

Zur Frage eines Erdbebens in Augusta Raurica im 3. Jahrhundert n. Chr. aus seismologischer Sicht

Autor(en): **Fäh, Donat**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Jahresberichte aus Augst und Kaiseraugst**

Band (Jahr): **30 (2009)**

PDF erstellt am: **23.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-395722>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Zur Frage eines Erdbebens in Augusta Raurica im 3. Jahrhundert n. Chr. aus seismologischer Sicht

Donat Fäh¹

Zusammenfassung

Aufgrund der 2001–2007 durchgeführten und hier diskutierten Untersuchungen liegen Zerstörungen durch ein Erdbeben in der römischen Oberstadt von Augusta Raurica (Augst BL) im Bereich des Möglichen. Die Schlüsse der beiden Disziplinen Archäologie und Seismologie sind aber nicht eindeutig: Einerseits erklärt aufgrund der archäologischen Befund- und Fundauswertung ein einzelnes Erdbeben das beobachtete Schadensbild kaum. Auf der anderen Seite lassen die seismologischen und tektonischen Untersuchungen eine generell hohe lokale Erdbebenwahrscheinlichkeit und einen besonders hohen Zerstörungseffekt im Gebiet der römischen Oberstadt erkennen. Ein römerzeitliches Erdbeben in Augusta Raurica im 3. Jahrhundert n. Chr. konnten die Untersuchungen aber nicht nachweisen. Dies gilt auch für andere seismolo-

gische Methoden von Drittautorenen im Arbeitsgebiet der Colonia Raurica, die hier ebenfalls kurz vorgestellt werden. Dies deutet darauf hin, dass ein Erdbeben, falls es überhaupt stattgefunden hat, einem mittelstarken Beben im Magnitudenbereich 5,5 bis maximal 6 entsprochen haben könnte. Die Antwort muss schliesslich offen bleiben, da die archäologische Analyse der Gebäudeschäden mehr als einen Zeitpunkt innerhalb des 3. Jahrhunderts für deren Entstehung geliefert hat.

Schlüsselwörter

Archäologie, Archäo-Seismologie, Augst/BL, Erdbeben, Intensität, Kaiseraugst/AG, Magnitude, Mikrozonierung, Paläoseismologie, Schadensbilder, Seismologie, Tektonische Brüche.

Vorbemerkung

1988 wurde aufgrund verschütteter menschlicher Skelette und etwas später auch aufgrund umgestürzter Mauern die These eines Erdbebens aufgestellt, das in der Mitte des 3. Jahrhunderts n. Chr. Teile der Oberstadt von Augusta Raurica zerstört haben könnte. Um dieser Theorie auf den Grund zu gehen, beantragte ich im September 2000 unter dem Titel «Spuren von Erdbeben, Kämpfen und Wiederaufbau in Augusta Raurica – Ein archäologisch-seismologisches Forschungsprojekt» beim Schweizerischen Nationalfonds einen Auswertungskredit, der grosszügigerweise bewilligt wurde. In den Jahren 2001 bis 2008 untersuchten die Archäologin Regula Schatzmann ausgewählte Zerstörungsbefunde² und der Seismologe Donat Fäh vom Schweizerischen Erdbebendienst an der ETH Zürich die Erdbebenwahrscheinlichkeit aufgrund der Untergrundsverhältnisse in der näheren Umgebung von Augst/BL und Kaiseraugst/AG.

Die Schlüsse dieser beiden Disziplinen sind nicht eindeutig: Während für die Zerstörungen aufgrund der archäologischen Befund- und Fundauswertung mehr als ein Zeitpunkt nachgewiesen werden konnte und sogar unterschiedliche Ur-

sachen geltend gemacht werden, ergaben die seismologischen und tektonischen Untersuchungen eine hohe lokale Erschütterungsfähigkeit des Untergrunds und einen besonders hohen Zerstörungseffekt im Gebiet der römischen Oberstadt. Ein römerzeitliches Erdbeben in Augusta Raurica konnte aber von beiden Disziplinen nicht nachgewiesen werden. Der ausführlichste Teil des Forschungsprojekts, die archäologische Dokumentation und Analyse der Zerstörungen in der Spätzeit der Augster Oberstadt, hat sich konsequenterweise auf andere Szenarien konzentriert: Verarmung der Bevölkerung, bauliche Erneuerungen, Schäden durch Brandereignisse und kriegerische Handlungen und (die heute nachweisbare) allmähliche Aufgabe der einzelnen Insulae.

Inzwischen sind verschiedene Arbeiten über die naturwissenschaftlichen Untersuchungen in Fachpublikationen erschienen (siehe Literaturliste am Schluss dieses Artikels). Wir haben D. Fäh gebeten, für ein Laien- und Archäologenpublikum die Methoden der modernen Archäo-Seismologie kurz darzustellen und seine Resultate in diesem Artikel zusammenzufassen.

Alex R. Furger

Erdbeben in der Schweiz

Das Gebiet der Schweizer Alpen bildet einen Teil der Kollisionszone zwischen zwei Kontinentalplatten, der afrikanischen Platte im Süden und der europäischen Platte im Norden. Wie aus dem Resultat eines vor Kurzem durchge-

- 1 Schweizerischer Erdbebendienst, Sonneggstr. 5, ETHZ, CH-8092 Zürich, faeh@sed.ethz.ch.
- 2 Schatzmann in Vorb. – Vorberichte: Schatzmann 2005; Schatzmann 2006; Schatzmann 2007.

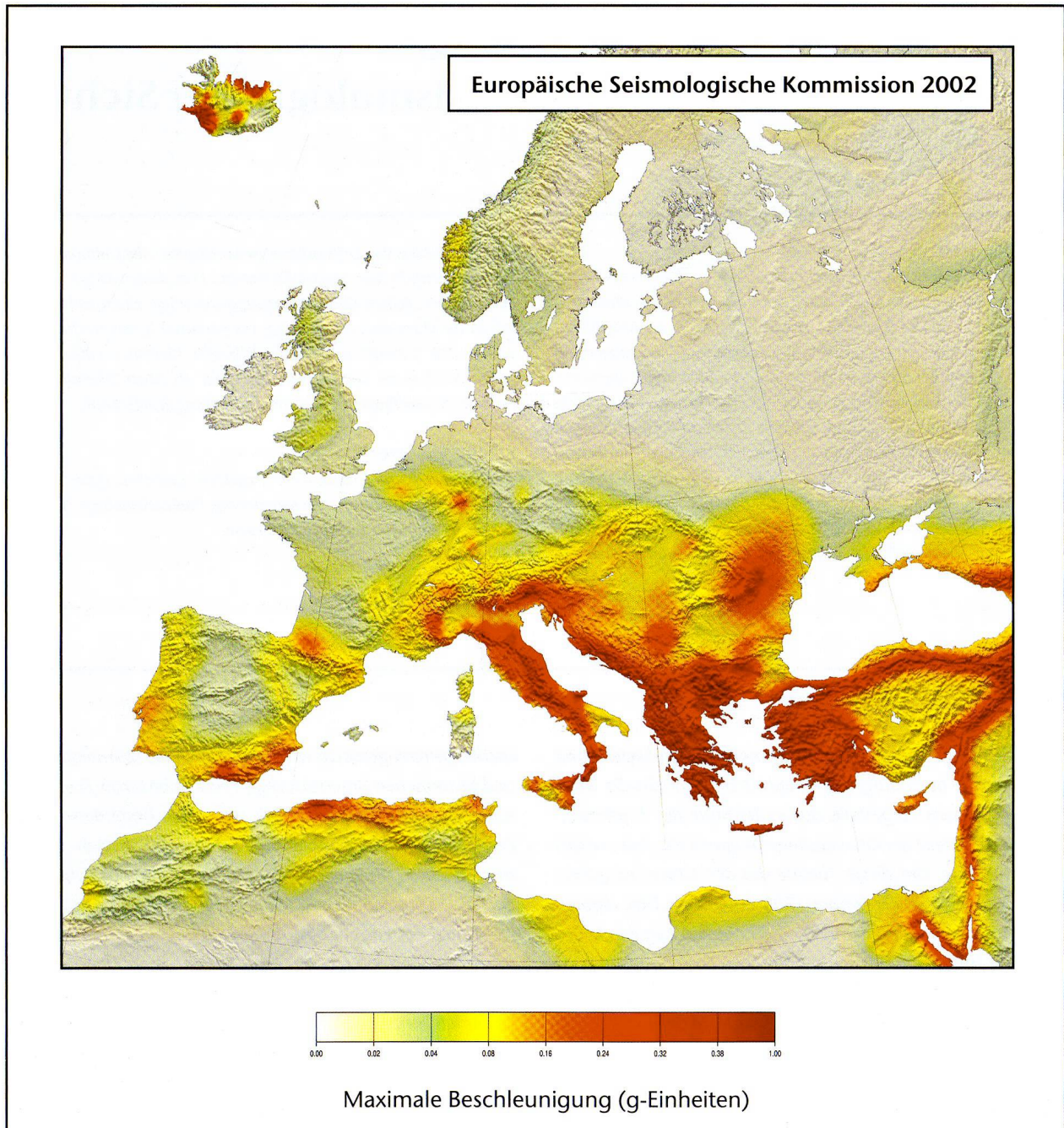


Abb. 1: Karte der im Mittel über rund 500 Jahre zu erwartenden maximalen horizontalen Bodenbeschleunigung.

fürten Projekts zur einheitlichen Darstellung der seismischen Gefährdung im Mittelmeerraum und in Europa hervorgeht, liegt die Schweiz dadurch in einem Übergangsbereich zwischen einer Region hoher seismischer Aktivität (Italien bis Griechenland) und einer Region geringer Aktivität in Nordeuropa (Abb. 1). Im Durchschnitt kann die Erdbeben-tätigkeit in der Schweiz als mittelstark bewertet werden.

Die Schweiz war jedoch in den letzten 1000 Jahren wiederholt von Erdbeben mit zum Teil erheblichen Schäden betroffen (Abb. 2)³. Am bekanntesten ist wohl das Basler Beben von 1356⁴, das als das stärkste bekannte Ereignis im

vergangenen Jahrtausend in Mitteleuropa gilt. Das Gebiet mit der grössten seismischen Aktivität ist das Wallis, welches in den Jahren 1524 und 1584⁵, 1685, 1755⁶, 1855⁷ und 1946⁸

3 Gisler/Fäh/Giardini 2008.

4 Fäh u. a. im Druck.

5 Schwarz-Zanetti u. a. in Vorb.

6 Gisler/Fäh/Deichmann 2004.

7 Fritsche u. a. 2006.

8 Fritsche/Fäh eingereicht.

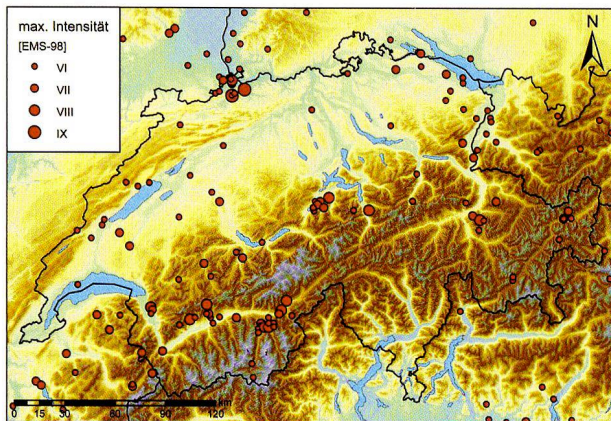


Abb. 2: Epizentren aller aufgrund makroseismischer Beobachtungen bekannten Erdbeben, die Gebäudeschäden verursacht haben (maximale beobachtete Intensität \geq VI; ECOS, 2002). Bedeutung der makroseismischen Intensitäten: VI = leichte Gebäudeschäden; VII = Gebäudeschäden; VIII = schwere Gebäudeschäden; IX = zerstörend.

je von einem Erdbeben mit Magnitude 6 oder grösser betroffen war. Alle diese Erdbeben waren die Ursache von grossen Schäden an Gebäuden sowie einer verbreiteten Verunsicherung der Bevölkerung, welche aufgrund der Nachbebenaktivität über die folgenden Monate andauerte. Die Innerschweiz⁹ und das Gebiet südlich von Chur¹⁰ sind weitere Gebiete mit starken Schadensbeben, wobei die Erdbeben von Nidwalden 1601¹¹ und Chur 1295¹² mit maximalen Intensitäten von VIII zu den stärksten der Schweiz gehören. Relativ häufig sind Erdbeben ausserdem im gesamten Alpenraum, im Gebiet südlich des Neuenburgersees sowie im Rheintal zwischen Chur und dem Bodensee. Vergleichsweise gering war die Erdbebenaktivität bislang dagegen in der zentralen Nordschweiz und im Tessin.

Pro Jahr treten in der Schweiz etwa 10–15 Erdbeben auf, die verspürt werden, und mit einem kleinen Schadensereignis (Intensität VI) ist im langjährigen Mittel alle zehn Jahre zu rechnen. Dabei ist zu beachten, dass die Anzahl starker Erdbeben in der Schweiz in den letzten 30 bis 40 Jahren im Vergleich zu früher relativ gering war. Das stärkste Erdbeben in den vergangenen 30 Jahren in der Schweiz war dasjenige vom 20. November 1991 mit Epizentrum zwischen Thuisis und Lenzerheide. Es erreichte eine Richter-Magnitude von 5. Das Beben führte in der Ortschaft Vaz zu einigen Rissen in Mauerwerk (Intensität VI) und zu einem Stromausfall in der Region Chur. Im Jahr 2006, während der hydraulischen Injektion in einem Geothermieprojekt in Basel, traten mehrere gut spürbare Erdbeben auf. Das stärkste hatte eine Richter-Magnitude von 3,4 und führte zu kleinen Schäden (Intensität V). Die Erschütterungen übertrafen die gesetzten Alarmwerte, worauf das Geothermieprojekt bis auf weiteres eingestellt wurde. Die Serie von kleineren Erdbeben dauerte noch über Monate an.

Da die grossen Erdbeben der Schweiz schon lange zurückliegen, sind sie heute aus dem kollektiven Gedächtnis verschwunden. Sie stellen aber keine Einzelfälle dar. Im Mittel über die letzten 1000 Jahre ist in der Schweiz mindestens alle hundert Jahre ein Erdbeben der Magnitude 6 oder grösser aufgetreten. Anhand des Beispiels der Region Basel soll hier illustriert werden, welche Auswirkungen historische Erdbeben gehabt haben und welche Auswirkungen zukünftige Beben haben könnten. Die Forschung in der historischen Seismologie führte zu wichtigen Erkenntnissen gerade für die Region Basel. Insbesondere die Zusammenarbeit zwischen Archäologie, Geschichtsforschung und Seismologie war ein Meilenstein zum Verständnis der vergangenen Erdbeben.

Kasten 1

Erdbebenmagnitude – Erdbebenintensität

Die Stärke eines Erdbebens wird mit zwei verschiedenen Grössen beschrieben. Einerseits ist das die Magnitude, welche ein Mass für die im Herd freigesetzte seismische Energie darstellt und welche aus den Maximalausschlägen der Seismogramme berechnet wird. Sie wurde vor rund 70 Jahren vom kalifornischen Seismologen C. Richter eingeführt und wird daher als Wert auf der Richter-Skala in arabischen Ziffern angegeben. Ein Unterschied einer Magnitudenstufe entspricht etwa einem Faktor 30 in der freigesetzten Energie.

Andererseits gebrauchen wir den Begriff der Intensität, welche die Auswirkung des Erdbebens auf Menschen, Gebäude und die Natur beschreibt. Die Auswirkungen werden entsprechend einer zwölfstufigen Intensitätsskala mit römischen Ziffern klassifiziert. Intensität I bedeutet, dass das Beben von niemandem verspürt wurde, ab Intensität VI werden leichte Schäden an Gebäuden beobachtet, und bei Intensität VIII können schlecht gebaute Häuser einstürzen.

9 Gisler/Fäh/Deichmann 2004.

10 Gisler/Weidmann/Fäh 2005.

11 Schwarz-Zanetti u. a. 2003.

12 Schwarz-Zanetti u. a. 2004.

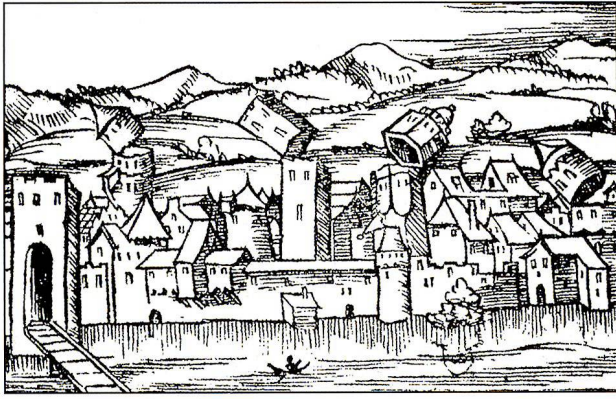


Abb. 3: Nicht-zeitgenössische Darstellung des Basler Erdbebens von 1356 (Kupferstich nach der Kosmographie des Sebastian Münster von 1544).

Erdbeben in der Region Basel

Die Region Basel weist eine markante Erdbeben­geschichte auf, welche im Erdbeben vom 18. Oktober 1356 einen Höhepunkt hat (Abb. 3). Es ist das stärkste heute bekannte historische Erdbeben in der Schweiz. Sein Epizentrum lag südlich der Stadt Basel. Nach dem heutigen Forschungsstand kann von zwei Schaden verursachenden grossen Erdbeben ausgegangen werden, welche sich durch drei kleinere Vorbeben in den Stunden davor ankündigten. Das erste Schadensbeben ereignete sich um 17 Uhr mit einer Intensität von VII–VIII und einer geschätzten Magnitude von 6,2, das zweite, der eigentliche Hauptstoss, ereignete sich um ca. 22 Uhr mit einer Intensität von IX in Basel und einer Magnitude von 6,5–6,9. Beide Stösse verursachten in der Stadt Basel und deren Umgebung starke Schäden und wurden weit herum verspürt. In der Stadt Basel brach direkt nach dem zweiten Stoss ein Feuer aus, das lange nicht gelöscht werden konnte.

Von einigen Kirchen und Klöstern in der Stadt Basel ist bekannt, dass sie stark beschädigt wurden und zum Teil abgerissen werden mussten. Am Basler Münster stürzte das Dach des Mittelschiffs ein, und Teile des Chors und des Lang- und Querhauses waren ebenfalls stark betroffen. Alle fünf Türme stürzten ein. Diejenigen auf der Höhe des Chors wurden nach dem Beben nicht wieder aufgebaut. Ein mit Klammern zusammengehaltener Riss auf der Nordseite (Abb. 4), deformierte Mauern im Innern des Münsters und der gut sichtbare Bauhorizont des Wiederaufbaus zeugen noch heute vom Erdbeben.

In den folgenden Jahrhunderten erlebte die Region Basel ungefähr alle fünfzig bis hundert Jahre ein Schadensbeben der Intensität VII. Diese Serie nahm mit dem Erdbeben von 1650 ihr Ende. Seit dieser Zeit ist die Region seismisch gesehen relativ ruhig, mit einigen Ereignissen der Intensität VI, die leichte Schäden verursachten.



Abb. 4: Basel, Münster-Nordwestfassade am Querschiff über der romanischen Galluspforte. Das bei der Bevölkerung bekannteste Zeugnis des grossen Erdbebens vom 18. Oktober 1356 ist der klaffende Riss zwischen den Sandsteinquadern, der im Zuge der gotischen Reparaturarbeiten mit eisernen Klammern zusammengehalten wurde.

Mithilfe paläoseismologischer Untersuchungen können wir auf die Wiederkehrperiode von sehr grossen Erdbeben wie demjenigen von 1356 in der Region Basel schliessen. Bei paläoseismologischen Untersuchungen werden Spuren in verschiedenen geologischen Ablagerungen identifiziert, datiert und miteinander verglichen. Aus der Vielzahl paläoseismologischer Untersuchungen folgt, dass wir mindestens alle 2000 bis 2500 Jahre ein zerstörerisches Erdbeben in der Region Basel zu erwarten haben¹³.

13 Becker u. a. 2000; Becker/Giardini 2001; Becker/Davenport/Giardini 2002; 2003; Ferry 2003; Ferry u. a. 2005; Meghraoui u. a. 2001.

Paläoseismologische Untersuchungsmethoden

Lokalisierung von Bruchzonen

Aufgrund paläoseismologischer Untersuchungen¹⁴ wird die Reinach-Verwerfung als die wahrscheinlichste für das Basler Beben verantwortliche Bruchzone identifiziert (Abb. 5; 11, unten). Bei diesen Untersuchungen wurde der Erdbebenbruch an mehreren Stellen ausgegraben, im Fachjargon nennt man dies «Trenching». Erdbeben treten gerne an denselben Bruchzonen auf, da diese Bereiche der Erdkruste durch die Bruchvorgänge geschwächt sind. Auch an der Reinach-Verwerfung konnten verschiedene Erdbeben anhand des vertikalen Versatzes am ausgegrabenen Bruch identifiziert werden (Abb. 6; 7). Die zeitliche Festlegung der Erdbeben erfolgte durch eine Datierung der Sedimentablagerungen. Die Geometrie und die Fortsetzung dieser Bruchzone in die Tiefe und die Ausdehnung entlang des Streichens sind Gegenstand von weiteren wissenschaftlichen Abklärungen.

Rutschungen von Seesedimenten

Wichtige Hinweise auf Erdbeben können Ablagerungen in Seen liefern. Jedes Jahr wird eine Schicht von Sedimenten abgelagert, welche durch die jahreszeitlichen Variationen und klimatischen Schwankungen – und der damit ändernden Vegetation – voneinander unterscheidbar sind. Starke Erdbeben führen dazu, dass diese locker gelagerten, wassergesättigten Sedimente durch die Erdbebenwellen ihre Stabilität verlieren können. Dabei treten zwei Phänomene auf,

die sogenannte Bodenverflüssigung und unterseeische Rutschungen. Bei Bodenverflüssigung entstehen flüssige Sand-Wasser-Gemische, die sich einen Weg durch die Sedimentablagerungen suchen. Solche Strukturen können in Bohrungen erkannt und z. B. mithilfe von Pollen und organischen Rückständen datiert werden (Abb. 8). In der Region Basel wurden der Seewener See (Seewen/SO) und der Bergsee (Bad Säckingen/D) untersucht¹⁵. Dabei konnten in verschiedenen Bohrungen Bodenverflüssigungen nachgewiesen werden, die innerhalb der Datierungsgenauigkeit miteinander zeitlich übereinstimmen (Abb. 11, «Lake deposits»).

Unterseeische Rutschungen entstehen vor allem in Seen mit steil abfallendem Seegrund. Da an steilen Lagen locker gelagerte Sedimente sehr instabil sind, können sie durch die seismische Anregung auch leicht ausgelöst werden. Strukturen, die durch Rutschungen entstanden sind, erkennen wir durch das Fehlen der typischen Schichtung in den Sedimenten. Für das Erdbeben von 1601 in der Zentralschweiz konnten die ausgelösten Rutschungen an mehreren Stellen im Vierwaldstättersee nachgewiesen werden¹⁶. Diese Rutschungen, in Kombination mit einem ausgelösten Bergsturz am Bürgenstock, führten zu einer Flutwelle im Vierwaldstättersee, welche eine Amplitude von etwa 2–3 m erreichte und beträchtlichen Schaden anrichtete. Für das Erdbeben von 1356 konnten im Vierwaldstättersee keine Rutschungen nachgewiesen werden, da die Distanz zum

14 Meghraoui u. a. 2001; Ferry 2003.

15 Becker/Davenport/Giardini 2002.

16 Schnellmann u. a. 2002; Schnellmann u. a. 2006; Monecke u. a. 2004.



Abb. 5: Reinach-Verwerfung südlich von Basel, im Gebiet Reinach-Schlatthof (= Abb. 11, Sondierung S1), von Osten betrachtet. Die 35 Meter Höhenunterschied entstanden durch sukzessive Verschiebungen in den letzten 250 000 Jahren.



Abb. 6: Reinach, Fuss des Bruderholzes (= Abb. 11, Sondierung S2). 80 m lange Ausgrabung der Bruchfläche quer zur Richtung der Reinach-Verwerfung (Profil siehe Abb. 7).

Erdbebenherd zu gross war und die Bodenbewegung somit nicht ausreichte. Bemerkenswert in diesem Zusammenhang ist ein prähistorisches Ereignis in der Zentralschweiz, welches eine Vielzahl von Rutschungen im Vierwaldstättersee und im Zürichsee verursacht haben könnte¹⁷. Falls diese einem Erdbeben zugeordnet werden, so muss dieses um einiges stärker gewesen sein als wir es für die Zentralschweiz aus historischen Aufzeichnungen kennen.

¹⁷ Strasser u. a. 2006.

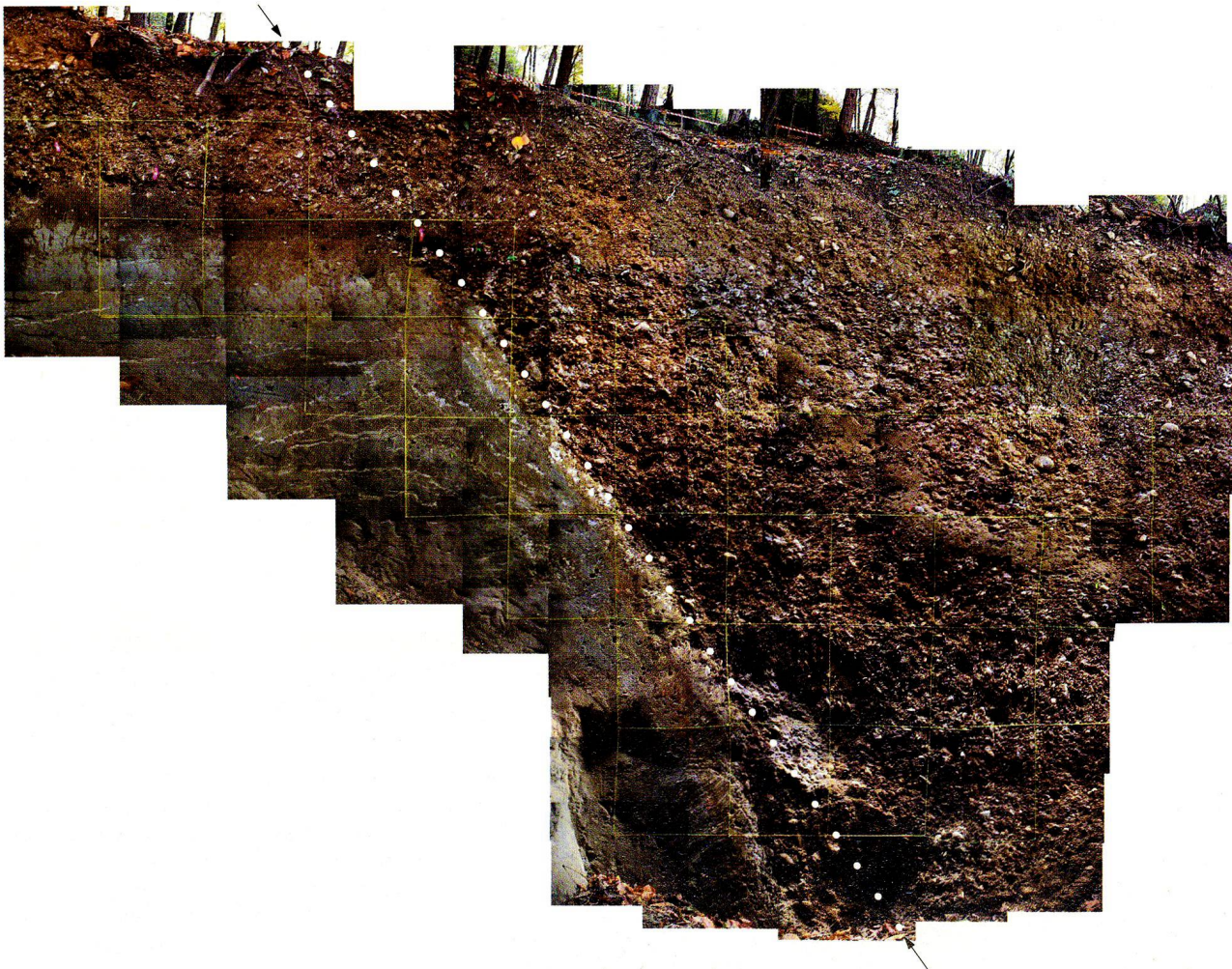


Abb. 7: Reinach-Verwerfung. Die geologischen Schichten (Abb. 6) sind durch den Bruchvorgang gegeneinander verschoben. Das gelbe Netz diente zur Aufnahme der geologischen Schichten, ein Viereck entspricht $0,5\text{ m} \times 0,5\text{ m}$. Die verschiedenen Schichten wurden mit der ^{14}C - und der Thermolumineszenz-Methode datiert, um die verschiedenen Erdbeben-Bruchphasen festzulegen. Die scharfe Oberkante der grauen Sedimente entstand wahrscheinlich durch Menschenhand und datiert aus der Römerzeit.

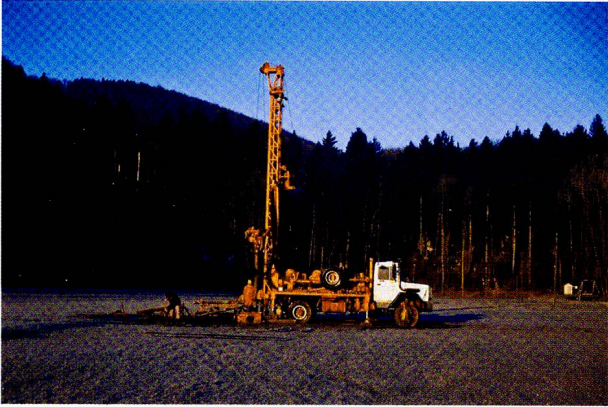


Abb. 8: Links: Entnahme von Sedimenten mithilfe von Bohrungen im Gebiet des trockengelegten Seewener Sees (Seewen/SO). Rechts: Seismische Messungen zur Kartierung der Sedimentablagerungen im Bergsee (Bad Sädingen/D).

Datierung von Rutschungen und Felsstürzen

Neben unterseeischen Rutschungen werden bei Erdbeben auch Rutschungen und Steinschlag an der Erdoberfläche ausgelöst. So ist auch zu vermuten, dass die Ostecke des römischen Vierecktempels auf der Schauenburger Fluh (5,5 km südwestlich von Augusta Raurica) bei einem Erdbeben – es wird jenes von 1356 vermutet – mitsamt grossen Felsblöcken in die Tiefe gestürzt ist¹⁸.

In der Region Basel wurde eine Serie von grossen Felsbrocken auf den Umstand ihrer möglichen Auslösung durch ein Erdbeben untersucht¹⁹, indem die Ablagerungen unter den Felsblöcken datiert wurden (Abb. 9). Für die meisten Felsbrocken kann das Ereignis innerhalb der Datierungsgenauigkeit auf das 1356 Erdbeben festgelegt werden. Es gibt somit kein anderes zeitlich nahe datiertes Ereignis, welches die Stärke des 1356 Bebens in diesem Steinschlag-Gebiet erreicht haben kann.



Abb. 9: Datierung des Felssturzes durch Datierung der Ablagerungen unter dem Felsbrocken. Dazu muss das Gestein durchbohrt werden.

Datierung von Stalaktitenbrüchen

Weitere paläoseismologische Untersuchungen betreffen abgebrochene Stalaktiten und Stalagmiten in Höhlen²⁰. Für einige Grotten südlich von Basel und im Gebiet des Jura (Abb. 10) wurden solche Abbrüche dem 1356 Erdbeben

18 Noch nicht untersucht.

19 Becker/Davenport 2003; Schürch/Becker 2005.

20 Carbon u. a. 1999; Lemeille u. a. 1999; Lacave u. a. 2004.

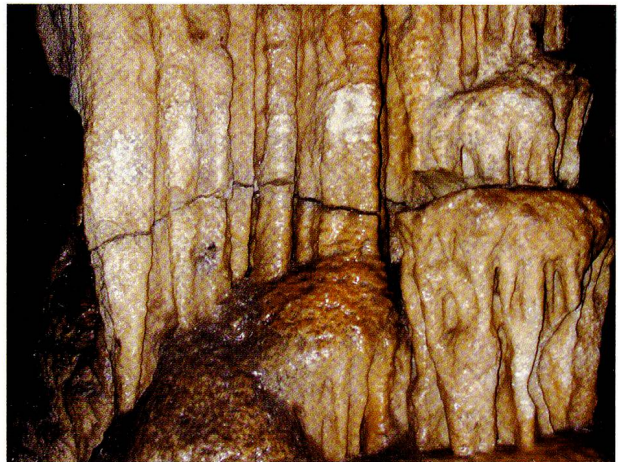


Abb. 10: Stalagmiten, d. h. die vom Höhlenboden aufsteigenden Tropfsteine, können bei einem Erdbeben reissen und abbrechen. Nach dem Beben setzt sich das Stalagmitenwachstum in der Regel fort. Zwischen dem alten Stumpf und dem jungen Tropfstein in seiner Fortsetzung ist dann eine deutliche Zäsur erkennbar, die sich anhand organischer Spuren mit der ¹⁴C-Methode datieren lässt (so gelang ein Nachweis für das 1356er Beben im «Dieboldslöchli», einer engen Höhle am Fuss des Pfeffinger Burgfelsens). Unser Bild zeigt einen grossen, durchgehenden Horizontalbruch an einem mächtigen, zusammengewachsenen Tropfstein in der Grotte de Réclère im Kanton Jura. Erkennbar ist nicht nur die Bruchlinie, sondern auch die kleine Horizontalverschiebung von Höhlendach und -boden. Auch die Brüche von Réclère könnten durch das Erdbeben von 1356 verursacht sein.

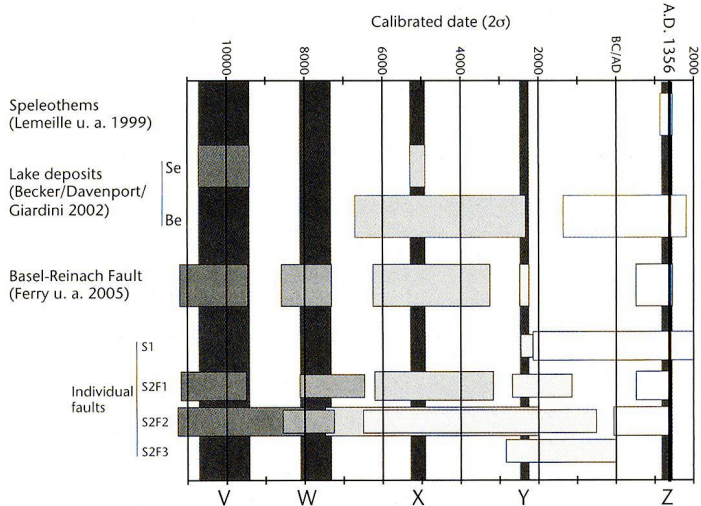


Abb. 11: Holozäne Erdbebeneschichte der Basel-Reinach-Verwerfung (BL), wie sie sich von den Sondierungen S1 (Reinach, Schlatthof) und S2 (Reinach, Fuss des Bruderholzes; Abb. 6; 7) ableiten lässt und hier anderen Untersuchungen unterschiedlicher geologischer Archive des Erdbebengebiets von «Basel 1356» gegenübergestellt wird. Hellgraue horizontale Balken beziehen sich auf die individuellen Reinacher Verwerfungsabschnitte (unten; S1 bis S2F3) sowie auf weitere Bodenarchive: Se = Seewener See/SO (Abb. 8, oben); Be = Bergsee Bad Säckingen/D (Abb. 8). Zu «Speleothems» (Tropfsteinbrüche) siehe Abb. 10. Dunkelgraue vertikale Balken markieren die interdisziplinär korrelierten Erdbebenereignisse V bis Z aufgrund der Einzeluntersuchungen (Datierungen). Beachte, dass die Ereignisse Z (Basler Erdbeben von 1356) und Y klare Spuren in beiden Reinacher Sondierungen (S1, S2) hinterlassen haben. Von einem römerzeitlichen Erdbeben (Mitte 3. Jh. n. Chr.) liegen trotz unterschiedlicher Untersuchungsmethoden an keinem der Untersuchungsorte Hinweise vor! Die älteren seismischen Ereignisse X, W und V sind nur in Reinach, S2, nachzuweisen. Die Ereignisse Z und X korrelieren gut mit anderen Geoarchiven (Seesedimente, Tropfsteinbrüche), und am Seewener See lässt sich das Ereignis X besonders eng datieren.

oder noch älteren Erdbeben zugeordnet (Abb. 11, «Speleothems»). In den meisten Fällen fehlen jedoch genaue Datierungen. Solche Abbrüche können somit auch andere Ursachen als Erdbeben haben. Neben dem wohl wichtigsten Einfluss, demjenigen des Menschen, können seltene Flutereignisse in den Höhlen als Ursache nicht ausgeschlossen werden.

Fazit

Die naturwissenschaftlichen Methoden der Archäo-Seismologie erlauben es, mehrere urgeschichtliche Erdbeben wahrscheinlich zu machen und das Mittelalter-Erdbeben von Basel 1356 im geologischen Befund zu erkennen, nicht aber eines im 3. Jahrhundert n. Chr. (Abb. 11).

Wir können ein Erdbeben nicht voraussagen, aber wir können die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer bestimmten Erschütterungsintensität abschätzen (Kasten 2 und Abb. 1). Dies soll anhand der Erdbeben-Frage am Beispiel von Augusta Raurica diskutiert werden.

Kasten 2

Erdbebengefährdung – Erdbebenrisiko

Wo kleine Beben vorkommen, können auch grosse Erdbeben auftreten. Diese weltweit gültige Beobachtung leitet sich von der Tatsache ab, dass die Erdkruste von einer Vielzahl von Brüchen und Störungen aller Grössenordnungen durchzogen ist. Das gesetzmässige Verhältnis von schwachen zu starken Erdbeben ist eine direkte Folge des Verhältnisses von kleinen zu grossen Brüchen in der Erdkruste. Diese Gesetzmässigkeit erlaubt uns, aus der statistischen Verteilung schwacher Erdbeben die Wahrscheinlichkeit des Auftretens starker Beben und somit die Erdbebengefährdung in einem bestimmten Gebiet zu berechnen. Das Erdbebenrisiko ergibt sich erst aus dem Zusammenwirken der Erdbebengefährdung, der Verletzlichkeit der Infrastruktur und der möglichen daraus entstehenden Verluste. Eine Strohhütte, auch wenn sie in einem seismisch extrem aktiven Gebiet steht, ist kein Risikofaktor. Hingegen stellt ein nicht erdbebensicheres Schulhaus oder eine falsch dimensionierte Industrieanlage auch in einer Gegend schwacher Erdbebenaktivität ein erhebliches Risiko dar. Die Region Basel ist ein Gebiet mit mittelstarker Erdbebengefährdung, durch die Dichte der vorhandenen Bauten, Infrastruktur und Industrie gehört die Region jedoch zu den Gebieten mit erhöhtem Erdbebenrisiko.

Ein «Erdbeben von Augusta Raurica»?

Wenige archäologische, aber viele seismische Indizien

Aufgrund archäologischer Befunde sowie der in den letzten Jahren durchgeführten seismologischen Untersuchungen kann das in Augst aus Ausgrabungen dokumentierte Schadensbild eventuell einem oder zwei Erdbeben etwa um die Mitte des 3. Jahrhunderts n. Chr. zugeordnet werden. Dieses Schadensbild schien zu Projektbeginn markante Eigenschaften aufzuweisen: die Konzentration der Schäden in der antiken Oberstadt mit typischer Zerstörung, wie sie aus der Archäologie als Folge von Erdbeben bekannt ist, so z. B. im Verband umgestürzte Mauern (Abb. 12), Skelettfunde unter solchen Mauerverstürzen (Abb. 13) oder Spuren des schnellen improvisierten Wiederaufbaus²¹. Da dieses Ereignis schon lange zurückliegt und für diese Zeit und das Gebiet Zentraleuropas keine schriftlichen Quellen existie-

21 Furger in Vorb.



Abb. 12: Weisen diese archäologischen Funde auf mögliche Spuren von Erdbeben hin? Eine über mehrere Meter Länge umgestürzte Hofmauer in Augusta Raurica (Grabung 1965.051; vgl. auch Abb. 13).

ren²², kann jedoch keine definitive Antwort auf die Existenz oder Nichtexistenz eines oder mehrerer starker Erdbeben gegeben werden.

Die Möglichkeit der Existenz eines aktiven Bruches in der Umgebung von Augusta Raurica, ausserhalb des Rheingraben, und die zu erwartenden grossen Standorteffekte während eines Erdbebens machen die antike Stadt zu einem äusserst interessanten Studienobjekt für die Seismologie. Die vom Schweizerischen Nationalfonds mitfinanzierte Studie «Spuren von Erdbeben, Kämpfen und Wiederaufbau in Augusta Raurica – Ein archäologisch-seismologisches Forschungsprojekt» konnte die verschiedenen Aspekte dieses möglichen Erdbebens darlegen. Dabei wurden drei wichtige Komponenten untersucht:

1. Als erste Komponente wurden Felduntersuchungen im Gebiet von Augusta Raurica ausgeführt, um mögliche Bruchstrukturen als Bebenverursacher in der nahen Umgebung von Augusta Raurica zu identifizieren und ein Modell der lokalen Geologie zu konstruieren.
2. Dieses Modell wurde im zweiten Schritt für numerische Simulationen von möglichen Erdbeben benutzt, um die Bodenbewegung bei einem Erdbeben und die Auswirkungen für das Gebiet von Augusta Raurica abzuschätzen.
3. Und drittens wurden Starkbebenmessgeräte installiert, welche zur Überprüfung der numerischen Modelle und zur langfristigen Überwachung möglicher Bruchstrukturen in der Umgebung von Augusta Raurica benutzt werden.

Warum gibt es bei Erdbeben eine Konzentration von Schäden, so wie es möglicherweise in der Augster Oberstadt beobachtet wurde?

Die Erfahrungen aus starken Erdbeben zeigen, dass die stärksten Schäden massgeblich durch zwei Faktoren bestimmt sind: die Eigenschaften des lokalen geologischen Untergrunds und die Qualität der Bauwerke. Ein besonders «weicher» Untergrund mit mächtigen, locker gelagerten Sedimenten kann zu einer Aufschaukelung der Erdbebenwellen führen und somit zu einer erheblichen Verstärkung der Erschütterungen (Kasten 3). Dies sind hauptsächlich Fluss-, See- oder Windablagerungen. Die Sättigung der Sedimente mit Wasser kann sich insofern negativ auf ihr Verhalten auswirken, als feinkörnige wassergesättigte Sedimente bei seismischer Anregung dazu neigen, ihre Stabilität zu verlieren.

Durch eine gezielte Serie von geophysikalischen Messungen rund um Augusta Raurica wurden die Eigenschaften der Lockersedimente bestimmt. Im Vordergrund standen die Messung der S-Wellengeschwindigkeit²³, die Mächtigkeit der geologischen Schichten und die Resonanzfrequenz der Lockersedimentablagerungen. Aus den durchgeführten Arbeiten geht hervor, dass die Eigenschaften der Lockersedimente innerhalb von Augusta Raurica stark variieren und in der Oberstadt die Resonanzfrequenz in einem für Gebäude ungünstigen Bereich liegt²⁴. Zudem weisen Mauerwerk- und Bruchsteingebäude eine sehr geringe Erdbebensicherheit auf²⁵. Besonders stark können die Erdbebeneffekte sein, wenn die dominierende Schwingungsfrequenz im Untergrund mit derjenigen der Gebäude übereinstimmt, was für die Oberstadt erfüllt sein könnte²⁶. Die antike Unterstadt auf dem Gebiet des heutigen Kaiseraugst/AG weist nur eine geringe Mächtigkeit der Lockersedimente auf und die Verstärkungen der seismischen Wellen erfolgen im hohen Frequenzbereich, welcher für die Gebäude weniger von Bedeutung ist.

22 Gisler/Fäh/Masciadri 2007.

23 S-Wellen haben die grössten Amplituden und sind hauptsächlich für die Zerstörung verantwortlich.

24 Fäh u. a. 2006.

25 Furger in Vorb.

26 Da die Gebäude nicht erhalten sind, kann deren Schwingungsfrequenz nur abgeschätzt werden.

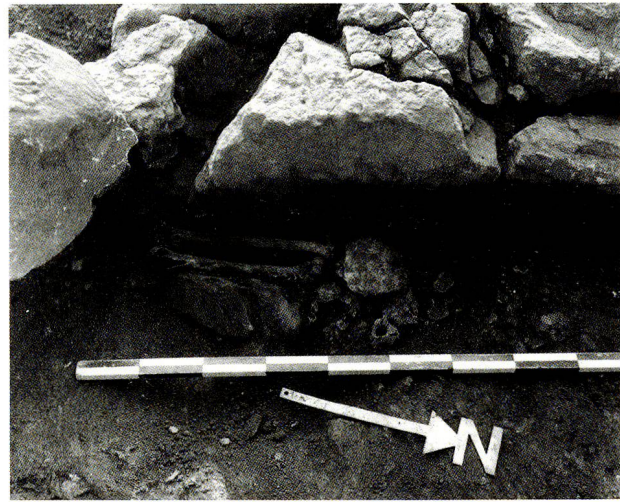
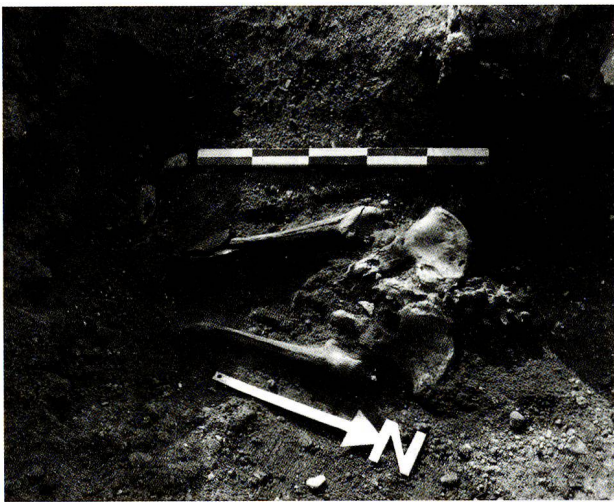
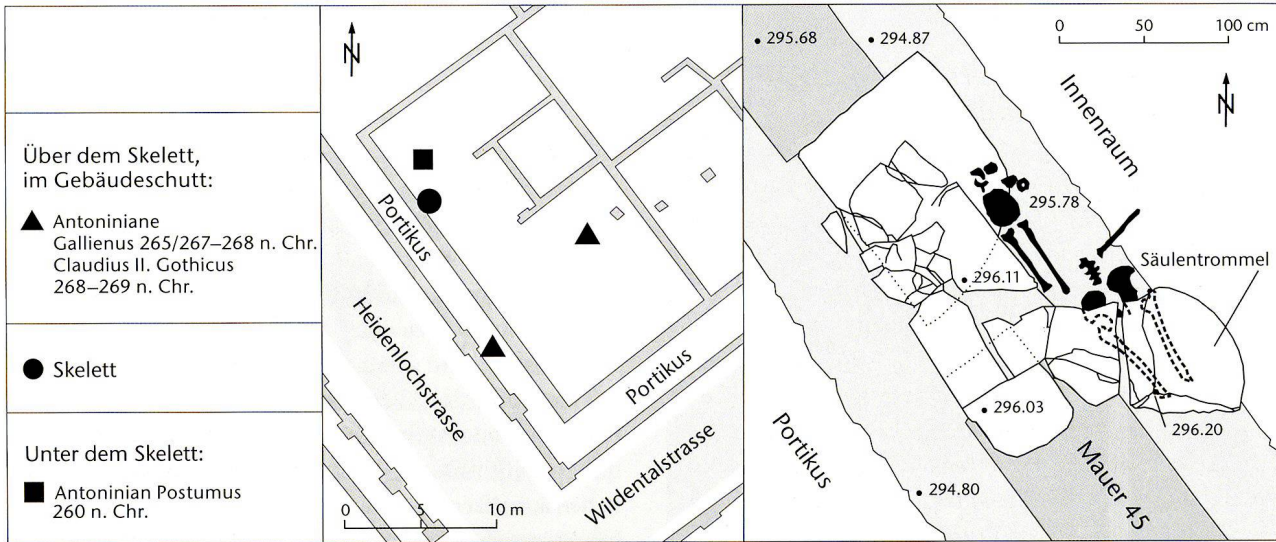


Abb. 13: Erdbebenspuren? (vgl. auch Abb. 12) Menschliches Teilskelett mit Teilen des Rumpfs im Sehnenverband in ungestörter Lage (Detail unten links mit Oberschenkeln, Becken und rechter Hand) und Teilen des Oberkörpers in antik verschobener Lage (unten rechts mit Armknochen, linker Hand und Schädeldecke) zwischen römischen Mauertrümmern in der Insula 31 in Augst (Grabung 1962.054). Die Kartierung der Münzen (▲, ■) dient der zeitlichen Eingrenzung des Verschüttungsereignisses. M. oben Mitte: 1:500, oben rechts: 1:45.

Mögliche Bruchstrukturen für ein Erdbeben im Gebiet von Augusta Raurica

Das von seismologischer Seite postulierte Erdbeben von ca. 250 n. Chr. hinterliess, im Gegensatz zum Basler Erdbeben von 1356, keine uns bekannten Spuren in geologischen Formationen. Wir folgern daraus, dass dieses Erdbeben, falls es überhaupt existiert hat, einem mittelstarken Erdbeben im Magnitudenbereich 5,5 bis maximal 6,0 entsprochen haben könnte. Ein solches Erdbeben kann nur dann zu massiven Zerstörungen führen, wenn der Erdbebenbruch in direkter Nähe zur römischen Stadt liegen würde. Die Reinach-Verwerfung (Abb. 6; 7) sowie andere Bruchstrukturen innerhalb des Rheingrabens können somit als Ursache für das mögliche Augusta-Raurica-Erdbeben mit grosser Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden. Daher haben wir uns auf mögliche aktive Brüche in der nahen Umgebung von Augusta Raurica konzentriert.

Die vorhandenen Bruchstrukturen im Gebiet um Augusta Raurica wurden in einigen Projekten untersucht (Abb. 14)²⁷. Eine wichtige Untersuchung im Zusammenhang mit der Frage der Aktivität der Bruchsysteme ist die seismotektonische Untersuchung als Grundlage für die seismische Gefährdungsanalyse des einst projektierten Kernkraftwerks Kaiseraugst²⁸. Diese hält fest, dass die durch Augusta Raurica laufende Verwerfung, die «Herten-Kaiseraugst-Verwerfung» mit ca. 8 km Bruchlänge, aufgrund von quartärgeologischen Beobachtungen Hinweise auf neotektonische Bewegungen zeigt. Die parallel verlaufende «Markhof-Adler-Verwerfung» im Westen, mit ca. 9 km Bruchlänge, hat

27 z. B. Löw 1987; Interreg II 2001; Faber u. a. 1994.

28 Löw 1987.

Ungünstiger Untergrund verschärft die Erdbebengefahr

Die Erfahrungen aus den vergangenen starken Erdbeben zeigen, dass die stärksten Schäden nicht auf die unmittelbare Nähe des Erdbebenherdes beschränkt sein müssen, sondern dass sie auch in grossen Entfernungen auftreten können. Ein dramatisches Beispiel ist das Erdbeben von 1985 und dessen Auswirkungen in Mexico City, in 400 km Entfernung vom eigentlichen Epizentrum. Der besonders weiche Untergrund des trockengelegten Sees in Mexico City führte zu einer Aufschaukelung der Erdbebenwellen und somit zu einer erheblichen Verstärkung der Erschütterungen. Besonders verheerend waren diese Effekte für diejenigen Gebäude, deren dominierende Schwingungsfrequenz mit derjenigen des Untergrunds übereinstimmte. Solche Zustände lassen sich durch gezielte Baugrunduntersuchungen feststellen und bei der Bemessung und dem Entwurf der Gebäude berücksichtigen. In vielen Erdbeben wurde beobachtet, dass Gebäude auf weichem Untergrund entlang ganzer Strassenzüge einstürzten, während einige Strassen entfernt die genau gleich konstruierten Gebäude auf festem Untergrund unbeschädigt blieben. Hätte man der unterschiedlichen lokalen Beschaffenheit des Untergrunds bei der Konstruktion Rechnung getragen, wären wesentlich weniger Opfer und wesentlich geringere Schäden zu beklagen gewesen.

ähnliche Hinweise auf neotektonische Bewegungen. Im Osten der Herten-Kaiseraugst-Verwerfung findet man ein komplexes System von kleineren Verwerfungen.

Der Bruchverlauf der Verwerfungen konnte nicht bis ins kristalline Gestein nachgewiesen werden. Für eine Fortsetzung spricht das Auftreten einer Serie von Erdbeben im Gebiet von Pratteln in den Jahren 1987 bis 1990²⁹ und im Verlaufe des Jahres 2007³⁰. Die Untersuchung dieser Erdbebenschwärme ergibt für alle Ereignisse Tiefen im Bereich von ca. 10–12 km. Die Untersuchungen der Erdbeben zeigen auch, dass eine mögliche Bruchfläche parallel zum Streichen der Oberflächenstrukturen verläuft. Zudem sind die beobachteten Bruchvorgänge mit dem vorherrschenden Spannungsfeld³¹ in der Region kompatibel. Eine Verbindung zwischen den an der Oberfläche sichtbaren und den in grösserer Tiefe seismisch aktiven Brüchen ist daher wahrscheinlich.

Die seismische Aktivität im Bereich des Dinkelbergs, zu dem auch die Region Pratteln gehört, zeigte in den letzten Jahrzehnten hauptsächlich Erdbeben in der Unterkruste zwischen 10 und 20 km Tiefe³². Dies könnte auf eine Entkopplung zwischen der Ober- und der Unterkruste hindeuten, was unserer Hypothese der Verbindung zwischen

Oberflächenstrukturen und den tiefen, heute seismisch aktiven Bruchsystemen widersprechen würde. Da jedoch der Verschiebungssinn übereinstimmt, ergibt sich in jedem Fall ein indirekter Zusammenhang. 30 Jahre Mikrobeben-Beobachtungen reflektieren zudem nicht alle tektonischen Prozesse der letzten Jahrtausende.

Geologische Modelle und numerische Modellierung

Numerische Simulationen von Erdbeben erlauben es uns heute, vergangene Ereignisse zu rekonstruieren oder mögliche Erdbeben in ihren Auswirkungen abzuschätzen. Die Vielzahl der geophysikalischen Messungen, die vorhandenen Bohrlochinformationen und die Kenntnis der lokalen Geologie erlaubten es uns, ein dreidimensionales Modell der Region zu erstellen³³. Dieses wurde dazu verwendet, verschiedene Erdbebenszenarien von möglichen Erdbeben zu rechnen³⁴. Das Resultat einer solchen Berechnung ist in Abbildung 15 dargestellt. Es modelliert ein mögliches Erdbeben der Magnitude 5,9 ca. 5 km westlich von Augusta Raurica, mit einer Herdtiefe von ca. 10 km.

Die Variabilität der Verstärkung der seismischen Wellen als Funktion der Frequenz und des Standorts in Augusta Raurica ergibt ungünstige Verstärkungseffekte für Gebäude in der Oberstadt. Zudem werden in einer geologischen Struktur, wie sie in der Oberstadt vorliegt, starke Resonanzphänomene erwartet. Dies wird durch eine Kombination der Wirkung der Sedimentablagerungen und der Oberflächentopografie verursacht. Ein Resultat der Berechnungen ist das in Abbildung 15 gezeigte Intensitäts-Muster mit den Zonen grosser Intensitätswerte in der Oberstadt und den niedrigen Intensitätswerten in der Kaiseraugster Unterstadt. Es ist zu beachten, dass aufgrund der Unsicherheiten in den Modellen die Gebiete mit erhöhter Intensität auch leicht verschoben sein könnten.

Resultate aus solchen Studien sind für die seismische Gefährdungsanalyse in den Gebieten mit Schotterterrassen von grossem Interesse, da viele ähnliche geologische Strukturen in der Region vorhanden sind, welche in den letzten Jahrzehnten dicht überbaut wurden.

29 Faber u. a. 1994.

30 Schweizerischer Erdbebendienst 2007 (<http://www.seismo.ethz.ch>).

31 Kastrup u. a. 2004.

32 Faber u. a. 1994.

33 Fäh u. a. 2006.

34 Oprsal/Fäh 2007.

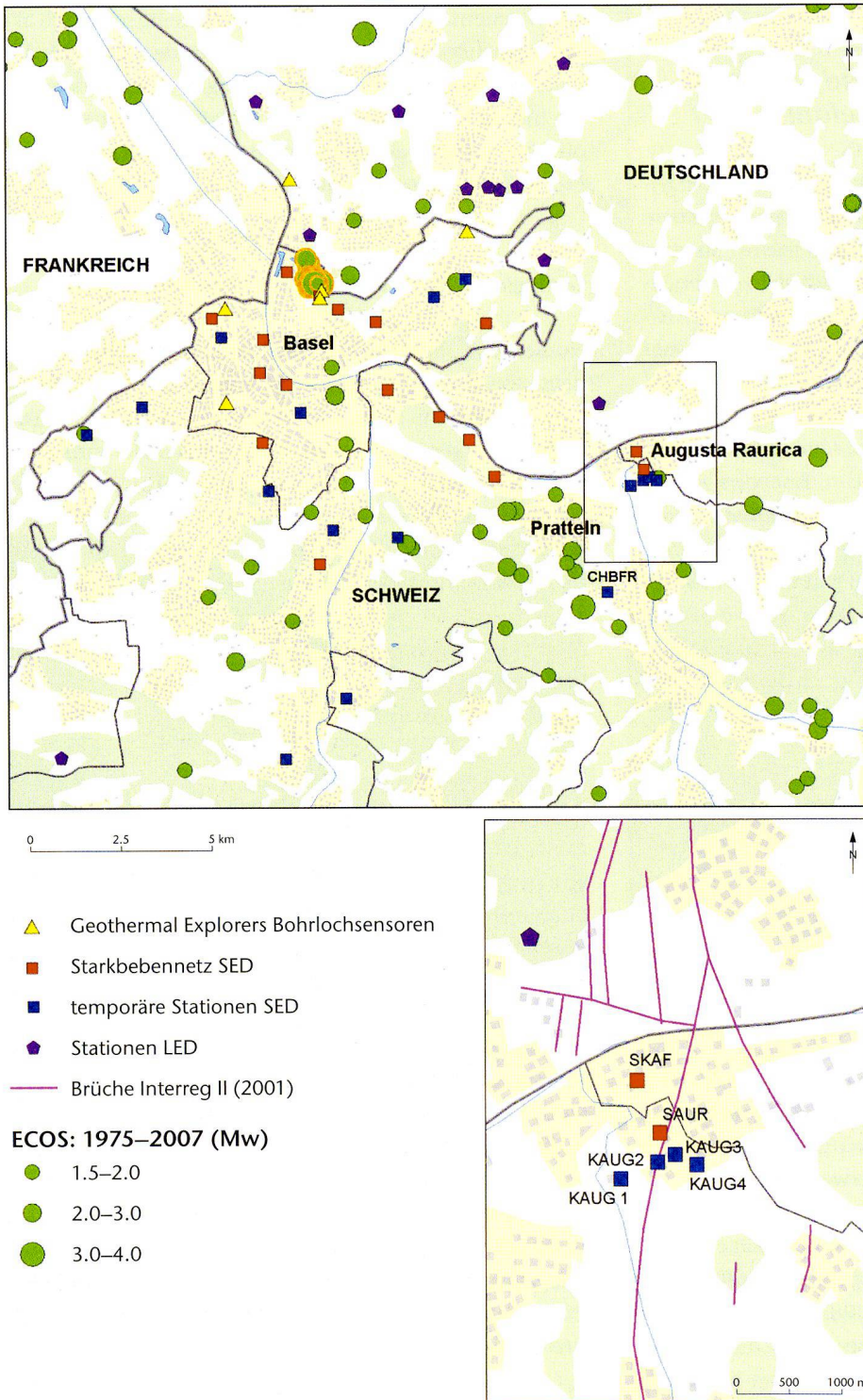


Abb. 14: Instrumentell bestimmte Erdbeben 1975–2007 mit Magnitude größer als 1,5 in der Region Basel (Schweizerischer Erdbebendienst) und Kartierung der Verwerfungen im Gebiet von Augusta Raurica. Um die Erdbebenaktivität nach dem Geothermieprojekt zu überwachen, wurde eine Vielzahl von seismischen Stationen temporär installiert (SED: Schweizerischer Erdbebendienst; LED: Landeserdbebendienst Baden-Württemberg). Die Beben, die durch das Geothermieprojekt ausgelöst wurden, sind mit oranger Farbe umrandet. M. oben 1:200 000, unten 1: 70 000.

Instrumentierung

Für die Untersuchung des Standorteinflusses und die seismische Überwachung der Bruchzonen wurden im Rahmen unseres Nationalfondsprojekts seismische Instrumente in Kaiseraugst/AG und in Augst/BL – im Gebiet der römischen Stadt – installiert (Abb. 16). Drei Starkbebeninstrumente haben wir für die langfristige Überwachung in das Netzwerk des Schweizerischen Erdbebendienstes integriert

(Abb. 14; Kasten 5; Stationen SAUR, SKAF, CHBFR). Diese drei Erdbebenstationen zusammen mit den anderen Messstellen des permanenten Netzwerkes des Schweizerischen Erdbebendienstes werden es erlauben, die Verstärkungseffekte und die lokale Seismizität zu überwachen und allfällige aktive Bruchstrukturen zu identifizieren. Zu den Bruchzonen gehören u. a. die Hertens-Kaiseraugst- und Markhof-Adler-Verwerfungen sowie die Verwerfungen im Gebiet von Pratteln, auf welchen Erdbebenserien in den

Mikrozonierung

Die Auswirkungen eines Erdbebens auf ein Gebäude oder eine Anlage sind nicht nur von der im Herd abgestrahlten Energie (Magnitude) abhängig, sondern in besonderem Masse auch von der Beschaffenheit des lokalen Untergrunds. Eine Mikrozonierung dient dazu, die lokalen geologischen und geotechnischen Eigenschaften des Untergrunds zu erfassen und direkt in die zu erwartende Verstärkung oder Abschwächung der Erdbebenerschütterungen umzusetzen. Die Resultate solcher Mikrozonierungsstudien werden in detaillierten Karten dargestellt und erlauben es dem Bauingenieur, die Bauten gezielt im Hinblick auf die zu erwartenden Erdbebeneinwirkungen zu dimensionieren. In der Schweiz sind in den letzten Jahren mehrere Pilotstudien zur Mikrozonierung durchgeführt worden, so im Kanton Obwalden, im Sankt Galler Rheintal und im Wallis. Für die Region Basel wurde in den letzten Jahren eine Mikrozonierung durchgeführt, welche den Kanton Basel-Stadt und Teile der Kantone Basel-Landschaft und Solothurn umfasst³⁵.

Erdbebenmessnetze in der Schweiz

Seit 1975 betreibt der Schweizerische Erdbebendienst (SED) an der ETH in Zürich ein hochempfindliches Seismometernetz zur Überwachung der seismischen Aktivität in der Schweiz und in den angrenzenden Gebieten. Zurzeit besteht dieses Netz aus rund 30 über die ganze Schweiz verteilten Stationen, deren Signale kontinuierlich an die Auswertzentrale in Zürich übermittelt werden. Um die hohe Empfindlichkeit zu gewährleisten, stehen die Seismometer des Überwachungsnetzes an abgelegenen Orten auf festem Fels. Daher können die entsprechenden Daten nur wenig über die zu erwartenden Erschütterungen in den besiedelten Gebieten aussagen. Zur direkten Erfassung dieser für das Erdbebeningenieurwesen relevanten Gebiete betreibt der Schweizerische Erdbebendienst seit über 15 Jahren ein landesweites Netz von Starkbebenmessgeräten. Dieses sogenannte Freifeldnetz besteht zurzeit aus rund 60 Einzelstationen, die die Beschleunigungen von Erdbeben aufzeichnen, welche auch von der Bevölkerung gespürt werden.

Jahren 1987 bis 1990 und im Verlauf des Jahres 2007 aufgetreten sind.

Für die Überwachung der durch das Geothermie-Experiment in Basel 2006 induzierten Erdbeben wurden verschiedene lokale temporäre seismische Netzwerke betrieben (Abb. 14), eines davon innerhalb des Gebiets von Augusta Raurica. Die Aufzeichnungen aus diesen Stationen wurden für die Überprüfung der numerischen Modelle benutzt. Die bis heute aufgezeichneten Signale und Verstärkungen bestätigen die Resultate der numerischen Modellierung.

Dank

Diese Untersuchung wurde durch den Schweizerischen Nationalfonds gefördert (Nr. 1214-63542.00; Nr. 100012-105352). Mehrere Personen haben zum Gelingen der Untersuchungen beigetragen, insbesondere Gabriela Stamm, Philipp Kästli, Andrea Möller, Sibylle Steimen, Ivo Oprsal, Johannes Ripperger, Jochen Wössner, Regula Schatzmann, Alex R. Furger, Ina Spottke und Peter Huggenberger. Ein herzlicher Dank geht an Arnfried Becker und Matthieu Ferry für die im Artikel gezeigten Fotografien.

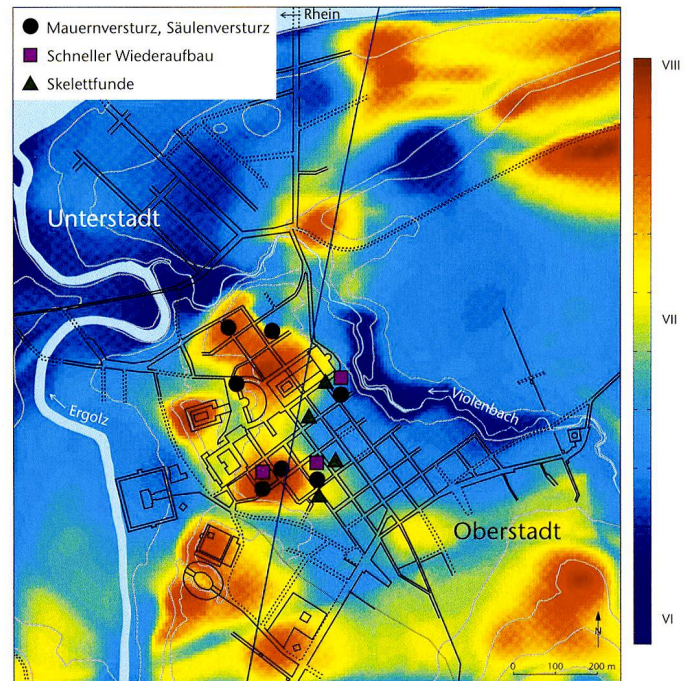


Abb. 15: Mögliche Auswirkungen eines Erdbebens der Magnitude 5,9 in Augusta Raurica (Augst/BL und Kaiseraugst/AG). Die berechneten makroseismischen Intensitäten sind mit den erdbebenrelevanten archäologischen Funden verglichen. Bedeutung der makroseismischen Intensitäten: VI = leichte Gebäudeschäden; VII = Gebäudeschäden; VIII = schwere Gebäudeschäden; IX = zerstörend. Die Fundstellen mit Mauer- und Säulenversturz sind nicht vollständig kartiert. M. 1:18 500.

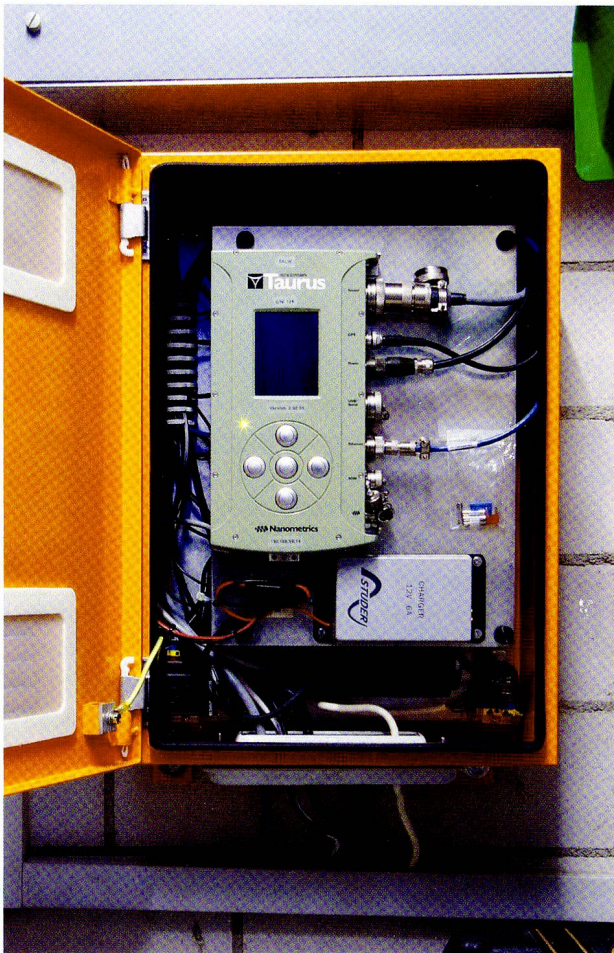


Abb. 16: Eines der im Gebiet von Augusta Raurica fest installierten seismischen Messinstrumente. Das kleine Gerät in einem Schutzkasten ist in der Kellerwand einer Scheune in der römischen Oberstadt (Augst/BL, Insula 9) verankert und permanent mit der Zentrale des Schweizer Erdbebendienstes an der ETH in Zürich verbunden. Ein weiteres Gerät steht in einem Keller in der antiken Unterstadt (Kaiseraugst/AG, Region 16D).

A: Rekorder und Kommunikation, B: Sensor mit Schutzhülle, C: Notstromversorgung.

Abgekürzt zitierte Literatur

- Becker/Davenport 2003: A. Becker/C. A. Davenport, Rockfalls triggered by the AD 1356 Basle Earthquake. *Terra Nova* 15, 2003, 258–264.
- Becker/Davenport/Giardini 2002: A. Becker/C. A. Davenport/D. Giardini, Palaeoseismicity studies on end-Pleistocene and Holocene lake deposits around Basle, Switzerland. *Geophys. Journ. Internat.* 149, 2002, 1–20.
- Becker/Giardini 2001: A. Becker/D. Giardini, Paläoseismologische Forschung in der Schweiz – das PALEOSEIS-Projekt. *GEOForumCH* 9, 2001, 30–33.
- Becker u. a. 2000: A. Becker/C. A. Davenport/W. Haeblerli/C. Burga/R. Perret/A. Flisch/W. A. Keller, The Fulnau landslide and former Lake Seewen in the northern Swiss Jura Mountains. *Eclogae Geol. Helv.* 93, 2000, 291–305.
- Carbon u. a. 1999: D. Carbon/F. Lemeille/M. Cushing/Th. Bitterli/Ch. Flehoc/Ch. Innocent, Von Stalagmiten aufgezeichnete Brüche und Verformungen seismischen Ursprungs in der am schwersten betroffenen Zone des Erdbebens von Basel (18. Oktober 1356). *Stalactite* 49, 1999, 95–109.
- Faber u. a. 1994: S. Faber/K.-P. Bonjer/W. Brüstle/N. Deichmann, Seismicity and structural complexity of the Dinkelberg block, Southern Rhine Graben. *Geophys. Journ. Internat.* 116, 1994, 393–408.
- Fäh/Huggenberger 2006: D. Fäh/P. Huggenberger, INTERREG III, Erdbebenmikrozonierung am südlichen Oberrhein. Zusammenfassung für das Projektgebiet in der Schweiz. CD und Report (erhältlich bei den Autoren).
- Fäh u. a. 2006: D. Fäh/S. Steimen/I. Oprsal/J. Ripperger/J. Wössner/R. Schatzmann/P. Kästli/I. Spottke/P. Huggenberger, The earthquake of 250 A. D. in Augusta Raurica, a real event with a 3D site-effect? *Journ. Seismology* 10, 2006, 459–477 (doi:10.1007/s10950-006-9031-1).
- Fäh u. a. im Druck: D. Fäh/M. Gisler/B. Jaggi/P. Kästli/T. Lutz/V. Masciadri/C. Matt/D. Mayer-Rosa/D. Rippmann/G. Schwarz-Zanetti/J. Tauber/T. Wenk, An interdisciplinary Revision: the 1356 Basel Earthquake. *Geophys. Journ. Internat.* (im Druck).
- Ferry 2003: M. Ferry, Developments in Palaeoseismology from a slow intra-late region (Basel-Reinach fault, Switzerland) and a fast inter-late region (North Anatolian fault, Turkey). PhD Thesis, Swiss Federal Institute of Technology (ETH Zürich) (Zürich 2003).
- Ferry u. a. 2005: M. Ferry/M. Meghraoui/B. Delouis/D. Giardini, Evidence for Holocene palaeoseismicity along the Basel-Reinach active normal fault (Switzerland): a seismic source for the 1356 earthquake in the Upper Rhine Graben. *Geophys. Journ. Internat.* 160, 2005, 554–572.
- Fritsche/Fäh eingereicht: S. Fritsche/D. Fäh, The 1946 Magnitude 6.1 Earthquake in the Valais: Site-Effects as Contributor to the Damage. (eingereicht).
- Fritsche u. a. 2006: S. Fritsche/D. Fäh/M. Gisler/D. Giardini, Reconstructing the damage field of the 1855 earthquake in Switzerland: historical investigations on a well-documented event. *Geophys. Journ. Internat.* 166, 2006, 719–731.
- Furger in Vorb.: A. R. Furger, Ruinenschicksale. Archäologische Schadensbilder und ihre Ursachen. *Forsch. Augst* (in Vorb.).
- Gisler/Fäh/Deichmann 2004: M. Gisler/D. Fäh/N. Deichmann, The Valais earthquake of December 9, 1755. *Eclogae Geol. Helv.* 97, 2004, 411–422.
- Gisler/Fäh/Giardini 2008: M. Gisler/D. Fäh/D. Giardini (Hrsg.), Nachbeben. Eine Geschichte der Erdbeben in der Schweiz (Bern 2008).
- Gisler/Fäh/Masciadri 2007: M. Gisler/D. Fäh/V. Masciadri, «Terrae motus factus est»: earthquakes in Switzerland before A. D. 1000. A critical approach. *Nat. Hazards* 43, 2007, 63–79.
- Gisler/Weidmann/Fäh 2005: M. Gisler/M. Weidmann/D. Fäh, Erdbeben in Graubünden. Vergangenheit, Gegenwart, Zukunft (Chur 2005).
- Interreg II 2001: Landratsamt Waldshut (Hrsg.), Erkundung der Grundwasserleiter und Böden im Hochrheintal. Ergebnisse und Karten (Waldshut-Tiengen 2001).
- Kastrup u. a. 2004: U. Kastrup/M.-L. Zoback/N. Deichmann/K. Evans/D. Giardini/A. J. Michael, Stress field variations in the Swiss Alps and the northern Alpine foreland derived from inversion of fault plane solutions. *Journ. Geophys. Res.* 109, 2004, B01402 (doi:10.1029/2003JB002550B01402).

- Lacave u. a. 2004: C. Lacave/G. M. Koller/J. J. Egozcue, What can be concluded about seismic history from broken and unbroken speleothems? *Journ. Seismology and Earthquake Engineering* 8, 2004, 431–455.
- Lemeille u. a. 1999: F. Lemeille/M. Cushing/D. Carbon/B. Grellet/Th. Bitterli/Chr. Flehoc/Chr. Innocent, Co-seismic ruptures and deformations recorded by speleothems in the epicentral zone of the Basel earthquake. *Geodinamica Acta* 12, 1999, 179–191.
- Löw 1987: S. Löw, Kernkraftwerk Kaiseraugst. Seismotektonische Untersuchungen. Zwischenbericht (Phase 2A). Regionale Studien und provisorische Beurteilung der seismotektonischen Verhältnisse (Baden [Motor Columbus] 1987).
- Meghraoui u. a. 2001: M. Meghraoui/B. Delouis/M. Ferry/D. Giardini/P. Huggenberger/I. Spottke/M. Granet, Active Normal Faulting in the Upper Rhine Graben and Paleoseismic Identification of the 1356 Basel Earthquake. *Science* 293, 2001, 2070–2073.
- Monecke u. a. 2004: K. Monecke/F. Anselmetti/A. Becker/M. Sturm/D. Giardini, Signature of historical earthquakes in lake sediments in Central Switzerland. *Tectonophysics* 394, 2004, 21–40.
- Oprsal/Fäh 2007: I. Oprsal/D. Fäh, 1D vs 3D strong ground motion hybrid modelling of site, and pronounced topography effects at Augusta Raurica, Switzerland – Earthquakes or battles? *Proceedings of 4th Int. Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, June 25–28, 2007, Paper no. 1416 (Thessaloniki 2007), 12 Seiten.
- Schatzmann 2005: R. Schatzmann, Militaria und Siedlungskontexte des späten 3. Jahrhunderts aus Augst. *Carnuntum/Jahrb.* 2005, 217–226.
- Schatzmann 2006: R. Schatzmann, Ein Erdbeben? – Die Koloniestadt Augusta Raurica als Fallbeispiel. *Mittelalter* 11, 2006, 165–170.
- Schatzmann 2007: R. Schatzmann, Anmerkungen zur Annahme eines Erdbebens um die Mitte des 3. Jahrhunderts in Augusta Raurica. In: A. Smolka/G. H. Waldherr (Hrsg.), *Antike Erdbeben im alpinen und zirkumalpinen Raum. Befunde und Probleme in archäologischer, historischer und seismologischer Sicht (Earthquakes in Antiquity in the Alpine and Circum-alpine Region. Findings and Problems from an Archaeological, Historical and Seismological Viewpoint)*. Beiträge des interdisziplinären Workshops, Schloss Hohenkammer, 14./15. Mai 2004. *Geographica Hist.* 24 (Stuttgart 2007) 50–68.
- Schatzmann in Vorb.: R. Schatzmann, Die Spätzeit von Augusta Raurica (Arbeitstitel). *Forsch. Augst (in Vorb.)*.
- Schnellmann u. a. 2002: M. Schnellmann/F. S. Anselmetti/D. Giardini/J. A. McKenzie/S. N. Ward, Prehistoric earthquake history revealed by lacustrine slump deposits. *Geology* 30, 2002, 1131–1134.
- Schnellmann u. a. 2006: M. Schnellmann/F. S. Anselmetti/J. A. McKenzie/D. Giardini, 15'000 Years of mass-movement history in Lake Lucerne: Implications for seismic and tsunami hazards. *Eclogae Geol. Helv.* 99, 2006, 409–428.
- Schürch/Becker 2005: P. Schürch/A. Becker, Studies on 'precarious rocks' in the epicentral area of the AD 1356 Basle earthquake, Switzerland. *Geophys. Journ. Internat.* 163, 2005, 689–697.
- Schwarz-Zanetti u. a. 2003: G. Schwarz-Zanetti/D. Fäh/R. Schibler/V. Masciadri/P. Kästli/D. Giardini, The earthquake in Unterwalden and the rockslide from the Bürgenstock into Lake Lucerne on September 18, 1601. *Eclogae Geol. Helv.* 96, 2003, 441–450.
- Schwarz-Zanetti u. a. 2004: G. Schwarz-Zanetti/N. Deichmann/D. Fäh/V. Masciadri/J. Goll, The Earthquake in Churwalden (CH) of September 3, 1295. *Eclogae Geol. Helv.* 97, 2004, 255–264.
- Schwarz-Zanetti u. a. in Vorb.: G. Schwarz-Zanetti/D. Fäh/V. Masciadri/P. Kästli/J.-L. Loizeau, Two damaging earthquakes in the 16th century: 1524 at Ardon and 1584 at Aigle (in Vorb.).
- Strasser u. a. 2006: M. Strasser/F. Anselmetti/D. Fäh/D. Giardini/M. Schnellmann, Magnitudes and source areas of large prehistoric northern Alpine earthquakes revealed by slope failures in lakes. *Geology* 34, 2006, 1005–1008 (doi:10.1130/G22784A.1).
- D. Fäh/F. Kind/D. Giardini, Inversion of local S-wave velocity structures from average H/V ratios, and their use for the estimation of site-effects. *Journ. Seismology* 7, 2003, 449–467.
- D. Fäh/R. Schatzmann/I. Oprsal, Augusta Raurica – Spuren eines Erdbebens in der Mitte des 3. Jahrhunderts? In: *Gisler/Fäh/Giardini* 2008, 21–24.
- D. Fäh/D. Giardini/F. Bay/F. Bernardi/J. Braunmiller/N. Deichmann/M. Furrer/L. Gantner/M. Gisler/D. Isenegger/J.-M. Jimenez/P. Kästli/R. Koglin/V. Masciadri/M. Rutz/C. Scheidegger/R. Schibler/D. Schorlemmer/G. Schwarz-Zanetti/S. Steimen/S. Sellami/S. Wiemer/J. Wössner, Earthquake Catalogue of Switzerland (ECOS) and the related macroseismic Database. *Eclogae Geol. Helv.* 96, 2003, 219–236.
- M. Gisler/D. Fäh/P. Kästli, Historical Seismicity in Central Switzerland. *Eclogae Geol. Helv.* 97, 2004, 221–236.
- A. Möller, Identifikation von aktiven Bruchzonen in der Region der Römerstadt Augusta Raurica. Bachelorarbeit Departement Erdwissenschaften (Schweizerischer Erdbebendienst Zürich 2006).
- I. Oprsal/D. Fäh/M. Mai/D. Giardini, Deterministic earthquake scenario for the Basel area. Simulating strong motion and site effects for Basel, Switzerland. *Journ. Geophys. Research* 110, 2005, B04305 (doi:10.1029/2004JB003188).
- J. Ripperger/D. Fäh, Second-year Report SNF-Project «Records of earthquakes, battles, and reconstructions in Augusta Raurica: an archaeological and seismological research project». Schweizerischer Erdbebendienst (ETHZ Zürich 2003).
- G. Schwarz-Zanetti/V. Masciadri/D. Fäh/P. Kästli, The false Basel earthquake of May 12, 1021. *Journ. Seismology* 12, 2007, 125–129.

Abbildungsnachweis

- Abb. 1: Resultate des europäischen Projekts SESAME, 2002.
- Abb. 2; 14: Karten Schweizerischer Erdbebendienst, CH-8092 Zürich.
- Abb. 3: Nach Sebastian Münster, *Cosmographia* (Basel 1544¹).
- Abb. 4; 16: Fotos Susanne Schenker.
- Abb. 5: Nach Meghraoui u. a. 2001; Ferry 2003.
- Abb. 6; 7: Fotos Matthieu Ferry.
- Abb. 8; 9: Fotos Arnfried Becker.
- Abb. 10: Foto Alex R. Furger.
- Abb. 11: Nach Ferry u. a. 2005, Abb. 12.
- Abb. 12: Foto Ausgrabungen Augst/Kaiseraugst (nach H. Bender, *Archäologische Untersuchungen zur Ausgrabung Augst-Kurzenbettli. Ein Beitrag zur Erforschung der römischen Rasthäuser. Antiqua* 4 [Frauenfeld 1975] Taf. 1,1).
- Abb. 13: Plan nach Schatzmann 2006, Abb. 4 (Zeichnung Markus Schaub und Michael Vock); Fotos Ausgrabungen Augst/Kaiseraugst (nach J. Schibler/A. R. Furger [mit einem Beitr. v. B. Kaufmann], *Die Tierknochenfunde aus Augusta Raurica [Grabungen 1955–1974]. Forsch. Augst* 9 [Augst 1988] Abb. 121; 122).
- Abb. 15: Karte Schweizerischer Erdbebendienst, CH-8092 Zürich. Römischer Stadtplan Markus Schaub und Michael Vock.

Weiterführende Literatur

- D. Fäh/F. Kind/D. Giardini, A theoretical investigation of average H/V ratios. *Geophys. Journ. Internat.* 145, 2001, 535–549.

