



Doctoral Thesis

Magnitude Scaling Relations and Attenuation in Thick Sediments: Application to the Induced Seismicity Beneath the City of Basel, Switzerland

Author(s):

Bethmann, Falko

Publication Date:

2011

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-6607742> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 19510

**Magnitude scaling relations and attenuation in thick
sediments: application to the induced seismicity beneath
the city of Basel, Switzerland**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

DOCTOR OF SCIENCES

presented by

FALKO BETHMANN

Dipl. Geophys.,

Ludwig Maximilian University of Munich

born April 29, 1975

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Domenico Giardini, examiner

Dr. Nicolas Deichmann, Co-examiner

Assoc. Prof. Dr. P. Martin Mai, Co-examiner

Prof. Dr. Frank Scherbaum, Co-examiner

Zürich, 2011

Zusammenfassung

Der Schwerpunkt dieser Doktorarbeit liegt auf der Bestimmung der Verhältnisse von lokaler Magnitude (M_L) zu Momentenmagnitude (M_w) für kleine Erdbeben ($M_L < 3$) in der Schweiz. Die lokale Magnitude ist die routinemässig bestimmte Magnitude des Schweizerischen Erdbebendienstes (SED), welche generell gegenüber der Bevölkerung im Falle eines Erdbebens in der Schweiz kommuniziert wird. Aufgrund der standardisierten Abläufe ist M_L im Normalfall die erste Magnitude die nach einem Erdbeben ermittelt wird. M_L ist jedoch hinsichtlich ihrer Bestimmung limitiert (z.B. Sättigungseffekte bei grossen Magnituden). Heutzutage wird die physikalischere Momentenmagnitude bevorzugt. M_w ist auch die Basis für seismische Gefahrenabschätzung und dient als Grundlage für den Erdbebenkatalog der Schweiz (ECOS). Für die 2002-Version des Katalogs wurde von einer Arbeitsgruppe des SED bereits eine erste Regression zwischen den beiden Magnituden für $M_L > 3$ ermittelt. Mit der Weiterentwicklung des schweizerischen Monitoring-netzwerkes ist es nun möglich, die Beziehung von M_L zu M_w auch für kleinere Magnituden zu bestimmen. In dieser Arbeit wird eine neue Relation zwischen den beiden Magnituden im Bereich von $0.1 \leq M_L \leq 5.5$ ermittelt.

Der erste Teil beginnt mit einer Untersuchung der induzierten Seismizität vor und nach der Stimulation eines geothermischen Reservoirs unter der Stadt Basel. Eine direkte Bestimmung von M_L und M_w ist aufgrund des dichten Observationsnetzwerkes des SED, dem Landeserdbebendienst Baden Württemberg und den sechs Bohrlochensensoren von Geothermal Explorers möglich. Mit Hilfe einer detaillierten Fehlerabschätzung werden die ursächlichen Parameter für Magnitudenungenauigkeit identifiziert. Das anschliessende Einbeziehen von Herdflächenlösungen bringt eine Verbesserung in der Stabilität der Ergebnisse. Die Ergebnisse zeigen, dass sich für kleine Magnituden eine andere Skalierungsbeziehung ergibt als für

grosse Magnituden. Anstelle einer Skalierung von 1:1 für $M_L > 3$ ergibt sich nun eine Relation von $M_L \sim 1.5M_w$. Im Anschluss wird die Analyse auf Beben natürlichen Ursprungs in der Schweiz ausgeweitet. Im Allgemeinen sind solche Beben schlechter bestimmt: Wellenformen werden von weniger Stationen aufgezeichnet und Abstrahlparameter wie z.B der Herdmechanismus können nicht bestimmt werden. Die Problematik kann umgangen werden, in dem man die Magitudenanalyse auf Sequenzen ähnlicher Beben beschränkt. Ein kleines Beben mit ähnlichen Wellenformen kann dann als 'geschrumpfte' Version eines grossen Bebens angenommen werden. In einem relativen Vergleich können so einige Hauptverursacher für Magnitudenungenauigkeit, wie Standorteffekte und Abstrahlcharkateristika, eliminiert werden. Die Resultate für Beben natürlichen Ursprungs bestätigen das Skalierungsverhalten, das auch für die induzierte Seismizität in Basel bestimmt wurde. Um zwischen dem Einfluss von Effekten an der Quelle und entlang des Ausbreitungsweges auf die Skalierungsbeziehung zu unterscheiden, wird ein theoretisches Modell entwickelt. Ein theoretischer Quellpuls wird durch ein vereinfachtes zweischichtiges Erdmodell propagiert, welches die Geologie in Basel repräsentiert. Dämpfung und Streuung der Wellenform werden als Ursache der unterschiedlichen Skalierungsbeziehung identifiziert. Quelleffekte wie ein möglicher Anstieg der Bruchgeschwindigkeit oder des Spannungsabfalls mit dem seismischen Moment spielen eine untergeordnete Rolle.

Im zweiten Teil der Doktorarbeit werden die obengenannten Resultate in eine Skalierungsstudie integriert, die einen weiteren Magnitudenbereich umfasst. Zuerst werden drei verschiedene Methoden, die auch unterschiedliche Magnitudenbereiche umfassen, miteinander verglichen. Alle drei Studien finden einen Übergang von einer 1:1 Skalierung für $M_L > 3$ zu $M_L \sim 1.5M_w$ hinsichtlich kleiner werdenden Magnituden. Die Resultate der drei Methoden stimmen im Allgemeinen gut überein. Unterschiede ergeben sich durch die unterschiedliche Berücksichtigung von oberflächennahen Gesteinsschichten, sowie dem Unterschied von lokalen Dichte-/Geschwindigkeits-Profilen gegenüber generellen Schweiz weit gültigen Modellen. Als Arbeitsergebnis unserer Studie schlagen wir eine neue Umrechnungsrelation vor, die aus zwei linearen Segmenten für $M_L < 2$ und $M_L > 3$ und einem quadratischen Übergang dazwischen besteht. Die neue Skalierungsbeziehung wird bereits im neuen Erbebenkatalog der Schweiz, ECOS-09, berücksichtigt.

Im dritten Teil der Doktorarbeit wird das Augenmerk auf die Dämpfung von seismischen Wellen in der Region Basel gelegt. Als Motivation liegen die Ergebnisse des ersten Teils der Arbeit zu Grunde. Dort wurde die Dämpfung als einer der Hauptgründe für die nicht lineare Beziehung der Magnituden identifiziert. Es werden zwei verschiedene Methoden, die die Dämpfung (Q) bestimmen miteinander verglichen. Zuerst wird Q mit Hilfe einer weitverbreiteten Spectralverhältnismethode im Frequenzbereich bestimmt. Im Anschluss wird Q über Pulsbreiten im Zeitbereich abgeschätzt. Beide Methoden liefern vergleichbare Ergebnisse. Der Umstand, dass das tiefste Bohrlochinstrument im kristallinen Grundgebirge verankert ist, macht das Abschätzen der Dämpfung innerhalb der Sedimente unter der Stadt Basel möglich. Idealerweise sollte das Bestimmen der Spectralverhältnisse nur zwischen Stationen bestimmt werden, die unter gleichen Abstrahlwinkeln zu sehen sind, da sonst Fehler aufgrund der anders beobachteten Pulsbreite auftreten können. Diesem Problem wird mit einer theoretischen Analyse Rechnung getragen. Für die meisten der verwendeten Stationen erweist sich der Fehler, der durch unterschiedliche Abstrahlwinkel entsteht, im untersuchten Frequenzbereich (20-130Hz), als gering. Dies ermöglicht eine flächendeckende Analyse von Q in Basel. Die Sedimente in Basel erweisen sich als starker Dämpfer der Wellenformen auch in grösseren Tiefen. In 500m Tiefe beträgt der Wert von Q ca. 50 und in 1200m Tiefe ca. 100. Des Weiteren wird kein Unterschied für die Dämpfung der P- und S-Wellen festgestellt. Diese Werte weisen auf eine höhere Dämpfung hin, als bisher angenommen und sind eine mögliche Ursache für beobachtete Diskrepanzen zwischen früheren Modellierungen zur Peak-Ground Geschwindigkeit in Basel. Diese Studie komplettiert die Forschung der Dämpfung von seismischen Wellen in oberflächennahen Bereichen und der Kruste in der Schweiz für Frequenzen oberhalb 20Hz.

Abstract

The main focus of this thesis is to investigate the scaling of local magnitude (M_L) versus moment magnitude (M_w) for small earthquakes ($M_L < 3$) in Switzerland. Local magnitude is the magnitude that is routinely estimated at the Swiss Seismological Service (SED) and broadcasted to the public whenever an earthquake in Switzerland occurs. It is usually the first magnitude available, because of its fast and standardized determination procedures. However, due to its limitations (e.g. saturation at high magnitudes), the more physically-based moment magnitude is the preferred magnitude scale today. Also for modern seismic hazard assessment M_w has been chosen as reference, therefore the earthquake catalogue of Switzerland (ECOS) is now also based on M_w . For the 2002 catalogue a first regression between M_L and M_w was determined by a magnitude working group at the SED down to magnitude $M_L = 3$. With the improvement of the Swiss network, we now have the data to extend this relation down to smaller magnitudes. In this thesis we propose a new relationship of M_L vs. M_w in the magnitude range of $0.1 \leq M_L \leq 5.5$.

I start with the investigation of induced seismicity, recorded during and after the stimulation of a geothermal reservoir underneath the city of Basel. The dense network of the Swiss Seismological Service augmented with borehole data of Geothermal Explores Inc. and data from the Landeserdbebendienst in Germany allows for a direct comparison between both magnitudes. A detailed error analysis identifies the major contributors to magnitude uncertainty. Using individual focal mechanism information improves the stability of magnitude estimates. I show that the scaling of small magnitudes is different in the lower range compared to magnitudes above $M_L > 3$. Instead of a 1:1 scaling which was previously thought to extend down to lower magnitudes, a scaling of $M_L \sim 1.5M_w$ is found. To

confirm those observations, I extend my analysis to earthquakes of natural origin across Switzerland. However, such earthquakes are recorded by fewer stations and information about radiation characteristics (e.g focal mechanisms) are missing. To overcome such problems I focus on sequences of similar earthquakes. A small earthquake with similar waveforms can be assumed to be a 'scaled down' version of a larger one. Then, in a relative comparison, some of the major contributors to magnitude uncertainty, like site effects and uncertainty in radiation coefficient, cancel out. Results confirm a similar magnitude scaling for natural earthquakes compared to the induced seismicity of Basel. To distinguish between source and path effects and their effect on the observed scaling relation, I compare my findings to a theoretical model. I propagate a theoretical displacement pulse through a two-layer half space model that represents a simplified model of the geology in Basel. I find attenuation and scattering mechanisms to be dominating over source effects such as a possible systematic increase of stress drop or rupture velocity with moment.

In the second part of this thesis my results are incorporated in a joint study that determines the scaling of magnitudes in a wider magnitude range. We compare three different methods of magnitude estimation over different magnitude ranges. All three studies observe a transition of the scaling factor of 1 for $M_L > 3$ towards $M_L \sim 1.5M_w$ for $M_L < 2$. The results of the three methods are in general agreement, differences are explained by a different treatment of the near surface and using localized velocity/density parameters versus a general velocity/density model for Switzerland. As a deliverable we propose a new magnitude conversion relation that consists of two linear segments for $M_L < 2$ and $M_L > 3$ and a quadratic transition in between. The new magnitude relation is already incorporated in the new ECOS-09 earthquake catalogue of Switzerland.

In the third part of the thesis I focus on attenuation in the Basel area. The motivation were results of the first part, in which I identified attenuation as one of the major reasons for a nonlinear relation of magnitudes. I apply two different methods to estimate attenuation (Q). I use a standard spectral ratio approach in the frequency domain and compare it to measures of Q via pulse widths in the time domain. Both methods deliver similar results. The fact that one of the

borehole sensors is positioned within the crystalline basement allows us to measure attenuation across the sedimentary basin. Ideally in spectral ratios, the stations recording at different depths should be seen under the same take-off angle to avoid bias due to observed pulse shape changes with take-off angle. I therefore present a theoretical analysis that demonstrates how Q estimates change when stations of different take-off angle are taken. For most stations changes of Q with take-off angle are minor for the frequency range of interest in this study (20-130Hz). This allows for an area wide study across the city of Basel. I find the sediments of Basel highly attenuating also at deeper depths. At 500m I obtain a Q as low as 50 and at 1200m I obtain Q values of 100. I also observe similar Q -values using either P- or S- wave for analysis. Those values are lower as previously assumed and may account for some discrepancies that were observed during peak ground velocity modeling for the Basel area in previous studies. This study bridges the gap between near surface studies of attenuation and crustal attenuation in Switzerland for frequencies $> 20Hz$.