchsaufbau der Säulenuntersuchung im Depot

Eine Belastungshydraulik erzeugt im internen Kräftekreislauf die regelbare Versuchslast. Elektrische Sensoren liefern über eine rechnergesteuerte

Messanlage online die Bauwerksreaktionen in grafischer Darstellung. Während der Versuche können die Belastungs-Reaktions-Kurven und die Schallemissionsanalyse (SEA) am Monitor verfolgt und analysiert werden. Dabei werden unterschiedliche Lastniveaus angefahren, wobei die höchste Laststufe in der Regel die Versuchsziellast ist, die alle notwendigen Teilsicherheitsfaktoren berücksichtigt. Dabei dürfen jedoch nicht vorher festgelegte Granzkriterien überschritten werden. Diese Schranke stellt die obere mögliche Versuchsgrenzlast dar (Schädigungsbeginn). Die konkrete Aufgabenstellung erfordert daher stets nicht nur angepasste Versionen der Belastung und Messtechnik sondern auch erfahrenes und sehr vielseitig ausgebildetes Personal.

4 Belastungsversuche

4.1 Ausgebaute Säulenfragmente (Stufe 1)

Um den Versuchsaufbau zu vereinfachen und Säulentransporte zu vermeiden, wurde eine mobile Belastungsvorrichtung zum In-situ-Einsatz im Säulendepot entwickelt.

Die Lasteinleitung erfolgte über eigens hergestellte Lastkreuze an beiden Enden des Säulenstumpfs. Die Lasterzeugung übernahmen 4 hydraulische Pressen. Dywidag-Zugstangen schlossen den Kräftekreislauf. Um die Querdehnung an den Lasteinleitungsflächen nicht zu behindern, wurden teflonkaschierte Elastomere als Gleitlager eingesetzt. Die Säulenschäfte wurden liegend in einer mobilen Prüfpresse zentrisch und exzentrisch belastet. Das Eigengewicht der Säule wirkte dadurch zwar senkrecht zur Säulenachse, der Fehler ist im Verhältnis zu den einzutragenden Lasten mit ca. 2 % vernachlässigbar klein.

Die Säule war zur Dehnungsmessung mit vier Wegaufnehmern ausgestattet, die mit der Beziehung $\epsilon = \Delta l / l$ die integrierte Dehnung in Längsrichtung lieferten (Bild 5). Neben der Kraft wurde an den Lasteinleitungsbereichen die Schallemission gemessen, damit ggf. festgestellt werden kann, wann sich der Verbund zwischen den Einzelkomponenten zu lösen beginnt.

Die Versuche ergaben, dass beide Säulenschäfte für zentrische Lasten ausreichend tragsicher sind (Sicherheitsfaktor $\gamma > 2,1$). Bereits bei geringen Exzentrizitäten ($M/N = e \leq d/8$) muss die zulässige Normalkraft jedoch wegen der Inhomogenität des Kalksteins eingeschränkt werden. Die festgestellte große Streubreite der E-Moduli stützt die Annahme, dass auch die Materialfestigkeiten stark streuen.



Bild 5: Versuchsaufbau Säulenfragment im Depot

Aufgrund der Reduzierung der Tragsicherheiten infolge Exzentrizitäten wurden die tatsächlich vorhandenen geometrischen Inhomogenitäten an den Säulen vor Ort aufgemessen und direkt in die rechnerischen Nachweise eingeführt. Durch Vergleich mit den im Versuch erreichten Ausmitten für einzelne Lastszenarien konnte dann die zulässige Tragsicherheit rechnerisch abgeschätzt werden.

4.2 Ausgebaute Säulen (Stufe 2)

Nach Umbau der Versuchseinrichtung wurden auch die 4 m langen Säulen liegend geprüft. Die Lasteinleitung musste bei beiden Säulen sorgfältig vorbereitet werden, da die Stirnflächen beider Säulen keinen rechten Winkel zur Säulenachse bildeten. Zudem waren im Vorwege am Säulenkopf mehrere Fehlstellen durch Restauratoren ausgebessert worden. Die Lasteinleitung wurde durch zentrische Kreisscheiben aus Buchensperrholz und vollflächiger Elastomerlagerung ($t = 10 \text{ mm}$) angepasst. Aus den während der Versuche gemachten Erfahrungen sind folgende Schlüsse zu ziehen:

- Ausbesserungen/Vierungen sind vollflächig zu verkleben, um Form und Kraftschluss zu erzielen
- Ausbesserungen/Vierungen an den Stirnflächen sollten wegen unterschiedlicher Steifigkeiten mit der latenten Beschädigungsgefahr nicht direkt belastet werden
- Statisch relevante Ausbesserungen sind zu dokumentieren und mit dem Tragwerksplaner abzustimmen und zu überwachen
- Kantenpressungen in den Stirnflächen sind wegen der Abplatzgefahr zu minimieren

Die Belastungsversuche fanden nach dem gleichen Prinzip wie bei den Säulenstümpfen statt. Die Anzahl der Dehnungsmessstellen wurde aufgrund der größeren Bauteillänge jedoch verdoppelt, indem die integrale Dehnungsmessung jeweils über die halbe Säulenlänge erfolgte. Neben der Redundanz konnte dadurch die verdoppelte Anzahl der Messwerte zur Abschätzung der Kalksteininhomogenität genutzt werden (*Bild 6*).

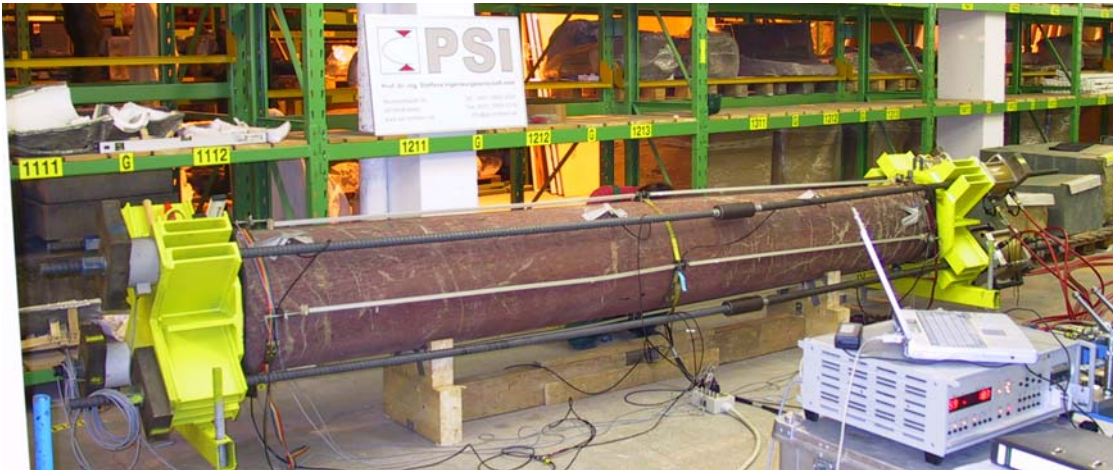


Bild 6: Versuchsaufbau Säulenschaft im Depot

Analog zu den Ergebnissen der Säulenfragmente haben die Versuche an den vollständigen Säulenschäften die Empfindlichkeit gegenüber exzentrisch eingeleiteten Lasten erneut bestätigt. Da die projektierten Gebrauchslasten des Bauwerks de facto nicht verändert werden können, ist die Exzentrizität der Lasteinleitung so gering wie möglich zu halten. Beim späteren Einbau der Testsäulen in die tragende Struktur ist daher große Sorgfalt auf die Zentrierung der Lasten, Begrenzung der Exzentrizitäten und Vermeidung von Kantenpressung zu legen.

4.3 Im Museum eingebaute Säulen (Stufe 3)

Für eingebaute Säulen, die nicht ausreichend klassifizierbar sind, sind weitere Untersuchungen in-situ mit folgenden Varianten möglich:

- Ausbau von Stützen und Beprobung gemäß Abschnitt 4.2
- Belastungsversuche in-situ an eingebauten Säulen

Sollte die erforderliche Tragsicherheit der Säulen mit den genannten Untersuchungen nicht nachweisbar sein, muss eine entsprechende Umplanung erfolgen.

Eine im Museum verbaute Kalksteinsäule war längere Zeit den Umwelteinflüssen ungeschützt ausgesetzt. Voruntersuchungen (Ultraschall, Radar) bestätigten den schlechten Zustand des Säulenschaftes, der Basis und des Kapitells. Zum Ausbau von Basis und Kapitell war eine Anhebevorrichtung installiert worden. Der Säulenschaft wurde anschließend auf eines der beiden Lastkreuze abgesetzt und ausgerichtet (*Bild 7a*). Das

andere wurde in 4 m Höhe auf die stehende Säule gelegt. Belastungsvorrichtung und Messtechnik entsprachen den vorangegangenen Versuchen im Depot (*Bild 7b*). Die Tragsicherheit für zentrische und exzentrische Lasten konnte nachgewiesen werden, auch wenn die Stauchungen deutlich größer waren als die, der im Depot gelagerten Säulen, deren Messkurven in Bild 8 wiedergegeben sind.



a)

Bild 7: Aufbau in-situ-Belastungsversuche

a) Nach Einbau des unteren Lastkreuzes



b)

b) Vollständig mit Mess- und Belastungstechnik ausgestattete Säule

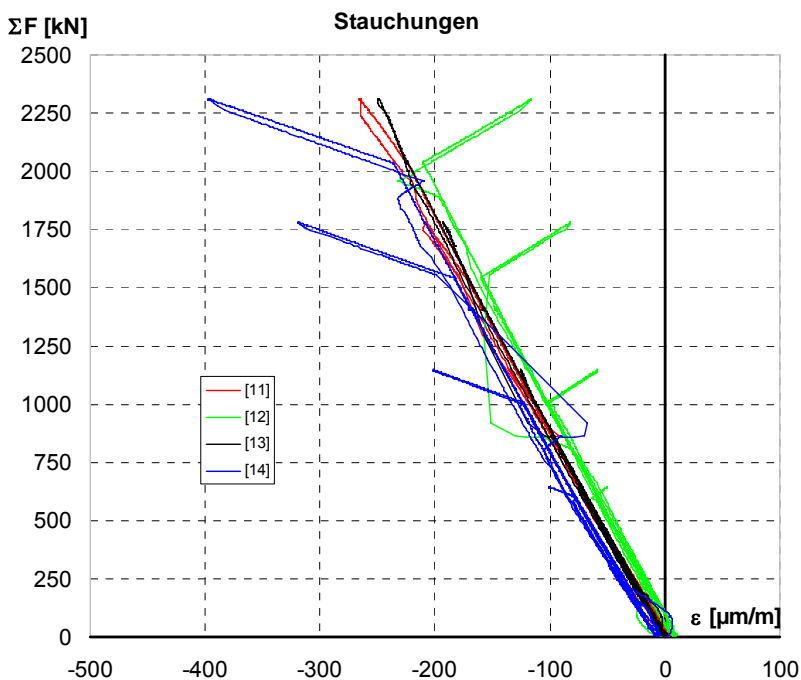


Bild 8: Versuchsaufbau Säulenschaft im Depot

Zurzeit sind weitere Versuche an Säulen geplant, die abweichend zur bisherigen Vorgehensweise in der originalen Einbausituation getestet werden sollen. Aufgrund der örtlichen Randbedingungen können die Versuchslasten nicht unter, bzw. oberhalb der Säule eingeleitet werden, so dass eine Sonderlösung mit Klemmringsen entwickelt werden musste, die die Versuchslasten über Reibung einleitet. Die Versuche finden voraussichtlich Anfang des Jahres 2006 statt.

5 Zusammenfassung

Bauingenieure werden immer häufiger mit Aufgabenstellungen im Spannungsfeld zwischen historischer Baukonstruktion und modernen Nutzungsanforderungen konfrontiert. In der Regel sind sie diesen Aufgaben zwar gewachsen – rein technisch ist nahezu alles machbar – jedoch ist ein Mangel an Verständnis für die historische Konstruktion und die denkmalpflegerische Zielstellung weit verbreitet. Das Verständnis für die historische Konstruktion ist allerdings Grundlage für den adäquaten Umgang mit denkmalpflegerisch wertvollen Konstruktionen. Das Aufgabenfeld des Ingenieurs geht auch in diesen Fällen viel weiter über die technischen Realisierungsmöglichkeiten oder Einstufung in heutige Vorschriftenszenarien hinaus. Die wichtigste Aufgabe der Ingenieure war im oben beschriebenen Fall, frühzeitig zu erkennen, dass rein theoretische Ansätze nicht zielführend sind und im weiteren alle Beteiligten, den Auftraggeber, den Nutzer, den Architekten bis hin zu den erforderlichen Spezialisten zur gegebenen Zeit in die Diskussion mit einzubeziehen und diese Diskussion auch zu moderieren. Für die Kalksteinsäulen des Neuen Museums konnten mit Hilfe der hybriden

Statik somit Konzepte erarbeitet werden, die mit Unterstützung der experimentellen Tragsicherheitsanalyse eine adäquate Nutzung erlauben. Die Arbeiten an der denkmalgeschützten Bausubstanz des Neuen Museums haben begonnen und sollen bis ca. 2009 abgeschlossen sein.

6 Literatur

- [1] Deutscher Ausschuß für Stahlbeton - DAfStb: DAfStb-Richtlinie, Belastungsversuche an Betonbauwerken, Ausgabe 09/2000, Beuth Verlag GmbH
- [2] Eisele, G. ; Gutermann, M. ; Seiler, J. ; Steffens, K.: Wiederaufbau des Neuen Museums in Berlin. In: Bautechnik, 81. Jahrgang, Heft 6, Ernst & Sohn, Juni 2004
- [3] Gutermann, M. ; Steffens, K.: Reconstruction of the „Neues Museum“ in Berlin – support structure planning pro preservation of historic buildings. In: Brebbia, C.A. (Hrsg.): Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture. Southampton: WIT Press 2005, ISSN 1743-3509
- [4] Gutermann, M. ; Steffens, K.: Belastungsversuche als Baustein für den Wiederaufbau des Neuen Museums. In: VDI-Bericht 1899. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2005
- [5] Eisele, G. ; Gutermann, M. ; Seiler, J. ; Steffens, K.: Neu bewertet – Tragwerksberechnungen und –versuche beim Neuen Museums. In: Deutsche Bauzeitung, 139 Jahrgang, 12/05. Leinfelden-Echterdingen: Konradin, 2005, S. 66-69