

## **TERRAE MOTUS – REPARATUR UND PRÄVENTION. BAUEN IN DER ANTIKEN HAFENSTADT OSTIA**

### ***Zusammenfassung***

*Ostia liegt an der Tibermündung und war von fundamentaler Bedeutung für die antike Hauptstadt Rom. Als Hafenstadt war sie die repräsentative Fassade der Kapitale zum Mittelmeer und hatte als kommerzielles Zentrum und Umschlagplatz von Waren zu funktionieren. Die römische Stadt Ostia war auf sandigem Boden gebaut und regelmäßig von Überschwemmungen, Schwankungen des Grundwasserspiegels und Erdbeben betroffen. Zahlreiche Bauwerke waren hier auf ungünstigen Baugrundverhältnissen errichtet und wiederholt durch Hochwasser und Erdbeben beschädigt und anschließend repariert worden.*

### ***Abstract***

*Ostia lies at the mouth of the Tiber river and was of fundamental importance for the ancient capital Rome. As portual city, it was the representative facade of the capital towards the Mediterranean Sea and had to function as a commercial centre and transshipment point for goods. The Roman city of Ostia was built on sandy ground and was regularly affected by floods, fluctuations in the water table and earthquakes. Numerous buildings were erected here on unfavourable ground conditions and repeatedly damaged by floods and earthquakes and subsequently repaired.*

## Einleitung

Seit der Antike sind mehrere Standorte am Mittelmeer bekannt, die – wie Ostia – vom Phänomen der Erdbeben geprägt sind. In Ostia sind aber auch viele verschiedene Ansätze für Reparaturmaßnahmen am Mauerwerk belegt. Bis heute kann man daran ablesen, wie in verschiedenen Bereichen des Bauens versucht wurde, den Widrigkeiten der Bodenbeschaffenheit entgegenzuwirken. Das Erkennen einer historischen Reparatur als mögliche präventive Lösung erfordert eine historisch-archäologische und strukturelle Analyse.

Dieser Beitrag basiert auf dem Habilitationsprojekt der Verfasserin,<sup>1</sup> welches sich an der Archäoseismologie<sup>2</sup> und der antiken Bautechnik orientiert. Die direkte Analyse vor Ort, die Archivarbeit, die Grabungsberichte, die Stratigrafie, die Bautechnik und insbesondere die Mechanik des Mauerwerks sind aktuelle Werkzeuge dieser Projektentwicklung. Ein Cross-Checking der neuesten Informationen (archäologische, geophysikalische, geologische, archäologische und seismologische) wird derzeit durchgeführt, um markante Momente der Stadtentwicklung in Zusammenhang mit Naturkatastrophen zu bringen. Da bei den Altgrabungen in Ostia keine den heutigen Anforderungen gerecht werdende Dokumentation und sachlich kritische Strukturanalyse durchgeführt wurde, die den Ablauf der erdbebenbedingten Einsturzkatastrophen von Gebäuden sowie die nachfolgende Verschüttung der Bereiche geklärt hätte, muss man heute die wiederaufgebauten Strukturen als Gesamtzustand von den antiken bis zu den modernen Veränderungen diachron analysieren. Um ein objektives Identifikationskriterium des seismogenen Ursprungs der beobachteten Schäden und Reparaturen bereitzustellen,

<sup>1</sup> Habilitationsprojekt mit dem Titel *Präventiver Erdbebenschutz und historische Reparaturen von Mauerwerk. Drei Fallstudien: Piccolo Mercato, Capitolium und Insula del Serapide e degli Aurighi (Ostia)*, finanziert durch die Gerda Henkel Stiftung: [https://lisa.gerda-henkel-stiftung.de/der\\_puls\\_der\\_erde?nav\\_id=7556](https://lisa.gerda-henkel-stiftung.de/der_puls_der_erde?nav_id=7556) (21. März 2018). Die Verfasserin dankt der Soprintendenza Speciale per il Colosseo, dem Museo Nazionale Romano e l'Area archeologica di Roma (Parco Archeologico di Ostia Antica) für den Zugang zu den Archiven sowie der Gerda Henkel Stiftung für die ständige Unterstützung, ohne die die Entwicklung dieser Forschung nicht möglich gewesen wäre.

<sup>2</sup> Informationen zu Erdbeben aus der Vergangenheit stammen vor allem aus schriftlichen Quellen, deren Auslegung in seismologischer Sicht auf der Ausarbeitung eines modernen parametrischen Erdbebenkataloges liegt (Guidoboni, Emanuela; Ferrari, Graziano; Mariotti, Dante u. a.: *CFTI5Med. Catalogo dei Forti Terremoti in Italia (461 a.C.-1997) e nell'area Mediterranea (760 a.C.-1500)*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). 2018; <https://doi.org/10.6092/ingv.it-cfti5> [April 2018]). Aufgrund der spärlichen Quellen kann das Wissen über die seismische Geschichte des Altertums und des Mittelalters nur durch den Einsatz weiterer Untersuchungsmethoden verbessert werden: Sintubin, Manuel: *Archaeoseismology: Past, present and future*. In: *Quaternary International* 242 (2011), Issue 1, S. 4–10. Aus diesem Grund werden historische Informationen oft von archäologischen und geologischen Daten ergänzt: Hinzen, Klaus G.: *Archäoseismologie: auf der Suche nach Spuren vorinstrumenteller Erdbeben*. Schöningh 2011; Stiros, Stathis: *Identification of earthquakes from archaeological data: methodology, criteria and limitations*. In: Stiros, Stathis; Jones, R. (Hg.): *Archaeoseismology* (Fitch Laboratory Occasional Paper 7). Oxford 1996, S. 129–152; Galadini, Fabrizio; Hinzen, Klaus G.; Stiros, Stathis: *Archaeoseismology: Methodological issues and procedure*. In: *Journal of Seismology* 10 (2006), Issue 4, S. 395–414; Guidoboni, Emanuela: *Historical Seismology as an instrument for the knowledge on the earthquake effects on historical buildings*. In: Guevara, Teresa (Hg.): *Memorias. Ponencias presentadas en el Curso internacional protección del patrimonio construido en zonas sísmicas*. Caracas 2000, S. 159–178.

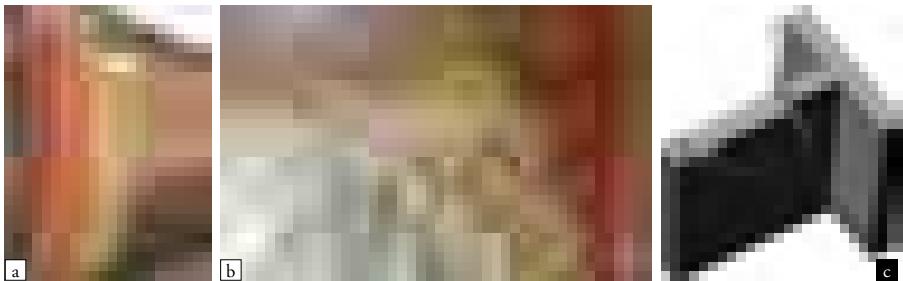


Abb. 1 Die seismischen Effekte im Vergleich zwischen Ostia Antica (a) und Pompeji (b); die Simulation der unsichtbaren Bögen unter seismischen Einwirkungen und ihr 3D-Modell (c) verdeutlichen die zwei Komponenten von Umsturz und Schleppen

wurde eine Strukturanalyse an beschädigten Gebäuden anhand der Prinzipien der Bogenmechanik durchgeführt. Bei der Auswertung<sup>3</sup> konnte festgestellt werden, dass das Umkippen von Wänden die häufigste Art des Einsturzes ist, was ein weitverbreitetes Schadensbild ergibt, unter anderem erzeugt durch die Effekte der seismischen horizontalen Einwirkungen.<sup>4</sup> Abb. 1 zeigt die Simulation der unsichtbaren Bögen unter seismischen Einwirkungen (a–b) und ihr 3D-Modell (c) mit den zwei Komponenten von Umsturz und Schleppen.

## Stadtentwicklung und Naturkatastrophen

Nach Phasen langsamen Stadtwachstums waren die ersten beiden nachchristlichen Jahrhunderte von einer starken Expansion geprägt. Eine wichtige Rolle bei der Stadtentwicklung spielten sowohl die alluviale Beschaffenheit des Bodens als auch die Veränderungen des Gleichgewichts im System Land-Fluss-Meer, beeinflusst vom Phänomen der Küstenlinienerosion. Die Veränderungen des Flusses Tiber im Stadtgebiet von Ostia werden in Abb. 2 verdeutlicht.<sup>5</sup>

Die Stadtpläne von Domitian, Augustus und Hadrian haben durch spekulative Baumaßnahmen zweifellos einen großen Einfluss auf das Stadtbild gehabt.<sup>6</sup> Städtebaupläne müssen auch das tägliche ‚Zusammenleben‘ mit Naturkatastrophen berücksichtigen und daher die kontinuierliche Wartung und Instandsetzung von Gebäuden vorsehen.

Diffuse Einstürze, die sowohl Zivil- als auch Monumentalgebäude betroffen haben, können unterschiedlichen Ursachen zugeschrieben werden, wie Überschwemmungen, Schwan-

<sup>3</sup> In Zusammenarbeit mit Ing. Giovanni Cangi, CNR – Rom.

<sup>4</sup> Pecchioli, Laura; Cangi, Giovanni; Marra, Fabrizio: *Evidence of seismic damages on ancient Roman buildings at Ostia: An arch mechanics approach*. In: Journal of Archaeological Science, Reports 21 (2018), S. 117–127.

<sup>5</sup> Giraudi, Carlo; Tata Christiana; Paroli Lidia: *Late Holocene evolution of Tiber River delta and geoarchaeology of Claudius and Trajan harbor*, Rome. Geoarchaeology 24 (2009), S. 371–382.

<sup>6</sup> Boin, Douglas R.: *Ostia in late antiquity*. Cambridge u.a. 2013.



Abb. 2 *Der Tiber und seine Veränderungen im Stadtgebiet von Ostia*

kungen des Grundwasserspiegels und Erdbeben. Während der Römischen Republik und des Imperiums sind bedeutende Fortschritte im Bauwesen und in der Bautechnik entwickelt worden. Viele grundlegende Elemente der angewandten Bautechnik erwiesen bereits eine hohe seismische Belastbarkeit.

Naturkatastrophen haben in dieser antiken Stadt nicht nur zu Renovierungs- oder Wieder- aufbauphasen geführt, sondern auch zu Bauspekulation und deren Einfluss auf die Qualität der Gebäude. Die hohe Vulnerabilität der Gebäude<sup>7</sup> spielte eine wesentliche Rolle bei der Zunahme der Schäden durch seismische Erschütterungen. Bei der Beurteilung der Wider- standsfähigkeit gegen Erdbeben oder der Vulnerabilität muss man berücksichtigen, dass jeder Wohnblock Ostias in seiner physischen Beziehung zu den umstehenden Häusern ausgewertet werden muss. Daher ist es notwendig, die Rissbilder wie eine ‚Übertragung‘ der seismischen Einwirkung zu bewerten. Aus diesem Grund werden im Rahmen des Entwicklungsprojekts konkrete und gut erhaltene Fallbeispiele und die Stadt in ihrer globalen urbanen Form untersucht.<sup>8</sup>

Eine interessante Tatsache in diesem Zusammenhang ist die Erhöhung des Straßenniveaus,<sup>9</sup> teilweise sogar ganzer Wohngebiete, welche in den städtebaulichen Eingriffen vorgesehen war. Die verschiedenen Höhenlagen der Straßen<sup>10</sup> sind vielleicht auch auf die Schaffung einer Schicht zurückzuführen, die in der Lage sein sollte, die neuen Fundamente aufzunehmen oder die Stabilität bei der Wiederverwendung des Fundaments zu erhöhen.<sup>11</sup>

## Historische Grabungsnotizen

Restaurierungen in Ostia wurden Anfang des 20. Jahrhunderts zum Teil noch ohne wissenschaftliche Methoden vorgenommen. Eine entsprechende Aufarbeitung fehlt bis heute. Die Grabungsberichte von 1907 bis 1924 sind die primäre Quelle unseres Wissens über verwendete Materialien und angewandte Arbeitsmethoden. Zwischen den Jahren 1938 und

<sup>7</sup> Die ständige Überschwemmung durch den Fluss trug sicherlich zu einem Erosionsphänomen bei, das die Vulnerabilität der Stadt bereits in der Antike verstärkt hat.

<sup>8</sup> Ciaburri, Nicola: *La forma come resistenza sismica, una città ricostruita dopo il terremoto del 1688*. Cerreto Sannita 2017.

<sup>9</sup> Heinzelmann, Michael: *Zur Entwicklung der Gelände- und Straßenniveaus in der Nekropole vor der Porta Romana*. In: Mededelingen van het Nederlands Instituut te Rome 58 (1999), S. 84–89.

<sup>10</sup> Dieses Phänomen scheint geplant gewesen zu sein, einerseits zum Schutz vor Flusswasser und der Erhöhung des Grundwasserspiegels, andererseits zur Stabilisierung des Überschwemmungsgrundes, um einen besseren Baugrund für mehrstöckige Gebäude zu schaffen. Jansen, Gemma C. M.: *Die Wasserversorgung und Kanalisation in Ostia Antica. Die ersten Ergebnisse*. In: Spangenberg, Hans-Dieter (Hg.): Frontinus-Tagung 1994 in Zürich und weitere Beiträge zur historischen Wasserwirtschaft (Schriftenreihe der Frontinus-Gesellschaft, Bd. 19). Bonn 1995, S. 111–123.

<sup>11</sup> Pavolini, Carlo: *Per un riesame del problema di Ostia nella tarda antichità: indice degli argomenti*. In: Ferrandes, Antonio F.; Pardini, Giacomo (Hg.): Le regole del gioco. Tracce Archeologici Racconti. Studi in onore di Clementina Panella (Lexicon topographicum urbis Romae, Bd. 6). Rome 2016, S. 385–405.



Abb. 3 Historische Aufnahme der Ausgrabungen in Ostia (1911); ursprüngliche Position des Zusammenbruchs einer Säule des Capitoleums

1941 wurden im Hinblick auf die geplante Weltausstellung von 1942 abermals weitläufige Ausgrabungen durchgeführt, die weitere Denkmäler zutage brachten. Diese eilig durchgeführten Grabungen haben die Ausgrabungsfläche der antiken Stadt Ostia verdoppelt, wobei jedoch viele Informationen verloren gingen. Seit dem Ende des Zweiten Weltkrieges konzentrierten sich die Arbeiten vorwiegend auf die zusätzliche Untersuchung des freigelegten Baubestandes sowie deren Dokumentation und Instandhaltung. Auf Basis der umfangreichen Fotodokumentation der Altgrabungen lässt sich jedoch oftmals auch heute noch der Fundort der Bauteile rekonstruieren (Abb. 3). Aus Rissen und anderen Merkmalen in den Ruinen lässt sich ableiten, dass die Versetzung von Bauteilen auf die Auswirkung von Erdbeben zurückzuführen ist. Aufgrund historischer Grabungsnotizen kann das dynamische Verhalten der eingestürzten Gebäude beschrieben werden. Wichtige Quellen sind das Ausgrabungsjournal *Notizie Scavo* (NSc) und die *Quindicina* von 1895 bis 1924. Unter anderem enthalten sie eine Hypothese von Rodolfo Lanciani (1845–1929) zur Interpretation früherer



*Abb. 4 Rodolfo  
Lanciani, Tage-  
bücher der Jahre  
1914–1919*

Erdbebenschäden: Der Archäologe war auf dem Gebiet der Archäologie und der Seismologie ein Vorreiter seiner Zeit.<sup>12</sup> Seine Notizen sind nicht vollständig, aber sie reichen aus, um die Hypothese seismischer Ereignisse und die mögliche Dynamik des Zusammenbruchs zu stützen<sup>13</sup> (Abb. 4).

## Geomorphologische/seismische Untersuchungen

Ein wichtiger Aspekt bei der Reaktion eines Gebäudes auf seismische Erschütterungen ist die geologische Beschaffenheit des Bodens: Alluviale Böden charakterisieren Ostia. Durch

<sup>12</sup> Ende des 19. Jahrhunderts bis zur ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts.

<sup>13</sup> Diese Hypothese gilt nicht nur für den Palazzo Imperiale, sondern auch für andere Ostia-Kontexte.

seismische Messungen sogenannter Standorteffekte<sup>14</sup> können wir heute sagen, dass kein Phänomen der Amplifikation festgestellt werden konnte. Diese seismischen Vermessungen der geologischen Untersuchungsflächen wurden mittels Sensoren an einigen Punkten der antiken Stadt Ostia und in Portus<sup>15</sup> durchgeführt. Dabei wurden die stratigrafischen Daten und die Verstärkungsstufe des Erdbebens erfasst, wodurch die bisherigen Einschätzungen bezüglich der Dicke der alluvialen Sedimente in Ostia (circa 30 Meter) bestätigt werden konnten. Allerdings ließen sich die beobachteten Schäden nicht ausreichend durch lokale Amplifikationsphänomene erklären. Es scheint daher möglich, dass die Bewegung einer Verwerfung durch seismogene Erscheinungen begleitet wurde, die auch für die Schäden an den Gebäuden von Ostia verantwortlich sind. Bereits die sorgfältige geomorphologische Rekonstruktion von



Abb. 5 Abschnitte alluvialer Sedimente und die Verwerfung in Richtung West-Südwest/Ost-Nordost

<sup>14</sup> Durch die Analysen zum Standorteffekt lassen sich vor allem zwei Dinge herausfinden: zum einen, ob der Boden Schwingungen verstärkt und zum anderen, in welchen Frequenzen. Diese Frage ist maßgeblich, denn wenn bei einem Erdbeben diejenigen Frequenzen vom Boden verstärkt werden, die ähnlich den Frequenzen sind, mit denen ein Gebäude schwingt, kann es einen Resonanzeffekt geben. Dann kann das Gebäude schwere Schäden erleiden, weil dabei genau die Frequenzen verstärkt werden, auf die das Gebäude am besten anspricht. Durchgeführt in Zusammenarbeit mit einer Forschungsgruppe vom INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – Rom).

<sup>15</sup> „Portus Romae: Portus hat eine bedeutende Rolle für die Versorgung der Stadt Rom gespielt. Nachdem der alte, südlich gelegene Hafen von Ostia allmählich versandet war, ließ Kaiser Claudius Mitte des 1. Jahrhunderts nach Christus einen neuen Hafen errichten, Portus Romae genannt, und verband diesen durch einen Kanal mit dem Tiber, was die Versorgung sicherte.“

Fabrizio Marra<sup>16</sup> im Jahr 2019 kommt zu folgendem Ergebnis: Eine Verwerfung in Richtung West-Südwest/Ost-Nordost an der Nordgrenze der Stadt war schon in der Vergangenheit ›aktiv‹ (Abb. 5).

## Historische Reparaturen als präventive Maßnahmen

Die Römer konnten mit präventiven Maßnahmen eine zielgerichtete statische Anpassung der Strukturen erreichen. Die Konstruktionsphilosophie der antiken Römer besagte, je ›massiver‹ eine Konstruktion ist, desto mehr Belastungen aller Arten, einschließlich Erdbeben, kann sie widerstehen. Mit diesem Konzept geht die solide statische Verbindung von orthogonalen Wänden durch vertikale Verstärkung einher.

Diese Präventivmaßnahmen mussten in verschiedenen Bereichen des Gebäudes umgesetzt werden: bei Verbindungen statischer Elemente im Fundament und bei der Qualitätsverbesserung des Mauerwerks. Die Verwendung der Materialien, ihrem Eigengewicht und ihren mechanischen Eigenschaften entsprechend,<sup>17</sup> waren in der Antike erworbene Wissen.<sup>18</sup>

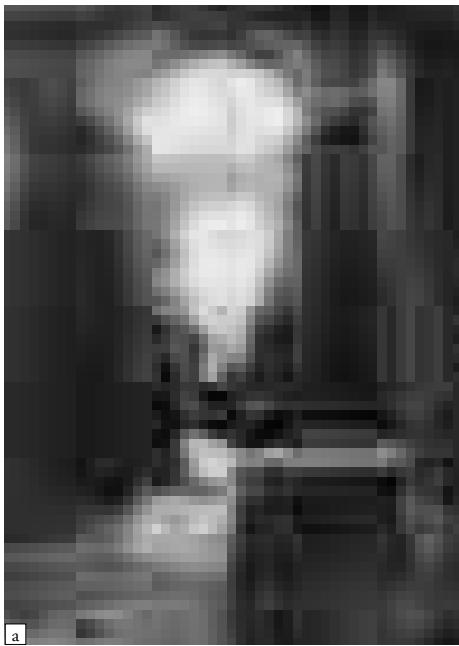
Die Bautechnik der republikanischen Zeit Roms weist Beispiele von Verstärkungen wie Ecken und Fundamente an einigen Gebäudeteilen auf, um deren Festigkeit zu erhöhen. In Pompeji, wo es vor dem Erdbeben im Jahr 62 viele Gebäude ohne diese Eckenverstärkungen gab, konnte man feststellen, dass derartige Eingriffe nach diesem Zeitpunkt systematisch vorgenommen wurden. Auch die sorgfältig ausgearbeiteten Eckenverstärkungen bei senkrecht zueinanderstehenden Wänden, wie sie üblicherweise in Rom (auch in Ostia) und ganz Lazio auftreten, gehören zu diesem Phänomen.

Das typische Schachbrettmuster der römischen Siedlung in Ostia hat wahrscheinlich eine entscheidende Rolle bei der Auswirkung der Schäden gespielt. Die geometrische Anordnung der Stadt hat die Richtung der Verformungen beeinflusst. Um eine seismische Reaktion und deren Auswirkungen besser zu verstehen, ist es notwendig, den gesamten Wohnblock und

<sup>16</sup> Marra, Fabrizio; Milana, Giuliano; Pecchioli, Laura u.a.: *Historical faulting as the possible cause of earthquake damages in ancient Ostia (Rome, Italy): a combined structural, seismological and geological analysis*. In: Pecchioli, Laura; Panzera, Francesco; Poggi, Valerio (Hg.): Cultural heritage and Earthquakes: bridging the gap between Geophysics, Archaeoseismology and Engineering. In: Journal of Seismology 24 (2020), S. 725–728. <https://doi.org/10.1007/s10950-020-09936-1> (18.06.2020).

<sup>17</sup> Bianchini, Marco: *Le tecniche edilizie nel mondo antico*. Roma 2010.

<sup>18</sup> Giuliani, Cairoli Fulvio: *Provvedimenti Antisismici Nell'antichità*. In: Rivista Di Topografia Antica 21 (2011), S. 25–52. Atti Del VII Congresso Di Topografia Antica, Parte III (2012), Galatina (Le): Congedo. Im Pantheon beispielweise wurden alle konstruktiven und baustofflichen Details mit großer Kreativität und Erfahrung geplant und ausgeführt. Insbesondere besteht die Kuppel aus abgestimmten Leichtbeton, deren Zusammensetzung offensichtlich mit dem Ziel gewählt wurde, die Belastung durch das Eigengewicht zu minimieren. Es verdeutlicht die damals bereits weit entwickelten Kenntnisse im Umgang mit dem ›Opus Caementitium‹; Thienel, Karl-Christian; Peck, Martin: *Die Renaissance leichter Betone in der Architektur*. In: Zement+Beton 4 (2007), H. 10, S. 2–9.



[a]

*Abb. 6 a) Beispiele von Bewehrungsbögen (Angiporto von Casa di Diana, Reg. I) und b) Sturzbögen in Caseggiato degli Aurighi; die Bewehrungsbögen zwischen Gebäuden widerstehen den Stößen der tragenden Wände, mit denen sie verbunden sind: ihre Funktion besteht darin, jeder Bewegung von Gebäuden oder Gebäudeteilen entgegenzuwirken*



[b]

die strukturellen Beziehungen zu seiner Umgebung (Abstände zu anderen Gebäuden, Art der Durchgänge, Art der Schubstrukturen<sup>19</sup> usw.) zu bewerten, noch bevor der spezifische Fall<sup>20</sup> analysiert wird. In Ostia sind überall tragende Bögen, Angiporti (Bewehrungsbögen; Abb. 6a), Ecken- und Tragwerksverstärkungen zu finden: In einem mehrstöckigen Wohngebäude, wie in Caseggiato degli Aurighi (Reg. III), ist im zweiten eingezogenen Sturzbogen ein Beispiel für die Ableitung der Kräfte in die Mauer zu sehen. Die Eckenverstärkung der Struktur und der zweite eingezogene Sturzbogen leiten die Kräfte in die Fundamente ab. So stellt er sich der horizontalen Kraft bei einem Erdbeben entgegen (Abb. 6b).

Bemerkenswert ist auch die weitverbreitete Verwendung der ›Pilae lapideae‹, Säulen, die aus mehreren Blöcken unterschiedlicher Anordnung bestehen, zeitgleich mit dem ›Opus reticulatum‹.<sup>21</sup> Dieses Konstruktionssystem konnte mit der Säulentrommel verknüpft werden: Sie ist normalerweise ein Segment eines Säulenschaftes, der aus mehreren Teilen, den sogenannten Trommeln, zusammengesetzt ist und kompensiert gewissermaßen die seismische Wirkung durch die fortschreitende Verschiebung der Blöcke.

Aus Untersuchungen der letzten Jahre lassen sich weitere interessante Reparaturen aus der Antike erkennen, beispielsweise der Einsatz von Bleiplatten an der Basis von Säulen. Leider ist diese präventive Lösung nur vereinzelt erhalten, wie zum Beispiel bei der Wiedererrichtung des Portikus am Foro delle Statua Eroica.<sup>22</sup> Das durch ein Erdbeben abgesunkene Fundament wurde mittels einer asymmetrischen Bleieinlage repariert (Abb. 7).<sup>23</sup>

Beachtlich ist in Ostia der Einsatz der Mauerwerkstechnik des ›Opus mixtum‹. Als Bau-technik war es besonders im 2. Jahrhundert nach Christus weitverbreitet.<sup>24</sup> Laboruntersuchungen haben ergeben, dass die Verstärkung durch das ›Opus mixtum‹ die Widerstandsfähigkeit des Mauerwerks vergrößern könnte. Das netzförmige Mauerwerk ›Opus mixtum‹ schafft einen gleichen Druckzustand in allen Lagen. Die Verwendung von Ziegeln begünstigt die Lastenverteilung, da sie eventuelle Diagonalspannung unterbricht. Die horizontal verlegten Ziegel verteilen die Druckspannung besser. Die Konstruktionsweise der Mauerecken steigert die Standfestigkeit und wirkt der Schubkraft in die Wände entgegen. Daher ist die Abstimmung des Mörtels auf die Steine sehr wichtig, um genügend Haftfestigkeit zwischen

<sup>19</sup> Bögen, Gewölbe und Kuppeln.

<sup>20</sup> Piccolo Mercato, Capitolium und Insula del Serapide e degli Aurighi (Ostia).

<sup>21</sup> In der Region der antiken Stadt I: Is.X, I und Is. XII, 5.

<sup>22</sup> Gering, Axel: *Ruins, rubbish dumps and encroachment: resurveying late antique Ostia*. In Lavan, Luke; Mulryan, Mulryan (Hg.): Field Methods and Post-Excavation Techniques in Late Antique Archaeology. Leiden/Boston 2013, S. 249–288.

<sup>23</sup> Nur diese Basis mit einem Bleiinlay wurde 1927 *in situ* gefunden und zu diesem Zeitpunkt wurde nur der Schaft der obigen Säule wieder aufgebaut. Das Blei verleiht den Säulen eine gewisse Flexibilität bei den für Erdbebenstöße typischen, nur kurzzeitig wirkenden Kräften. Das ist vorteilhafter als die Nutzung einer vollkommen steifen Konstruktion, welche bei einem Erdbeben brechen würde.

<sup>24</sup> Beim ›Opus mixtum‹ handelt sich um eine alte römische Bautechnik, die aus einer Mischung aus ›Opus reticulatum‹ und an den Ecken des ›Opus latericum‹, aber auch aus ›Opus vittatum‹ und ›Opus testaceum‹ bestehen kann. Das ›Opus mixtum‹ wurde vor allem in der Zeit von Kaiser Hadrian verwendet.



Abb. 7 Bleieinlage im Sockel (*Foro della Statua Eroica, Ostia Antica, 2019*)

Stein und Mörtel zu erzielen. Ein Experiment mit zwei Mauerwerkseinheiten zeigt die unterschiedlichen Auswirkungen bei einer geringeren oder höheren Erdbebenintensität je nach Art der Bindung zwischen den Bauelementen (Abb. 8). Im ersten Beispiel haben wir einen Kippkollaps (Phänomen des Rotationskinematismus) bei einem starken Erdbeben, im zweiten Beispiel ein Schubphänomen (Phänomen des Gleitens) bereits bei einem weniger starken Erdbeben. In Laboruntersuchungen deutet die größere oder kleinere Neigung (40 Grad für ‚Opus reticulatum‘, 15 Grad für horizontales Reihenmauerwerk), bei welcher der Zusammenbruch beginnt, auf eine stärkere oder schwächere seismische Intensität hin. Das ‚Opus reticulatum‘ bricht erst bei größerer Intensität und mit einem Phänomen der Rotationskinematik zusammen. Dieses Ergebnis beweist die Vorteile der vertikalen Vernetzung der Elemente<sup>25</sup> zum Schutz vor Erdbeben. Im zweiten Fall bricht stattdessen zuerst das Mauerwerk ein, allerdings aufgrund des Gleitphänomens, welches noch schwerer zu kontrollieren ist.

<sup>25</sup> Cangi, Giovanni: *Tecniche antisismiche nell’antichità*. In: Centroni, Alessandra; Filetici, Maria Grazia (Hg.): ARCo – Attualità delle aree archeologiche. Esperienze e proposte. Roma 2014.



Abb. 8 ›Opus reticulatum‹ und Mauerwerk mit horizontalen Reihen

## Schlussbemerkung und Entwicklungen

Bereits beim Vergleich der Ergebnisse der ersten Strukturanalyse einiger Fallstudien mit den geomorphologischen Ergebnissen des Standortes wurde die Korrelation zwischen der Lage der Verwerfung und den Einsturzrichtungen überprüft. Es stellte sich heraus, dass das Umkippen von Wänden die häufigste Art des Einsturzes ist. Anhand des virtuellen Bogenmodells analysiert man das kinematische Verhalten der architektonischen Strukturen und rekonstruiert die Einsturzvektoren mit einer vorherrschenden horizontalen Komponente, die auf erdbebenbedingte Brüche hinweist.<sup>26</sup> Ein interdisziplinärer Austausch über Schadensmuster an antiken Gebäuden am Beispiel von Ostia könnte zukünftig dazu beitragen, bessere Richtlinien zur Erhaltung der historischen Altstadt zu definieren, moderne Bautechnik gezielt einzusetzen und gegebenenfalls weiterzuentwickeln.

Historische Reparaturen stellen aufgrund ihrer hohen Zahl und unterschiedlichen Chronologie eine wichtige Informationsquelle in Ostia dar. Die Kenntnis der Materialeigenschaften, die manchmal auch nur in einigen wenigen Fällen Anwendung fanden, zeugt von einer Forschung zur allgemeinen Verbesserung der Widerstandsfähigkeit gegen Naturkatastrophen.<sup>27</sup> Die weitverbreitete Verwendung verschiedener Arten von Schubstrukturen ermöglicht eine globale Lesart der antiken Stadt als Reaktion auf katastrophale Ereignisse. Ostia muss in der

<sup>26</sup> Pecchioli/Cangi/Marra 2018 (Anm. 4), S. 117–127.

<sup>27</sup> Pecchioli, Laura: *Analyse der mittelalterlichen Instandsetzungsmaßnahmen und der stratigraphisch-archäologischen Untersuchungen nach Einsturzkatastrophen in Ostia Antica*. In: Schneller, Daniel; Lassau, Guido (Hg.): Erdbeben, Feuer, Wasser und andere Katastrophen. Ihr Einfluss auf die Stadtentwicklung und Stadtgestalt im Spätmittelalter und in der Frühen Neuzeit. Beiträge der Tagung in Basel 1./2. Februar 2018. Bern 2019.

Dimension ‚Stadt‘ analysiert werden, sowohl bei der Bewertung seiner früheren Verwundbarkeit als auch bei der Ermittlung möglicher präventiver Lösungen (Verstärkung, Isolierung, Dissipation usw.) zwischen den einzelnen Wohnblöcken.

Schon anhand der Fundamente wird deutlich, dass es spezifische Konstruktionen gab, um im Falle eines Erdbebens dynamische Kräfte aufnehmen zu können. Sie hatten die Aufgabe, die Standsicherheit eines Gebäudes zu gewährleisten. Aufgrund fehlender Archivdaten und Ausgrabungsergebnisse wird es auch nötig sein, weitere geophysikalische Untersuchungen einiger Fundamente durchzuführen, insbesondere um die Bautechnik der Fundamente besser zu verstehen, die in alluvialem Gelände (Sand als Hauptbestandteil des Bodens) gebaut wurden.