

Kombinierte Anwendung bildgebender zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Strukturaufklärung antiker Baudenkmäler

Combination of imaging non-destructive testing methods
for structural investigations of ancient architectural monuments

Dr.-Ing. F. Weise, Dipl.-Ing. B. Redmer

Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin

Tel.: +44 (0) 30 – 81043237, Fax: ... – 81041717

E-Mail: Frank.Weise@bam.de, Internet: www.bam.de

Tel.: +44 (0) 30 – 81043653, Fax: ... – 81041837

E-Mail: Bernhard.Redmer@bam.de, Internet: www.bam.de

Dr.-Ing. G. Patitz

**Ingenieurbüro für Schadensgutachten und Bauwerksdiagnostik

Tel.: +44 (0) 721 – 3844198, Fax: ... – 81043817

E-Mail: Patitz@t-online.de, Internet: www.erhalten-historischer-bauwerke.de

Zusammenfassung:

Im vorliegenden Beitrag werden die Möglichkeiten des kombinierten Einsatzes bildgebender zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Strukturaufklärung antiker Kulturgüter des Pergamonmuseums am Beispiel des Markttors von Milet aufgezeigt. Hier galt es, aufgrund fehlender Bestandsunterlagen im Rahmen einer Bauzustandsanalyse die konstruktive Befestigung der antiken Marmorteile an der tragenden Stahlkonstruktion sowie die konstruktive Ausbildung des Anschlusses zwischen originale Marmor und Steinerfüllungsmaterial exemplarisch in einem ausgewählten Bereich des Architraven zu verifizieren. Die Ermittlung der Art, Lage und Abmessungen der hierfür erforderlichen metallischen Einbauteile erfolgte durch die kombinierte Anwendung von Radar und Radiografie.

Im oberen Bereich des exemplarisch untersuchten Architraven wurde mittig mit Radar ein durchgehender I-Träger, an dem partiell originale Marmorteile abgehängt sind, gefunden. Radiografische Detailuntersuchungen ergaben, dass die Abhängekonstruktion aus schwalbenschwanzförmigen Flacheisen, die in gleichartig geformten Aussparungen im originalen Marmor eingebracht und vermörtelt sind, besteht. In anderen Teilbereichen des Architraven erfolgte der konstruktive Anschluss zwischen originale Marmor und Steinerfüllungsmaterial mit zwei Dübeln.

Weiterhin wurden im unteren Bereich des Architraven jeweils von den Säulen ausgehend unterschiedlich tief einbindende I-Träger ermittelt.

Abstract:

In this paper the possibilities of the combined application of imaging non-destructive testing methods for the structural investigation of ancient architectural monuments are presented by the example of the market gate of Milet. Due to missing construction documents in the context of a structural condition assessment the task was to determine the structural fastening of the ancient marble components on the load-carrying steel construction for example in a selected area of the architrave. The determination of the kind, position and dimension of the required metallic fittings was realised by the combined application of radar and radiography.

Within the upper area of the exemplary investigated architrave a continuous I-beam, at which partially original marble components are suspended, was found. Radiographic detail investigations

showed that the suspending construction consists of flat irons with a dovetail form. They are placed and plastered in similar formed bonding pockets. In other sub areas of the architrave the structural connection between original marble and marble substitute was carried out with two dowels.

Furthermore, differently deep bonding I-beams were determined within the lower area of the architrave starting from the columns.

1 Problem- und Zielstellung

In Vorbereitung der Umbau- und Sanierungsmaßnahmen im Pergamonmuseum galt es, auch am Markttor von Milet eine umfassende Bauzustandsanalyse durchzuführen. Anlass hierfür waren neben den fehlenden Bestandsunterlagen vor allem bereits äußerlich erkennbare Schäden.

Herkömmliche Erkundungsverfahren wie Bauaufnahme, baugeschichtliche Untersuchungen, Quellenstudium sowie äußerliche Begutachtung reichten jedoch nicht aus, um die innere Struktur der Bauteile hinreichend zu charakterisieren. So war es zwar bekannt, dass die Tragkonstruktion dieses Baudenkmals ein Stahlskelett bildet, jedoch lagen nur unzureichende Kenntnisse zur konstruktiven Befestigung der antiken Marmorteile an der Stahlkonstruktion sowie zur konstruktiven Ausbildung des Anschlusses zwischen originale Marmor und Steinerfüllungsmaterial vor. Aus dem Grunde galt es, diese für die statische Nachweisführung so wichtigen Details möglichst zerstörungsfrei zu ermitteln. Die möglichst ohne Eingriff in die historische Bausubstanz durchzuführenden Untersuchungen erfolgten dabei exemplarisch an einem ausgewählten Bereich des partiell aus originale Marmor und Steinerfüllungsmaterial bestehenden Architraven (Bild 1).

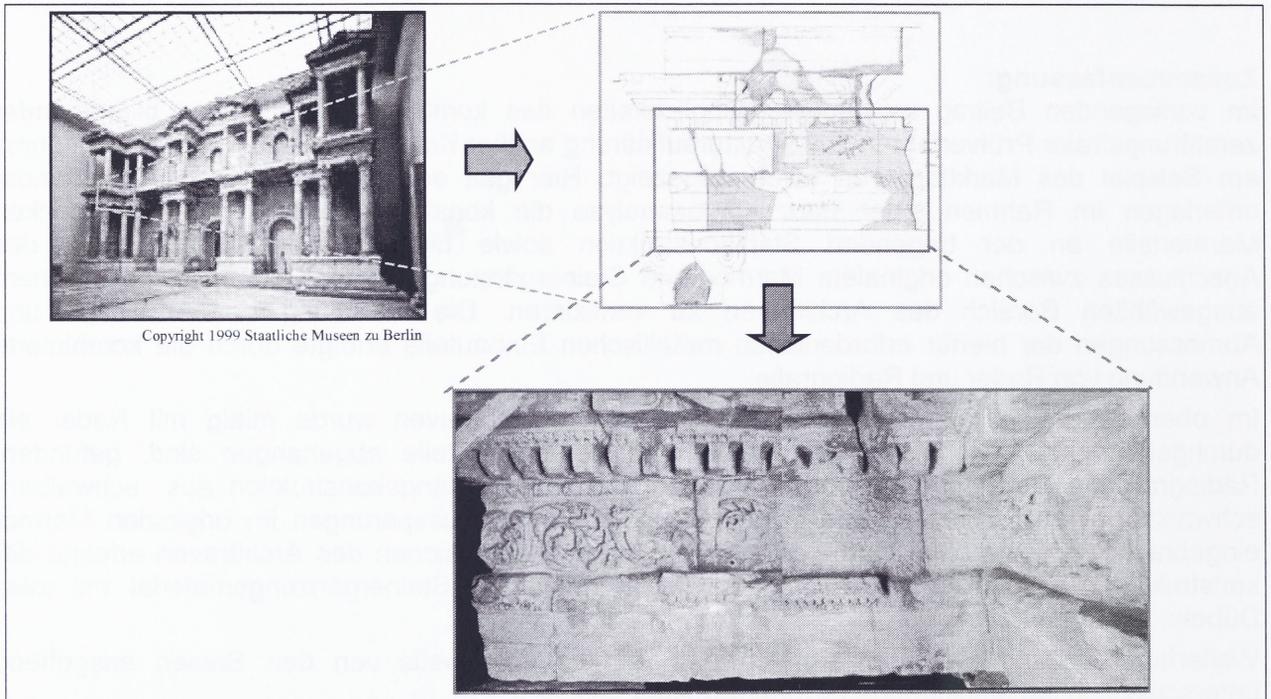


Bild 1: Räumliche Einordnung des untersuchten Bereiches am Markttor von Milet

2 Untersuchungskonzept

Das Untersuchungskonzept mit den angewandten zerstörungsfreien Prüfverfahren ist dem Bild 2 zu entnehmen.

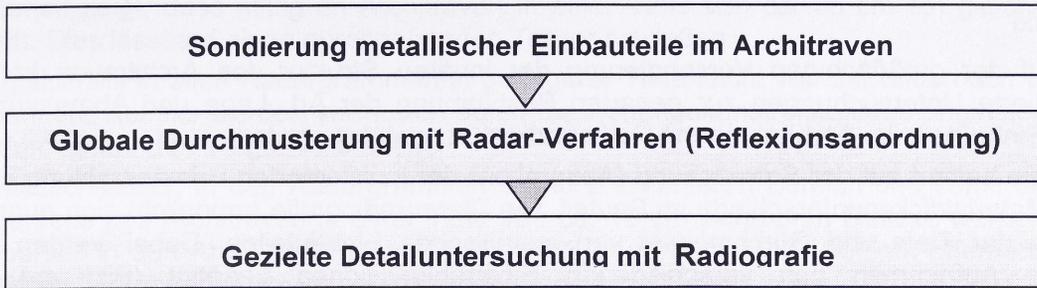


Bild 2: Untersuchungskonzept

2.1 Radar-Verfahren

Das zunächst eingesetzte Radar-Verfahren ermöglichte eine schnelle großflächige bildgebende Durchmusterung des Architraven zur Vorsondierung metallischer Einbauteile.

Das Messprinzip basiert auf der Reflexion kurzer elektromagnetischer Impulse an Materialgrenzschichten mit stark unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften wie dies insbesondere beim Übergang von Marmor bzw. Steinersatzmaterial zum Stahl hinreichend gegeben ist. Unter Berücksichtigung der Bauteildicke, der dreiseitigen Zugänglichkeit des Architraven, dem trockenen Zustand aller zu untersuchenden Bauteile und der geforderten hohen Ortsauflösung wurde das in einem Gehäuse integrierte 1,5 GHz-Antennenpaar (Sender und Empfänger) eingesetzt. Dieses wurde entlang eines Messrasters behutsam über die Bauteiloberfläche geführt. In den Bereichen mit starken Unebenheiten, beispielsweise bedingt durch Reliefs und Ornamente, wurde auf die Bauteiloberfläche eine Sperrholzplatte gelegt und darauf das Antennenpaar verfahren.

Das Verfahren des Antennenpaares entlang horizontal und vertikal verlaufender Messlinien ermöglichte die Aufnahme von Radargrammen (Bild 3a). In einem solchen Radargramm wird die Intensität der reflektierten Signale über den Verfahrweg des Antennenpaares und die Bauteiltiefe farbcodiert dargestellt (Bild 3b). Ein zylindrischer Reflektor (z. B. Rundstahl) wird aufgrund des Öffnungswinkels der Antenne als hyperbolisch verlaufende Diffraction im Radargramm abgebildet.

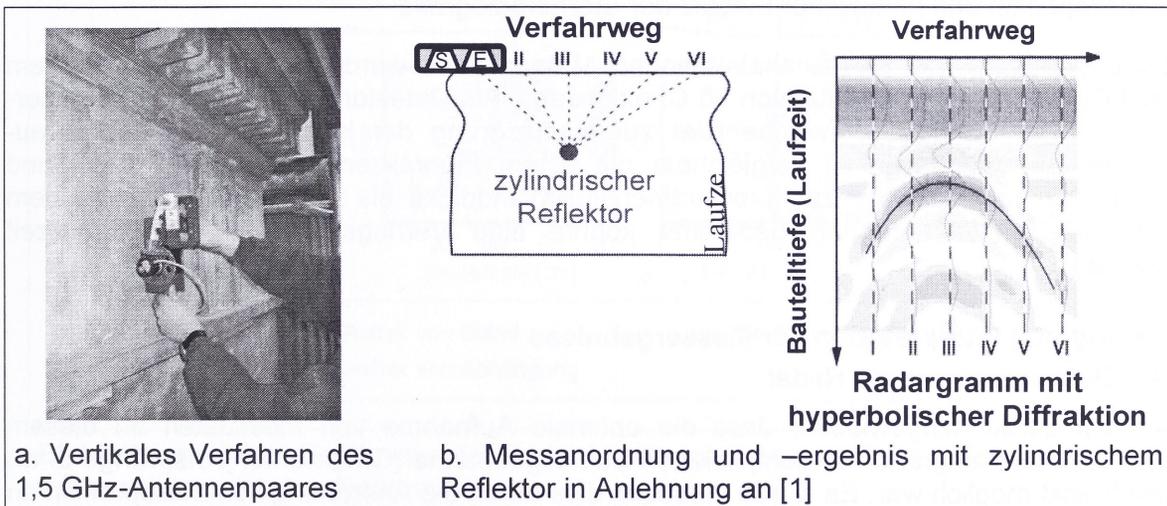


Bild 3: Messprinzip und praktischer Einsatz des Radarverfahrens in Reflexionsanordnung

Die Aussagefähigkeit der Radargramme kann bei Überlagerung vieler Reflexionen, bedingt durch die vielfältigen Inhomogenitäten im Bauteil (Hohlräume, Materialwechsel Marmor/Steinersatz, metallische Einbauteile), erheblich eingeschränkt werden. Erfahrungsgemäß können bei alleiniger Gefügeerkundung mit Radar mitunter keine eindeutigen und zweifelsfreien Aussagen getroffen werden [2]. Aufgrund dessen ist es empfehlenswert, die Aussagefähigkeit der Untersuchungen durch den Einsatz weiterer zerstörungsfreier Prüfverfahren zu verbessern.

2.2 Radiografie

Basierend auf der großflächigen Vorsondierung der inneren Struktur des Architraven können gezielt detaillierte Untersuchungen zur genauen Bestimmung der Art, Lage und Abmessungen metallischer Einbauteile im Architraven mit Radiografie durchgeführt werden.

Die Radiografie basiert auf der Schwächung (Absorption) der ionisierenden Primärstrahlung durch Dichte- und Materialdickenunterschiede im Bauteil. Die Stereoradiografie ermöglicht eine quantitative Messung der Tiefe und Durchmesser von metallischen Einbauteilen. Dabei werden zwei radiografische Aufnahmen aus verschiedenen Einstrahlpositionen benötigt (Bild 4a). Bei Einbauteilen mit komplizierter Geometrie sind oft auch zusätzlich Aufnahmeanordnungen aus weiteren Einstrahlpositionen notwendig. Die beschriebenen Aufnahmeprinzipien werden auch als Mehrwinkeltechnik bezeichnet.

Die Rekonstruktion der Lage und Größe des Einbauteils kann durch eine grafische oder computergestützte Rückprojektionstechnik erfolgen. Die Bilder 4b und 4c zeigen eine typische Aufnahmeanordnung.

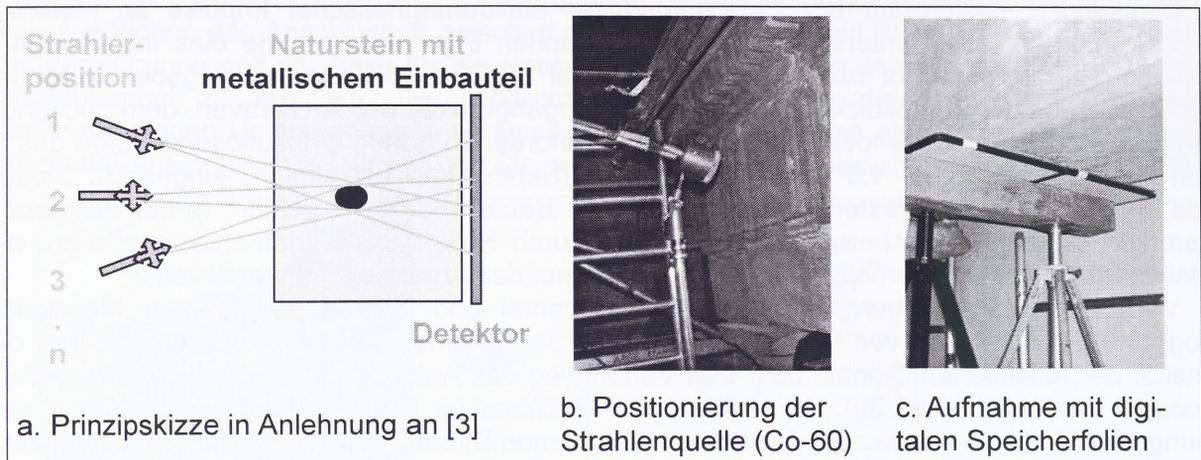


Abb. 4: Messprinzip und praktischer Einsatz der Stereoradiografie

Unter Berücksichtigung der zu durchstrahlenden Materialdicke wurde ein γ -Strahler mit dem Radionuklid Co-60 mit einer Aktivität von 35 Ci eingesetzt. Als Detektor dienten digitale Speicherfolien [4] mit einem Blei-Stahl-Zwischenfilter zur Reduzierung der kontrastmindernden Streustrahlung. Die Belichtungszeit ist vergleichbar mit einem Fluoreszenzschirm-Film-System und betrug in Abhängigkeit von der zu durchstrahlenden Wanddicke bis zu 1,5 h. Durch die dem Prüfproblem angepasste Aufnahmegeometrie konnte eine Verringerung der Belichtungszeit erreicht werden.

3 Auswertung und Interpretation der Messergebnisse

3.1 Globale Durchmusterung mit Radar

Einführend sei darauf hingewiesen, dass die optimale Aufnahme von Messdaten an diesem Untersuchungsobjekt aufgrund der komplizierten Bauteilgeometrie (Ornamente, Vorsprünge u. a.) nur eingeschränkt möglich war. Es wurde versucht, dies durch die Anordnung von Messprofilen an möglichst vielen ebenen Bereichen zu kompensieren. Weiterhin erschwerte der häufige Materialwechsel aufgrund des unterschiedlichen Absorptions-, Streuungs- und Reflexionsverhalten der Baustoffe die Auswertung.

Bild 5 zeigt exemplarisch vier beim Verfahren des Antennenpaares entlang ausgewählter vertikaler Messspuren auf der Oberfläche der Unterseite des Architraven gewonnene Radargramme. Ihre räumliche Zuordnung ist dabei über die Nummerierung der hervorgehobenen Messlinien möglich.

Eine vergleichende Betrachtung der Diffraktionen in den nebeneinander angeordneten Radarogrammen zeigt, dass mittig im Architraven in einer Tiefe von ca. 35 cm ein gleichartiger Reflex auftritt. Dies lässt auf einen durchgehenden Träger schließen.

Die gleichfalls in allen Radarogrammen in geringerer Tiefe leicht von der Mitte nach vorn versetzte erkennbare Reflexe werden vermutlich durch die Abhängekonstruktion des originalen Marmorteils am durchgehenden Träger verursacht.

Die ausschließlich in den Radarogrammen 1 und 2 im unteren Bereich und somit unweit von der Vorderseite des Architraven in einer Tiefe von ca. 10 cm sichtbaren Reflexe werden durch einen nur partiell in den Architraven einbindenden Träger verursacht. Er beginnt offensichtlich links an der Säule und endet 20 cm im originalen Marmorblock.

Der nur im Radarogramm 4 in der Nähe der Rückseite des Architraven in einer Tiefe von ca. 15 cm erkennbare Reflex lässt gleichfalls auf einen von rechts nur gering einbindenden Träger schließen.

Die in den Radarogrammen 1 und 2 in einer Tiefe von ca. 20 cm in der Nähe der Rückseite des Architraven auftretende Reflexe werden vermutlich durch Dübel hervorgerufen, die originalen Marmor mit Steinersatzmaterial verbinden.

Zusammenfassend sind die vorstehend aufgeführten Befunde der Radaruntersuchungen in der Untersicht maßstabsgetreu eingetragen. Es handelt sich wahrscheinlich bei allen Trägern um I-Profile. Die konstruktive Ausbildung der Abhängung war mit Radar nicht näher beschreibbar. Auch die Anzahl der Dübel konnte nicht genau bestimmt werden.

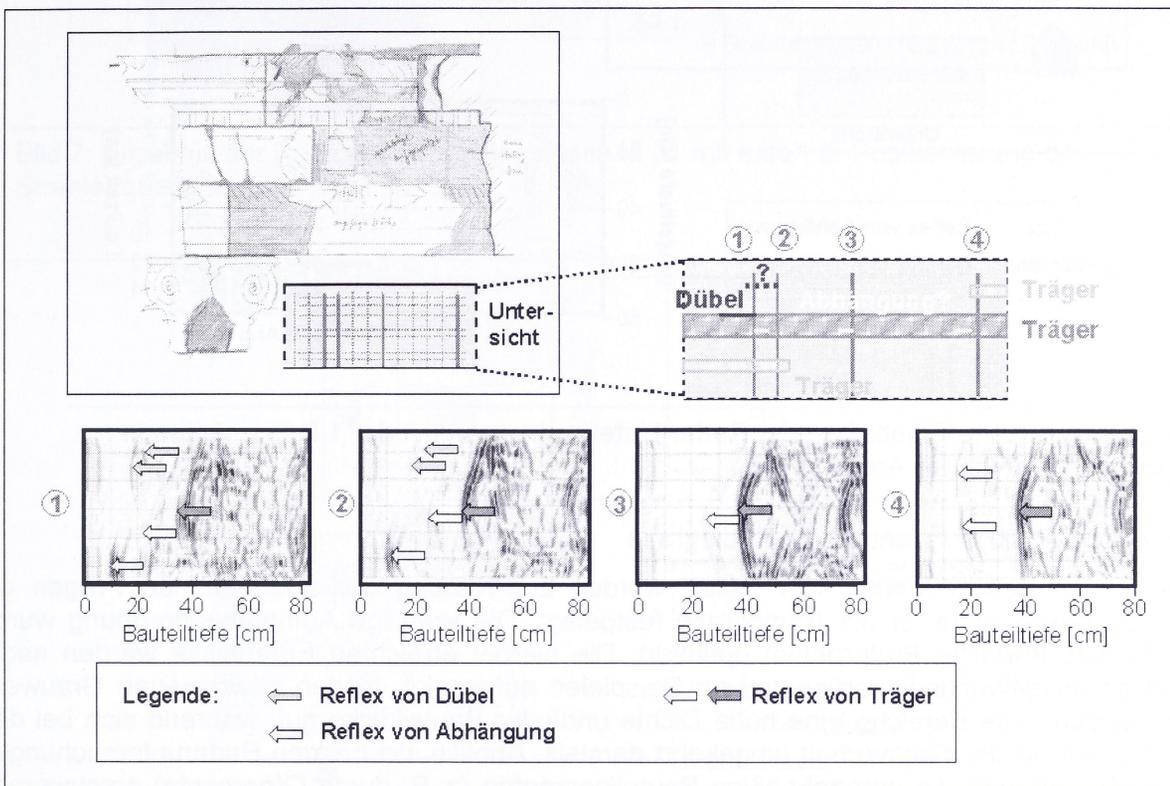


Bild 5: Ausgewählte Ergebnisse der Radar-Untersuchungen mit der 1,5 GHz-Antenne auf der Unterseite des Architraven

Bild 6 zeigt ausgehend von den bisherigen Radarergebnissen exemplarisch ein beim Verfahren des Antennenpaares entlang einer ausgewählten horizontalen Messspur auf der Oberfläche der Vorderseite des Architraven gewonnenes Radarogramm. Die dort auf der linken Seite in einer Bauteiltiefe von mindestens 20 cm erkennbaren Reflexe werden durch die in den Säulen durchlaufenden bereits vor den Untersuchungen bekannten L-förmigen Stahlprofile hervorgerufen. Die sich rechts anschließende Diffraktion in einer Tiefe von ca. 10 cm wird durch den bereits ermittelten von links in den Architraven einbindenden Träger verursacht (Bild 5).

Auffallend ist auf der rechten Seite im Radargramm die parallel zur Oberfläche des Architraven verlaufende große Diffraction in einer Tiefe von ca. 60 cm. Diese wird durch die Rückwand des Architraven hervorgerufen. Die am rechten Rand in einer Tiefe von 40 cm auftretende Diffraction wird durch den von rechts einbindenden Träger verursacht.

Die vor der starken Rückwandreflexion auftretenden kleineren Reflexe sind auf die Abhängkonstruktion des originalen Marmorblocks zurückzuführen.

Zusammenfassend sind auch hier die bei den Radar-Untersuchungen ermittelten Einbauteile maßstabsgetreu in der Vorderansicht des Architraven eingetragen. Angemerkt sei in diesem Zusammenhang, dass jedoch die exakte Profilart und die genauen Abmessungen der von links und rechts in den Architraven einbindenden Träger sowie die konstruktive Ausbildung der Abhängkonstruktion noch einer Klärung durch gezielte Detailuntersuchungen mit Radiografie bedürfen.

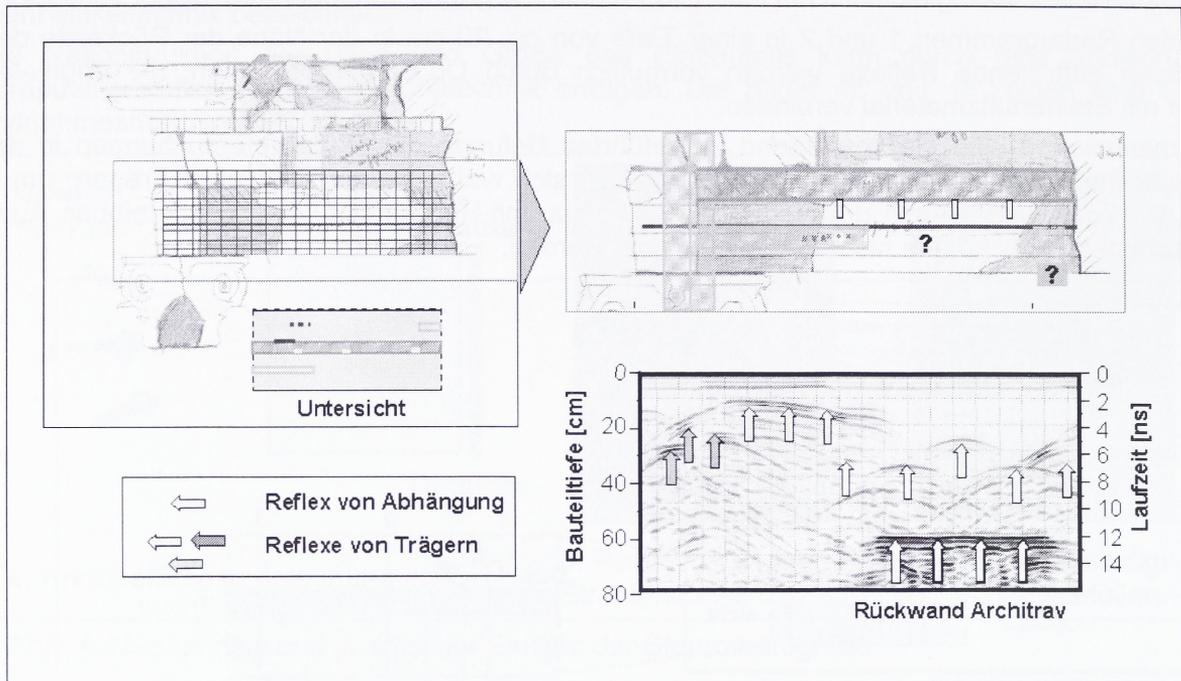


Bild 6: Ausgewählte Ergebnisse der Radar-Untersuchungen mit der 1,5 GHz-Antenne auf der Vorderseite des Architraven

3.2 Gezielte Detailuntersuchung mit Radiografie

Basierend auf den Befunden von Radar wurden zur Klärung der noch offenen Fragen die Untersuchungsbereiche für die Radiografie festgelegt. Die jeweilige Aufnahmeanordnung wurde dabei für das jeweilige Prüfproblem optimiert. Die hierbei erreichten Ergebnisse werden nachfolgend an ausgewählten repräsentativen Beispielen aufgezeigt. In den gewonnenen Grauwertbildern weisen helle Bereiche eine hohe Dichte und/oder Bauteildicke auf, während sich bei den dunklen Bereiche der Sachverhalt umgekehrt darstellt. Ähnlich wie bei den Radaruntersuchungen wirkte sich auch hier die unregelmäßige Bauteilgeometrie (z. B. durch Ornamente) erschwerend auf die Interpretation der Grauwertbilder aus.

Die Bilder 7 und 8 zeigen exemplarisch den rechten Endbereich des von der linken Säule aus in den Architraven einbindenden Trägers aus verschiedenen Betrachtungswinkeln. Zur Erreichung einer optimalen Aufnahmeanordnung wurde die Strahlenquelle außer- und innerhalb des Architraven positioniert. Dabei wurde darauf geachtet, dass der zu untersuchende Träger möglichst in der Nähe der Speicherfolien angeordnet ist. Aus einer Vielzahl von Aufnahmeanordnungen konnte durch Rekonstruktionsrechnungen die genaue Geometrie des Trägers ermittelt werden. Es ist in beiden Bildern deutlich zu erkennen, dass es sich um einen I-Träger handelt. Zum Bild 8 sei noch angemerkt, dass auf der linken Seite des oberen Flansches zusätzlich vertikal orientiert ein Flachstahl in Längsrichtung des Trägers angeordnet ist.

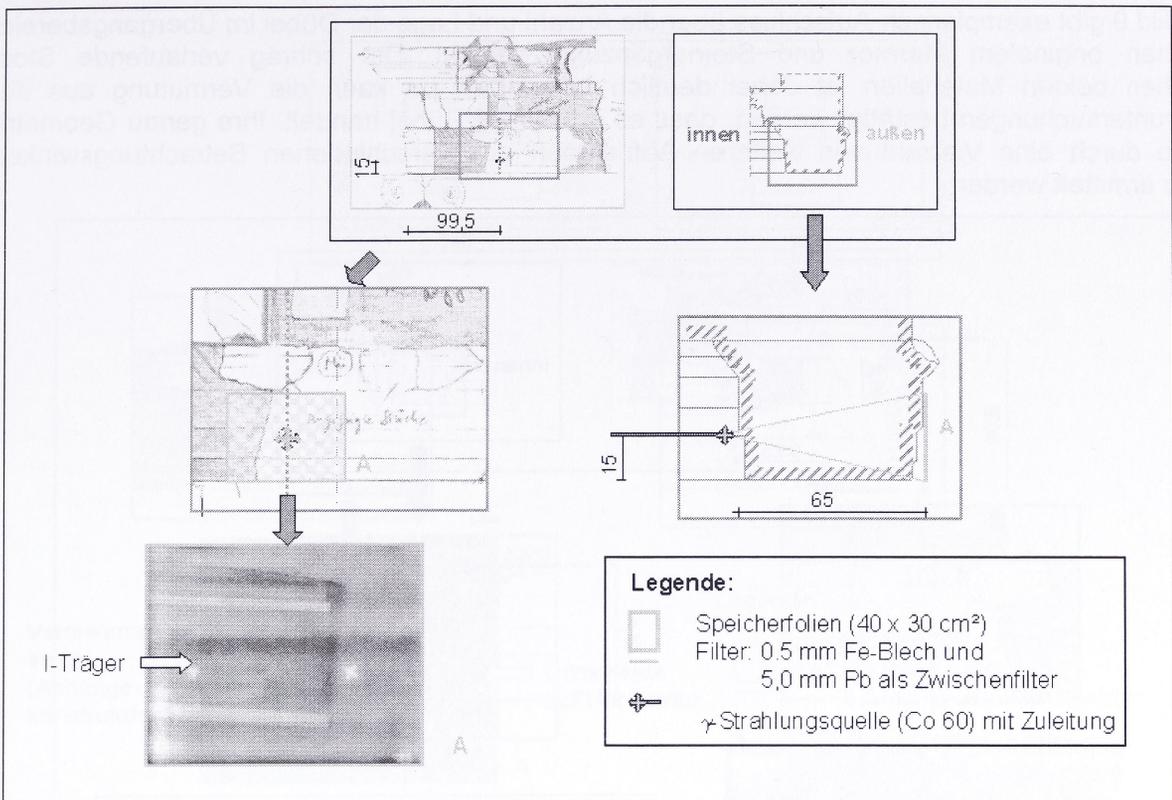


Bild 7: Ergebnis der Radiografie bei Messstelle M 31 mit externer Positionierung der Strahlenquelle

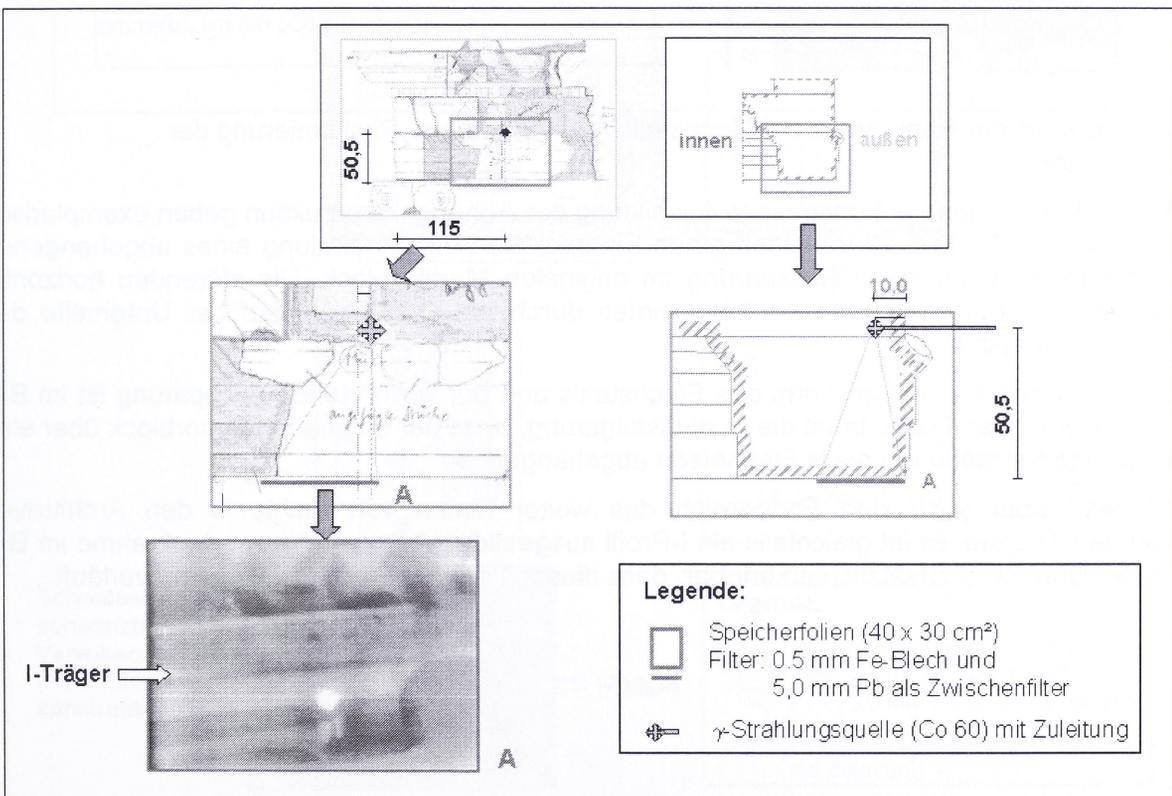


Bild 8: Ergebnis der Radiografie bei Messstelle M 11 mit interner Positionierung der Strahlenquelle

Das Bild 9 gibt exemplarisch Aufschluss über die Anzahl und Lage der Dübel im Übergangsbereich zwischen originalem Marmor und Steinerzänzungsmaterial. Der schräg verlaufende Stoss zwischen beiden Materialien ist dabei deutlich erkennbar. Es kann die Vermutung aus den Radaruntersuchungen bestätigt werden, dass es sich um 2 Dübel handelt. Ihre genau Geometrie konnte durch eine Vielzahl von weiteren Aufnahmen aus verschiedenen Betrachtungswinkeln genau ermittelt werden.

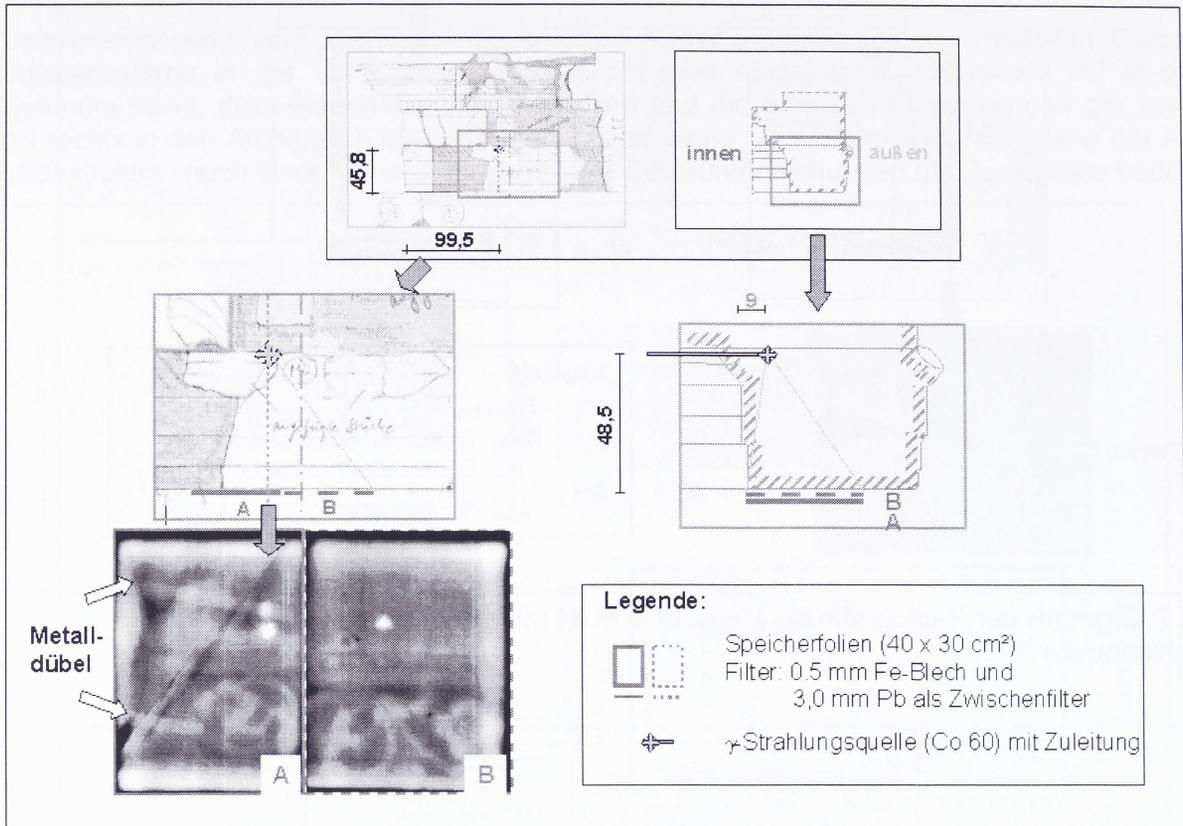


Bild 9: Ergebnis der Radiografie bei Messstelle M 6 mit interner Positionierung der Strahlenquelle

Aufschluss über die genaue konstruktive Ausbildung der Abhängekonstruktion geben exemplarisch die Bilder 10 und 11. Bild 10 vermittelt einen Eindruck von der Einbindung eines abgehängenen Flachstahls in die vermörtelte Aussparung im originalen Marmorblock. Die störenden horizontal verlaufenden Strukturen im Grauwertbild werden durch die Ornamente auf der Unterseite des Architraven verursacht.

Die schwalbenschwanzförmige Form des Flachstahls und der vermörtelten Aussparung ist im Bild 11 deutlich erkennbar. Das erlaubt die Schlussfolgerung, dass der originale Marmorblock über eine formschlüssige Verbindung mittels Flacheisen abgehängt ist.

Bild 11 zeigt aber auch den Endbereich des weiter hinten von rechts in den Architraven einbindenden Trägers. Er ist gleichfalls als I-Profil ausgebildet. Aus der Grauwertaufnahme im Bild 12 ist in der Draufsicht zusätzlich erkennbar, dass dieser Träger offensichtlich schräg verläuft.

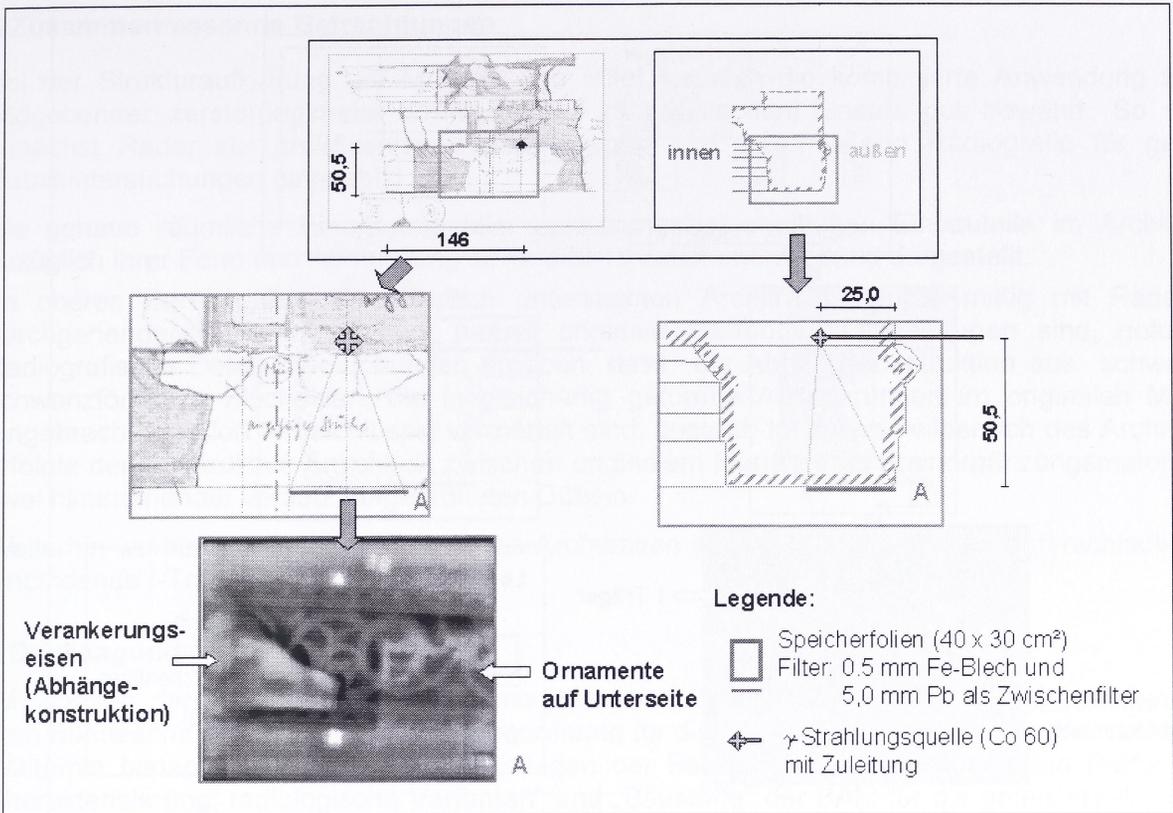


Bild 10: Ergebnis der Radiografie bei Messstelle M 18 mit interner Positionierung der Strahlenquelle

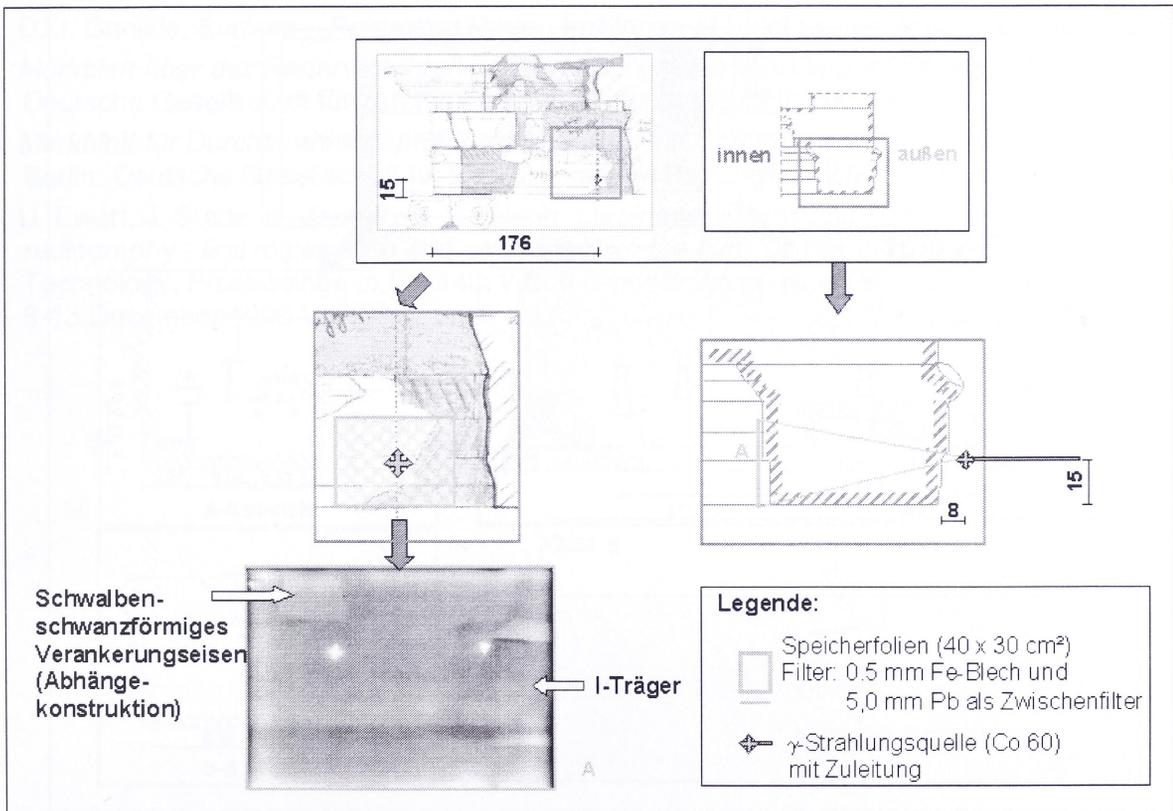


Bild 11: Ergebnis der Radiografie bei Messstelle M 32 mit externer Positionierung der Strahlenquelle

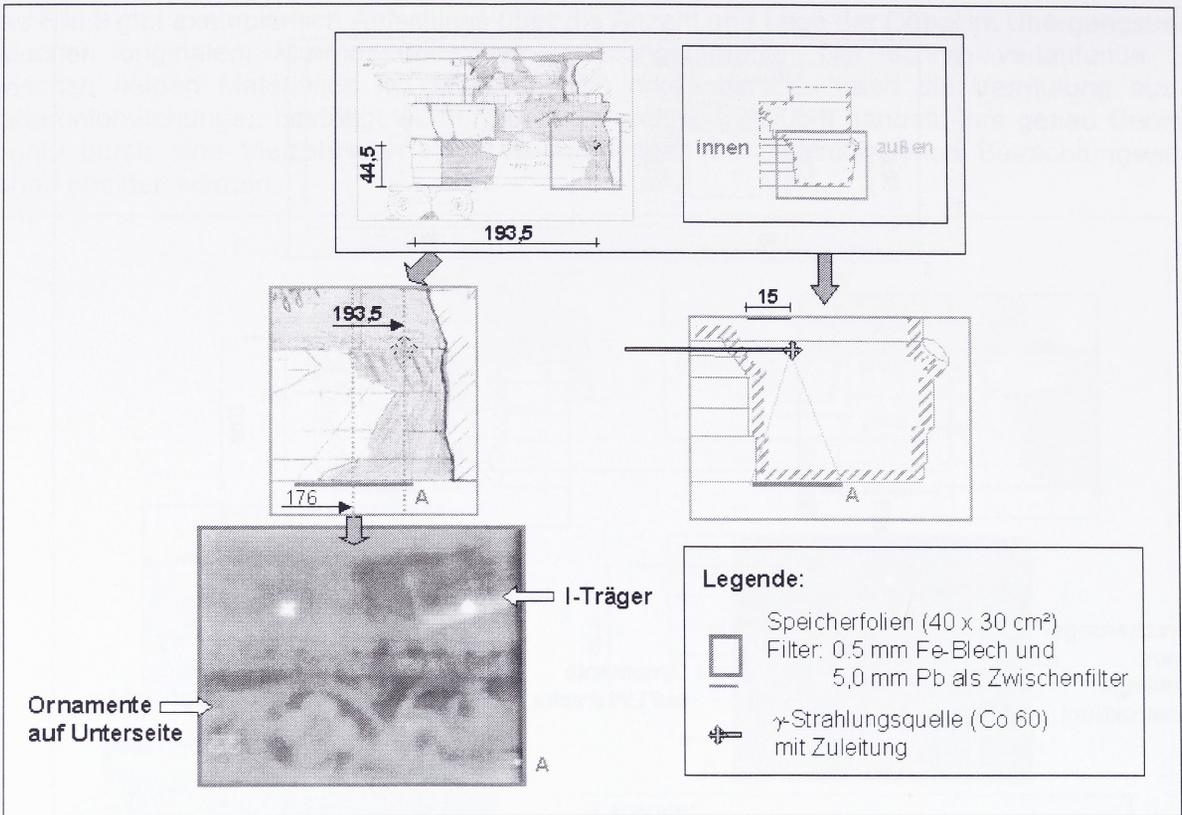


Bild 12: Ergebnis der Radiografie bei Messstelle M 32 mit externer Positionierung der Strahlenquelle

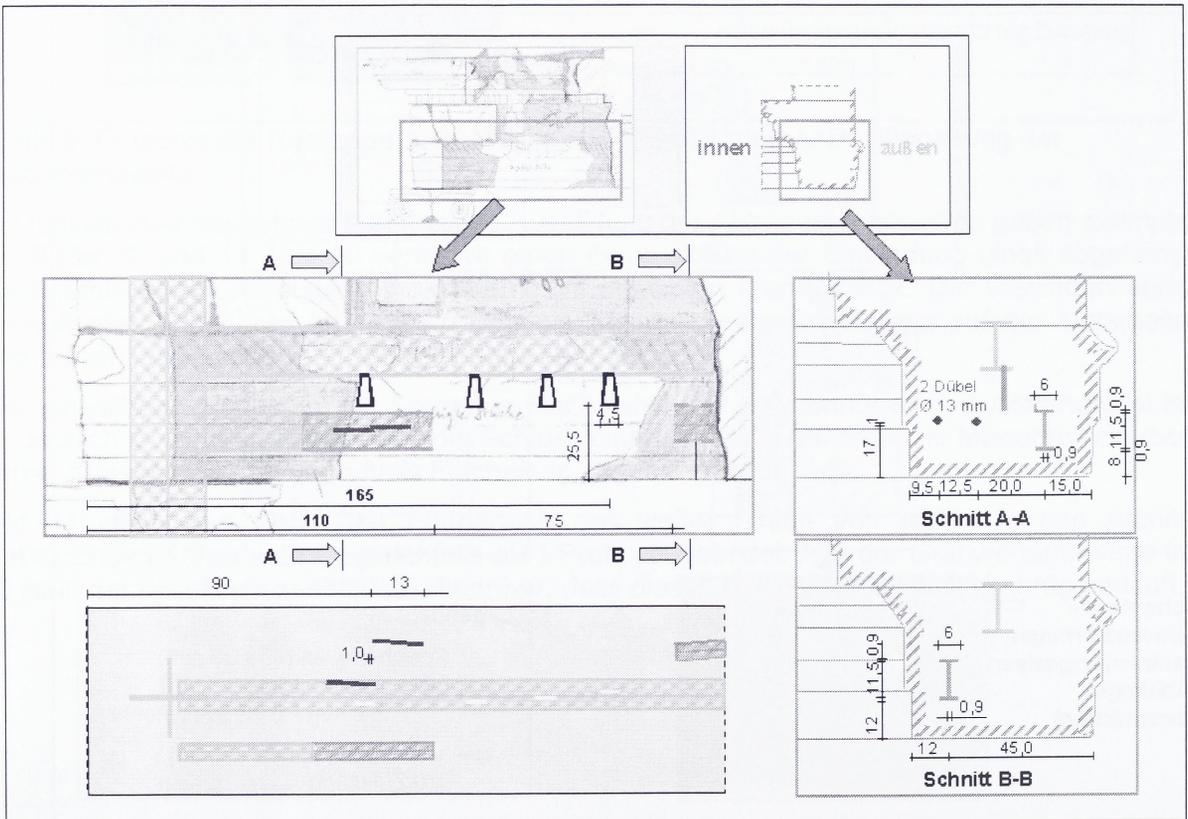


Bild 13: Rekonstruierte Lage aller metallischen Einbauteile im Architraven als Resümee des kombinierten Einsatzes zerstörungsfreier Prüfverfahren

4 Zusammenfassende Betrachtungen

Bei der Strukturaufklärung am Markttor von Milet hat sich die kombinierte Anwendung zweier bildgebender zerstörungsfreier Prüfverfahren im praktischen Einsatz gut bewährt. So wurde zunächst Radar zur großflächigen Vorsondierung und anschließend Radiografie für gezielte Detailuntersuchungen eingesetzt.

Die genaue räumliche Einordnung aller zerstörungsfrei ermittelten Einbauteile im Architraven zuzüglich ihrer Form und Abmessung ist im Bild 13 zusammenfassend dargestellt.

Im oberen Bereich des exemplarisch untersuchten Architraven wurde mittig mit Radar ein durchgehender I-Träger, an dem partiell originale Marmorteile abgehängt sind, gefunden. Radiografische Detailuntersuchungen ergaben, dass die Abhängekonstruktion aus schwalbenschwanzförmigen Flacheisen, die in gleichartig geformte Aussparungen im originalen Marmor eingebracht und dort formschlüssig vermörtelt sind, besteht. Im linken Teilbereich des Architraven erfolgte der konstruktive Anschluss zwischen originalen Marmor und Steinerfüllungsmaterial mit zwei hintereinander versetzt angeordneten Dübeln.

Weiterhin wurden im unteren Bereich des Architraven jeweils von den Säulen unterschiedlich tief einbindende I-Träger ermittelt.

5 Danksagung

Wir danken der ARGE Pfanner Pergamonmuseums für die interessante Aufgabenstellung und dem Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung für die finanzielle Unterstützung des Vorhabens. Weiterhin bedanken wir uns bei den Kollegen der Fachgruppen „Zerstörungsfreie Prüfung und Charakterisierung; radiologische Verfahren“ und „Baustoffe“ der BAM für die geleistete Arbeit und die hohe Einsatzbereitschaft bei den nächtlichen Messeinsätzen.

6 Literatur

1. D. J. Daniels, *Surface – Penetrating Radar*, Institution of Electrical Engineers, London, 1996
2. *Merkblatt über das Radarverfahren zur zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen (B 10)*, Berlin: Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), 2001
3. *Merkblatt für Durchstrahlungsprüfung von Stahl- und Spannbeton (B 1)*, Berlin: Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), 1990
4. U. Ewert, J. Stade, U. Zscherpel, K. Kaling, *Luminescence imaging plates in industrial radiography - first experience and comparison to the film*; Trends in NDE Science & Technology, Proceedings of the 14th World Conference on Non-Destructive Testing, New Delhi, 8-13 December 1996. Vol. 3, pp.1347 – 1350