UNI BASEL

Schweizerischer Erdbebendienst
Swiss Seismological Service

ETH Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

INTERREG III
Erdbebenmikrozonierung am südlichen Oberrhein

Zusammenfassung

Donat Fäh
Schweizerischer Erdbebendienst, ETH Zürich

und

Peter Huggenberger
Kantonsgeologie, Universität Basel

20.11.2006

Basel-Stadt

Kanton Basel-Landschaft

Inhalt

1 Hintergrund 3
2 Erdbeben unterscheiden sich von anderen Naturgefahren 3
3 Handlungsbedarf 4
4 Grenzüberschreitende Erdbebendokumentation 5
5 Mitwirkende 6
6 Projektleitung und Antragstellung 6
7 Projektbearbeitung 6
8 Verdankungen 6
9 Vorgehen bei der Mikrozonierung 6
10 Zusammenfassung der Teilberichte 8
10.1 Geologische Grundlagen für die quantitative Erdbebenmikrozonierung (Teilbericht 4) 8
10.2 Zoneneinteilung (Teilbericht 1) 15
10.3 Bestimmung der Scherwellengeschwindigkeiten (Teilbericht 2) 23
10.4 Numerische Modellierung (Teilbericht 3) 24
10.5 Regionale seismische Gefährdung 24
10.6 Erneuerung bestehender Starkbebenstationen 25
10.7 Bestimmung der zonenspezifischen Antwortspektren (Teilbericht 5) 25
11 Umsetzung und weiteres Vorgehen 30

1 Hintergrund

Erdbeben sind vor allem deshalb gefährlich, weil lange Zeit keine angemessenen Vorsorgemassnahmen ergriffen wurden. Entsprechende Bauvorschriften sind in der Schweiz erst seit 1989 vorhanden und werden vielfach nur bedingt umgesetzt. Mit einer entsprechenden Vorbereitung könnten die seismisch bedingten Risiken für Leben und Eigentum, selbst bei schwersten Erdbeben, geringer gehalten werden. Am Oberrhein und im nordwestlichen Teil der Schweiz (Region Basel) wurden grössere Erdbeben bis vor wenigen Jahren im Vergleich zu anderen Naturkatastrophen als wenig wahrscheinlich, und deshalb für die Region als nicht relevant eingeschätzt. Obwohl die Gefährdung durch Erdbeben in Frankreich, Deutschland und in der Schweiz dokumentiert ist, wurde die Tragweite einer Erdbebenkatastrophe im Agglomerationsgebiet am südlichen Oberrhein vernachlässigt.

2 Erdbeben unterscheiden sich von anderen Naturgefahren

Erdbeben können gleichzeitig ausgedehnte Gebiete in Mitleidenschaft ziehen:

- Zerstörerische Erdbeben treten im südlichen Oberrheingraben in Baden-Württemberg, dem Elsass und in der Nordwestschweiz selten und ohne Vorwarnung auf.
- Bis heute sind zuverlässige Prognosen über Zeitpunkt, Ort und Intensität nicht möglich.
- Kostenschätzungen für die Behebung der Schäden eines grösseren Bebens allein für die Region Basel liegen in der Grössenordnung der Staatsrechnung der Schweizerischen Eidgenossenschaft (ca. 50 Milliarden Schweizer Franken).

Die Erdbeben der letzten Jahre, wie diejenigen von Japan (Kobe), der Türkei, Griechenland, Taiwan, dem Iran und Pakistan, zeigten deutlich, dass starke Beben massive Zerstörungen durch direkte und indirekte Einwirkungen an Bauwerken, Industrie- und Verkehrsanlagen hervorrufen können.

Erdbeben finden in der Region des südlichen Oberrheingrabens regelmässig, wenn auch nicht allzu häufig, statt. Historische Aufzeichnungen von Erdbeben in der Region gehen weit zurück. Bis ins 17. Jahrhundert gab es etwa alle hundert Jahre ein grösseres Erdbeben der Intensität VII oder grösser. Danach blieb ein grösseres Beben bislang aus. Neuere Statistiken zeigen, dass grosse Schadensbeben hierzulande eine geringe Eintrittswahrscheinlichkeit aufweisen. Das Erdbeben von Basel 1356 hatte eine ähnliche Stärke wie jenes von Kobe 1995 und würde heute einen Schaden von schätzungsweise 50 Milliarden Schweizer Franken verursachen (Schätzungen: Swiss Re Bericht, 2000). Ein mit 1356 vergleichbares Beben wird in der Region Basel im statistischen Mittel nur etwa alle 2000 bis 2500 Jahre erwartet. Wegen des grossen Schadenspotentials und den hohen Folgekosten, müssen solche Beben im Hinblick auf die Sicherheitsvorsorge (Bevölkerungsschutz) und wirtschaftliche Überlegungen in Zukunft vermehrt berücksichtigt werden. Eine zutreffende Erdbebenvorhersage wird auch langfristig nicht möglich sein.

Kleinere Schadensbeben sind jedoch weitaus häufiger. Man rechnet für die Region des Oberrheins etwa mit einem Erdbeben alle zehn Jahre, das

kleinere Gebäudeschäden und Betriebsstörungen verursacht (Intensität V bis VI). Eine Serie von kleineren Schadensbeben in den letzten Jahren fand in der Öffentlichkeit starke Beachtung. Generell bestand ein Bedürfnis nach aktueller und kompetenter Information und nach Erklärung der fachlichen Zusammenhänge.

3 Handlungsbedarf

Im Hinblick auf die Einschätzung möglicher Schäden an Gebäuden und Infrastruktureinrichtungen durch ein Erdbeben sind lokal drei Faktoren wichtig:

- der Untergrund und sein Einfluss auf die Verstärkung von Bodenbewegungen (Erschütterungsfähigkeit),
- der Zusammenhang zwischen den kritischen Resonanzfrequenzen des Untergrundes und denjenigen der Bauwerke und
- die Bauweise, die Konstruktion, das Alter und der Zustand der Bauwerke.

Die Analyse der jüngsten Beben hat insbesondere verdeutlicht, dass die Schadensintensität durch das Zusammenspiel dieser drei Faktoren bestimmt wurde. Das bedeutet, dass durch gezielte, auf die lokale Geologie abgestimmte bauliche Massnahmen, eine Begrenzung der Erdbebenschäden erreicht werden kann. Man nennt die Kartierung des geologischen Einflusses auf die durch Erdbeben verursachten Bodenerschütterungen eine Mikrozonierung.

Eine 1998 in der Schweiz erarbeitete Studie "Handlungsbedarf von Behörden, Hochschulen, Industrie und Privaten zur Erdbebensicherung der Bauwerke in der Schweiz" (SIA-Dokumentation D0150, 1998) bewertet in Gebieten erhöhter seismischer Aktivität (z.B. Region Basel) die Mikrozonierung als geeignetes Werkzeug und Basis für eine verbesserte Bestimmung der Erdbebengefährdung an einem Standort. Im Vergleich mit anderen Elementen des dort festgestellten Handlungsbedarfs wird die Mikrozonierung mit "gemässigten Kosten", "sehr gutem Kosten-Nutzen-Verhältnis", "kurz- bis mittelfristig zu realisieren" und "dringlich" klassifiziert und erhält damit höchste Priorität.

Rechtliche Grundlagen auf Kantons- oder Gemeindeebene für Konzeption, Koordination, Prioritätensetzung und Finanzierung behördlicher Massnahmen zur Vorbeugung gegen Erdbeben fehlen noch weitgehend. Die rechtliche Verbindlichkeit der in der Schweiz geltenden SIA Norm 261 ist ungenügend. Dieses Defizit steht im Gegensatz zu den Gegebenheiten bei anderen, weniger risikoreichen Naturgefahren.

Die besondere Situation im Dreiländereck von Schweiz, Frankreich und Deutschland mit den Agglomerationen Basel, Mulhouse und Lörrach erfordert zudem eine grenzüberschreitende Zusammenarbeit. Die Region um Basel hat eine relativ hohe Besiedelungsdichte, eine zunehmend vernetzte Infrastruktur in allen drei Ländern, eine hohe Konzentration von empfindlichen und sicherheitsrelevanten technischen Anlagen sowie Verkehrs- und Kommunikationseinrichtungen. Die Auswirkungen eines Erdbebens in dieser Region müssen daher in Vorsorge und Bewältigung grenzüberschreitend erfasst werden.

4 Grenzüberschreitende Erdbebendokumentation

Für den Kanton Basel Stadt wurde durch die Angewandte und Umweltgeologie der UNI Basel und den Schweizerischen Erdbebendienst im Auftrag des Polizei- und Militärdepartementes BS bereits 1997 eine qualitative Mikrozonierungskarte erstellt. Diese qualitative Mikrozonierungskarte beschreibt die lokalen Variationen des Aufschaukelungspotentials seismischer Wellen in Abhängigkeit vom geologischen Untergrund.
Der Schweizerische Erdbebendienst unter Mitarbeit der Angewandten und Umweltgeologie der UNI Basel, hat im Zeitraum 1998-2002 ein Pilotprojekt für eine spektrale quantitative Mikrozonierung der Stadt Basel durchgeführt. Diese Arbeiten erfolgten innerhalb des ETH-Projekts "Erdbebenszenarien für die Schweiz". Des weiteren erfolgten verschiedene Forschungsarbeiten im Bereich der Paläoseismologie, welche die Identifikation von aktiven Bruchzonen in der Region Basel und eine verbesserte Definition der Wiederkehrperiode grosser Erdbeben zum Ziel hatten. Aufgrund der Werte in der neuen seismischen Gefährdungskarte, welche im Jahre 2003 durch den Schweizerischen Erdbebendienst publiziert wurde, wurde die Region Basel in der Norm SIA261 in eine höhere Erdbebengefährdungszone eingestuft.
Das hier vorgestellte INTERREG Projekt „Erdbebenmikrozonierung am südlichen Oberrhein“ bildet die Fortsetzung der wissenschaftlichen Forschung der letzten 15 Jahre (siehe Fäh et al., 2003b) und hatte zum Ziel, eine spektrale quantitative Mikrozonierung für den Kanton Basel Stadt, und Teile der Kantone Basel Landschaft und Solothurn zu realisieren. Durch die grenzübergreifende Zusammenarbeit mit Deutschland und Frankreich wurden die Grundlagen geschaffen, eine einheitliche und grenzüberschreitende Gefährdungs- und Risikobeurteilung zu ermöglichen. Sowohl Deutschland als auch Frankreich realisierten innerhalb des INTERREG Projekts eine qualitative Mikrozonierung. Die gemeinsame Datenbasis wird auch dort in Zukunft eine spektrale quantitative Mikrozonierung ermöglichen.
Die Ergebnisse der vorliegenden Studie liefern differenziertere Grundlagen als bisher den Ingenieuren für die Dimensionierung von Bauwerken zur Verfügung standen. Entsprechend können sie dazu verwendet werden, die Spektren der Baunorm SIA261 zu ersetzen.
Für die Zukunft gilt es, bei der Projektarbeit geknüpfte länderübergreifende Kontakte weiter zu pflegen und bei grenzüberschreitenden gemeinsamen Aufgabestellungen die Umsetzung der Erkenntnisse vermehrt zu nutzen. Im Fall von Schadensbeben sollen relevante Daten für den grenzüber-schreitenden Katastrophenschutz zur Verfügung gestellt werden (schneller Datenaustausch) um fachlich kompetent und kohärent informieren zu können. Das in der Region Basel installierte und in diesem Projekt zum Teil erneuerte Starkbeben-Überwachungsnetz des Schweizerischen Erdbebendienstes wird es erlauben, die hier vorgeschlagene Zonierung zu überprüfen und in Zukunft fortlaufend zu verfeinern.

5 Mitwirkende

Dieses Gemeinschaftswerk wurde ermöglicht durch Mittel aus dem Europäischen Fond für regionale Entwicklung, durch Unterstützung der Schweizerischen Eidgenossenschaft und der drei beteiligten Schweizerischen Kantone Basel Stadt, Basel-Landschaft und Solothurn. Die beteiligten Hochschulen ETH Zürich und Universität Basel steuerten ihr Wissen aus verschiedenen Forschungsprojekten, sowie interne personelle und finanzielle Resourcen bei. Ohne diesen Beitrag wäre das vorliegende Projekt nicht zu Stande gekommen.

6 Projektleitung und Antragstellung

Donat Fäh (ETHZ) & Peter Huggenberger (UNI Basel)

7 Projektbearbeitung

Donat Fäh (ETHZ)	Seismologie
Erich Fäh (UNI Basel)	Geologie
Peter Huggenberger (UNI Basel)	Geologie
Ralph Kirchhofer (UNI Basel)	Geo-Datenbank/GIS
Hans Havenith (ETHZ)	Seismologie
Ivo Oprsal (ETHZ)	Seismologie
Brian Steiner (ETHZ)	Seismologie
Sybille Steimen (ETHZ)	Seismologie
Philipp Kästli (ETHZ)	Seismologie
Gabriela Stamm (ETHZ)	Seismologie

8 Verdankungen

Amt für Bevölkerungschutz Basel-Landschaft
PMD Basel Stadt
Amt für Umwelt Kt. Solothurn
Regio Basiliensis

9 Vorgehen bei der Mikrozonierung

Die seismische Mikrozonierung ist das Werkzeug für eine optimale Dimensionierung von Gebäuden. Sie berücksichtigt die regionale Erdbebengefährdung aufgrund der Häufigkeits-Stärke-Verteilung von Erdbeben und den Einfluss der lokalen Geologie. Die Mikrozonierung unterteilt das Untersuchungsgebiet in Zonen mit ähnlichem Untergrundverhalten bei Erdbeben. Für diese Zonen werden Antwortspektren definiert, mit Hilfe welcher der Bauingenieur durch gezielte, auf die lokale Geologie abgestimmte bauliche Massnahmen, eine Begrenzung der Erdbebenschäden erreichen kann. In den Baunormen werden aufgrund von

Kosten-Nutzen Überlegungen die Baumassnahmen generell auf ein Erdbeben mit einer Wiederkehrperiode von 475 Jahren ausgerichtet (Nichtüberschreitenswahrscheinlichkeit von 90% in 50 Jahren), wobei für Gebäude in den Bauwerksklassen II und III zusätzlich ein Sicherheitsfaktor (Bedeutungsfaktor) angewendet wird.
Für die spektrale Mikrozonierung wurde folgendes Vorgehen gewählt:

1) Bestimmung der spektralen Verstärkung bezüglich einem Referenzstandort. Dieser Referenzstandort ist definiert durch die Untergrunddefinition in der Gefährdungskarte. Das Vorgehen ist stufenweise:
    a) Auswertung der geologischen und geotechnischen Informationen und Messung der Fundamentalfrequenz der Lockersedimente im gesamten Projektgebiet. Definition der Zonen durch Zusammenfassen von Gebieten mit ähnlicher Geologie und vergleichbarem Bodenverhalten. Die Ergebnisse sind im Teilbericht 1 zusammengefasst.
    b) Messung der Scherwellengeschwindigkeiten und Charakterisierung der verschiedenen geologischen Einheiten für die numerische Modellierung. Die Ergebnisse sind im Teilbericht 2 zusammengefasst.
    c) Definition von Modellen welche die Gesamtheit der Informationen aus 1a) und 1b) berücksichtigt. Definition der Unsicherheiten der Modellparameter. Numerische Modellierung der Verstärkung mit Hilfe von ein-, zwei-, und dreidimensionalen Verfahren. Die Ergebnisse sind im Teilbericht 3 zusammengefasst.
2) Kartierung von Regionen möglicher sekundären Erdbebenphänomene wie Hanginstabilitäten, Setzungen und Bodenverflüssigung. Die Ergebnisse sind im Teilbericht 4 zusammengefasst. Zusätzlich liefert dieser Bericht die Beschreibung der geologischen Datenbasis für Teilbericht 1.
3) Überprüfung der Ergebnisse aus den numerischen Verfahren mit Hilfe beobachteter Erdbebenaufzeichnungen und Bestimmung der zonenspezifischen Spektren durch Multiplikation des Fels-Gefährdungsspektrums mit den zonenspezifischen Amplifikations-funktionen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie liefern differenziertere Grundlagen als bisher den Ingenieuren für die Dimensionierung von Bauwerken zur Verfügung standen. Entsprechend können sie dazu verwendet werden, die Spektren der Baunorm SIA261 zu ersetzen. Um eine Anwendung zu ermöglichen haben wir darauf geachtet, die Anzahl der Zonen möglichst klein zu halten.
Im Folgenden sollen die einzelnen Stufen des Projekts zusammengefasst und diskutiert werden. Am Schluss wird das weitere Vorgehen für eine Umsetzung diskutiert.

10 Zusammenfassung der Teilberichte

10.1 Geologische Grundlagen für die quantitative Erdbebenmikrozonierung (Teilbericht 4)

Der Teilbericht Geologische Grundlagen umfasst eine Beschreibung der geologischen Datenbasis im Hinblick auf die Bereitstellung von Geodaten für die numerische Modellierung, die Auswertung der Arraymessungen und die Erarbeitung von spezifischen Themenbereichen für die quantitative Mikrozonierung. Der Projektperimeter (Abbildung 1) umfasst die Gebiete Ergolztal ab Liestal, Muttenz, Pratteln, das untere Birstal ab Aesch (inkl. Dornach), das Bruderholzspital, Allschwil, Basel, Riehen und Bettingen. Die geologischen Daten sind in einer eigens für das Teilprojekt Schweiz errichteten Datenbank (Abbildung 2) abgelegt. Die Daten stammen aus der Geologisch-Hydrogeologischen Datenbank und dem Baugrundarchiv der Angewandten und Umweltgeologie des geologischen Instituts der Universität Basel (AUG). Resultate von Datenbankabfragen werden in einem Geographischen Informationssystem (GIS) dargestellt.
Nach den Richtlinien des Schweizer Bundesamtes für Wasser und Geologie BWG (heute Bundesamt für Umwelt BAFU) zur Erstellung von Mikrozonierungsstudien in der Schweiz (BWG, 2004), bildet die Karte der Baugrundklassen die eigentliche geologische Grundlage für eine kostengünstige regionale Mikrozonierung. Für die ausgeschiedenen Baugrundklassen existieren entsprechende elastische Antwortspektren für 5% Dämpfung. Für die Gestaltung einer solchen Karte wird das Gebiet in sechs verschiedene Baugrundklassen, wie in der Baunorm SIA261 (SIA, 2003) definiert, eingeteilt. Für die Region Basel mit zahlreichen sensiblen Bauwerken und hoher Bevölkerungsdichte wurde, in Anlehnung an die Vorgaben des BWG, eine spektrale Mikrozonierung erstellt. Die geologischen Grundlagedaten wurden deshalb so erhoben und abgespeichert, dass beliebige Baugrundklassifikationen und thematische Verknüpfungen für die spektrale Mikrozonierung möglich werden.
Der Bericht “geologische Grundlagen“ umfasst eine Darstellung der Datenbasis und eine Beschreibung der Datenstruktur der geologischen Grundlagedaten, die in die quantitative Mikrozonierung der Region Basel eingeflossen sind. Basierend auf diesen Daten sind eine Reihe von thematischen Grundlagekarten im Hinblick auf die Erdbebenmikrozonierung abgeleitet worden. Die wichtigsten thematischen Karten geben einen Einblick über die Verteilung der Mächtigkeiten der Lockergesteine, die laterale Änderung der Mächtigkeit der Lockergesteine, die Geometrie des geologischen Felsuntergrundes und einen “Überblick über die Felshärte“ (siehe Kap. 10.2, Abbildung 11).
Es zeigt sich, dass aus geologischen Gründen zu vereinfachte Baugrundklassifikationen zu falschen Schlussfolgerungen führen können. So kann beispielsweise der Hauptmuschelkalk des Tafeljuras zonal eine so starke Verwitterung aufweisen, dass er sich seismisch ähnlich wie ein Lockergestein verhält. Zudem entsprechen die geophysikalischen Eigenschaften der

Tertiären Füllung des Rheingrabens eher denjenigen von Lockergesteinen. Entsprechend wurde in diesem Projekt vorerst die Komplexität der Geologie der Region Basel berücksichtigt.
Für die 2D Modellierung wurden eine Anzahl geologischer Querprofile benötigt (Abbildung 3 und 4a,b). Diese sind entweder aus den von der Angewandten und Umwelgeologie der UNI Basel erarbeiteten geologischen 3D-Modelle (GOCAD) oder wie im Fall des Ergolztals, anhand der geologischen Karte Nagra 121 “zentrale Nordschweiz“ und aufgrund von Bohrdaten aus der geologisch- hydrologischen Datenbank konstruiert, bzw. abgeleitet worden. Der Verlauf der Schichten wurde punktweise mit X/Z-Koordinaten (Oberflächenlage / Tiefenlage; Einheit in Kilometer) angegeben.
Die quantitative Mikrozonierung beschreibt die Standorteffekte, die durch die Unterschiede der elastischen Eigenschaften der Gesteine und der Mächtigkeiten der verschiedenen, oberflächennahen geologischen Formationen bestimmt werden. Von Erdbeben induzierte Ereignisse werden hingegen als Sekundäreffekte bezeichnet. Solche Effekte können bei der quantitativen Mikrozonierung nicht berücksichtigt werden und sind deshalb als separates Thema (Karte) unter dem Namen “Karte potentielle induzierte Effekte“ (Abbildung 5) dargestellt. Bei den induzierten Effekten handelt es sich um Bergstürze, Erdrutsche, Dolineneinstürze, Bodenverflüssigung und Thixotropie. Obwohl streng genommen den Standorteffekten zuzuordnen, werden Terrassenkanten aufgrund der typischen Schadensbilder durch mögliche Rutschungen ebenfalls auf der thematischen Karte “potentielle induzierte Effekte“ dargestellt. Auf der Karte der potentiellen induzierten Effekte werden Zonen und Lokalitäten ausgeschieden, in denen Sekundäreffekte auftreten können. Wann, ob und ab welcher Erdbebenmagnitude solche Phänomene auftreten, hängt jedoch auch von zahlreichen anderen Randbedingungen ab. Diese Karte soll Bauherren, Ingenieuren und beratenden Geologen zusätzliche Hinweise bei der erdbebengerechten Planung oder Gebäudedimensionierung geben.

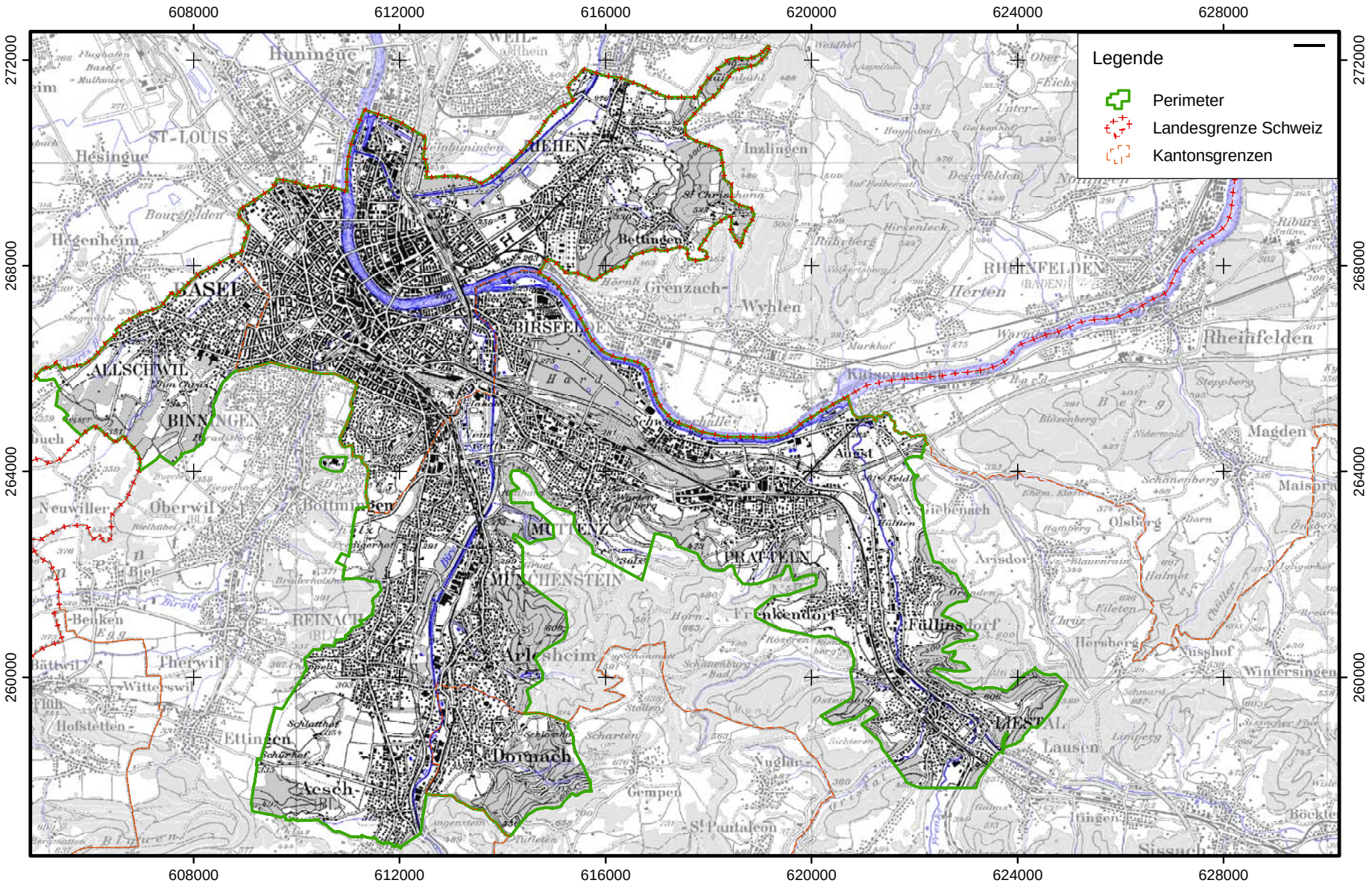

Abbildung 1: *Projektperimeter Erdbebenmikrozonierung.*

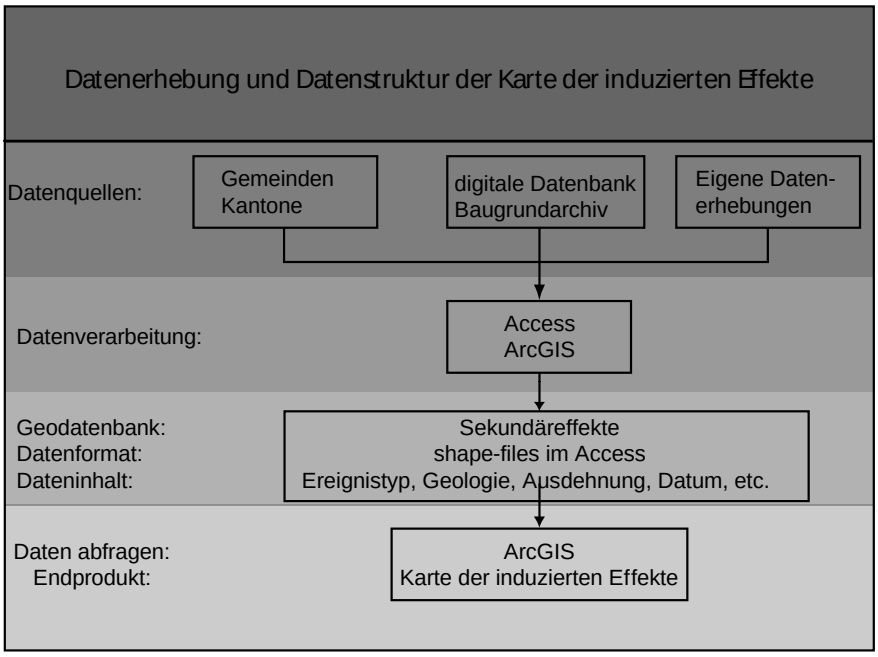

Abbildung 2: *Datenflussdiagramm der Datenbank der Karte der potentiell induzierten Effekte.*

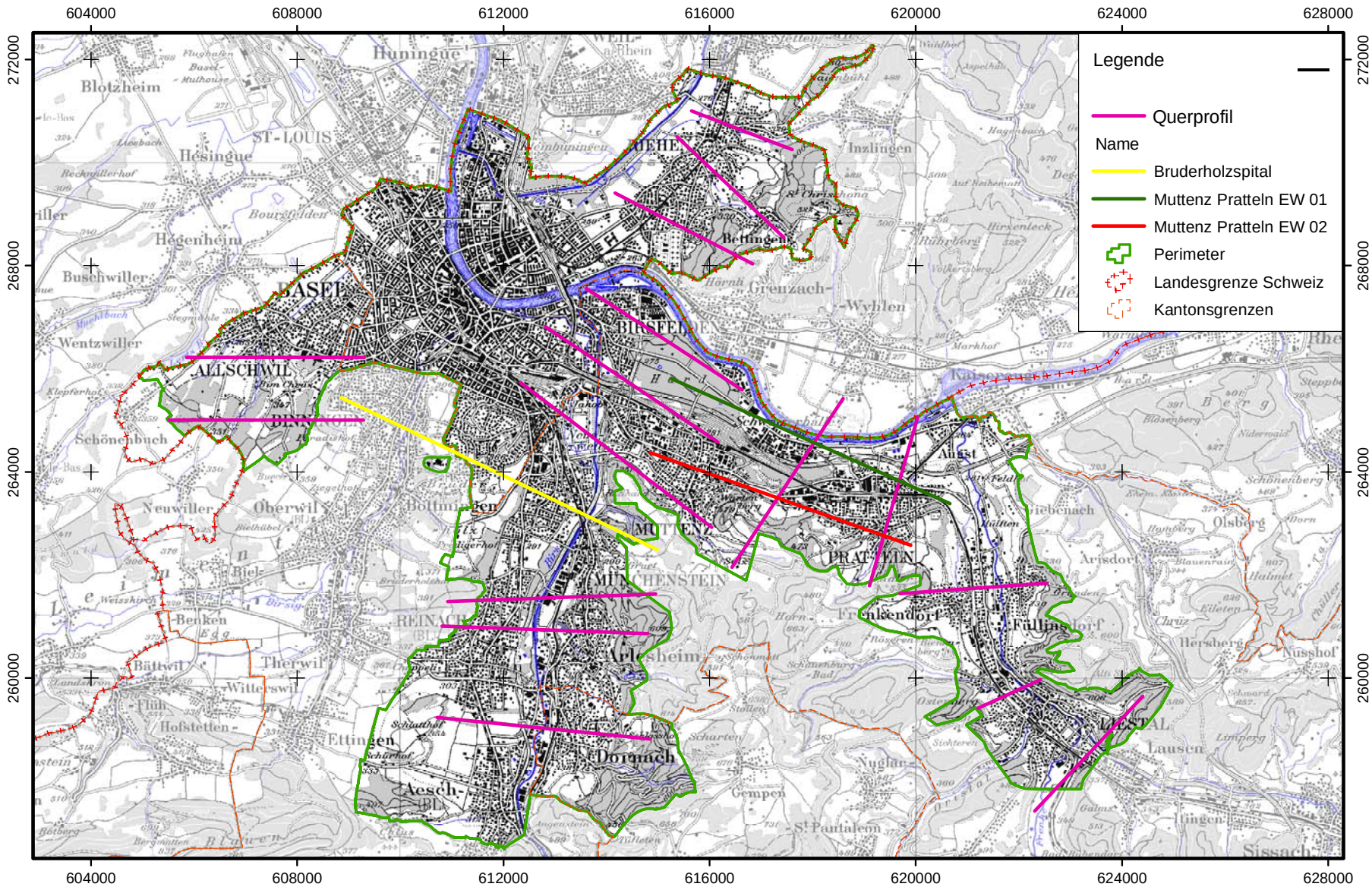

Abbildung 3: *Lage der geologischen Profile innerhalb des Projektperimeters.*

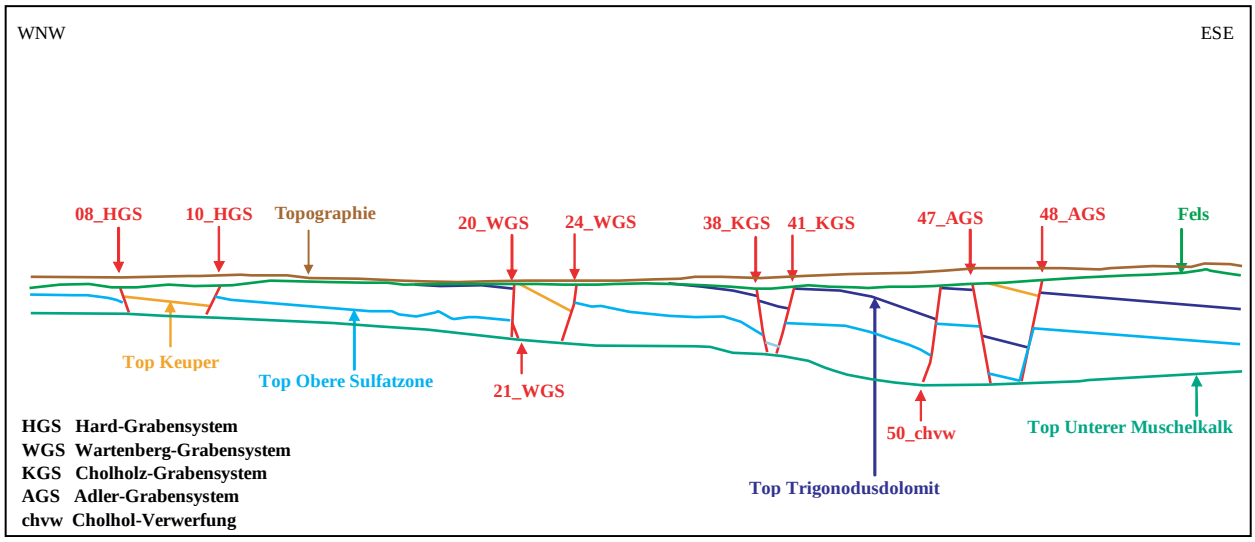

Abbildung 4a: *Querprofil Muttenz Pratteln EW 01.*

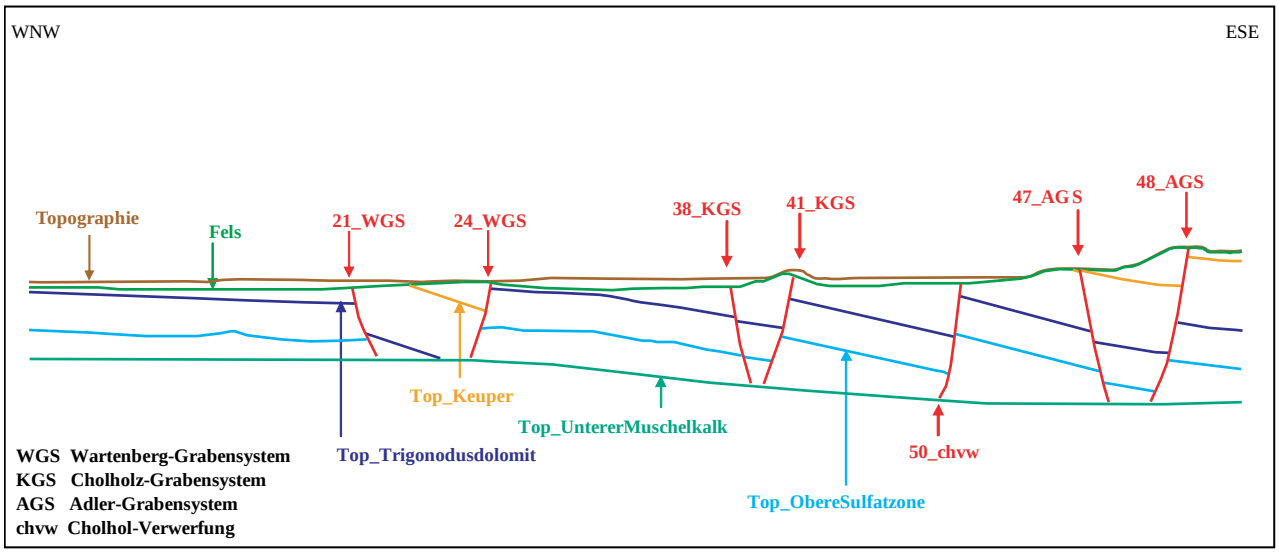

Abbildung 4b: *Querprofil Muttenz Pratteln EW 02.*

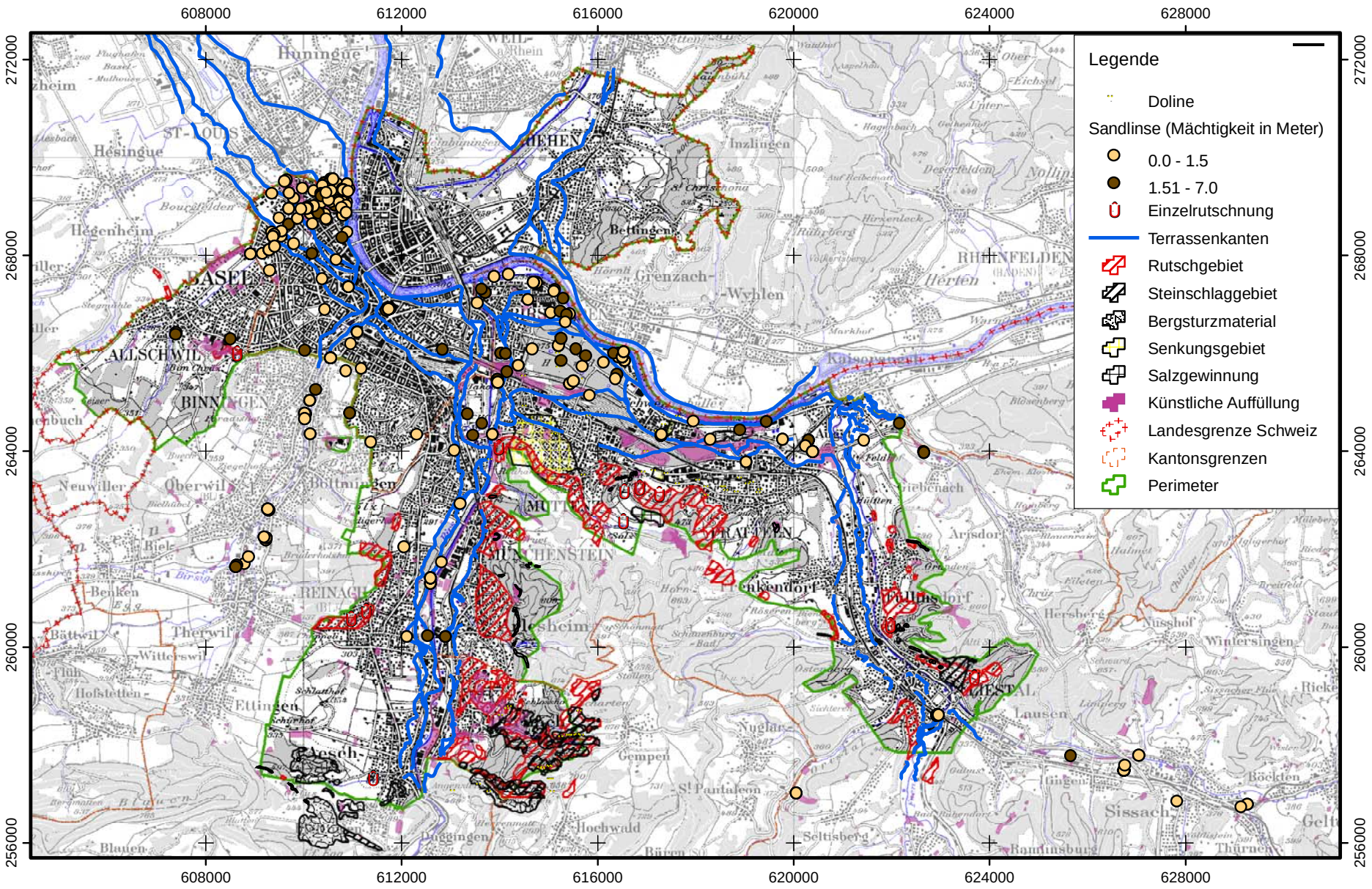

Abbildung 5: *Karte der potentiell induzierten Effekte.*

10.2 Zoneneinteilung (Teilbericht 1)

Das ganze Untersuchungsgebiet wurde in Zonen und Subzonen aufgeteilt. Innerhalb einer Zone bzw. Subzone wird ein ähnliches Verhalten bei Erdbeben erwartet. Die Zonen sind in Abbildung 6 gezeigt. Für die Zoneneinteilung wurden die Tektonik des Gebiets, die geologischen Informationen bezüglich der Lockersedimentzusammensetzung und Felsbeschaffenheit, sowie gemessene Eigenfrequenzen des lokalen Untergrundes verwendet. Für die Definition der Subzonen wurden die oberflächennahen Lockersedimente beurteilt. Innerhalb einer Zone können drei geologische Subzonen definiert werden (Löss/Lehm, lockere holozäne Ablagerungen, ältere Ablagerungen). Diese Ablagerungen weisen ein unterschiedliches Erdbebenverhalten auf, da sie markant unterschiedliche S-Wellengeschwindigkeiten aufweisen.
Um die Eigenfrequenz des lokalen Untergrundes zu bestimmen wurde die H/V-Polarisationsanalyse der seismischen Bodenunruhe an ca. 700 Messpunkten angewandt (Abbildung 7). Die natürliche Bodenunruhe hat die Eigenschaft, dass das Wellenfeld im Bereich der Fundamentalfrequenz auf der horizontalen Komponente polarisiert wird. Damit ist es möglich die Fundamentalfrequenz mit Hilfe einer einfachen Messung zu bestimmen. Die Frequenz bei ungefähr der Hälfte der Fundamentalfrequenz gibt eine untere Grenze für denjenigen Frequenzbereich an, in welchem mit einer Verstärkung der Bodenbewegung während eines Erdbebens gerechnet werden muss. Bei der Fundamentalfrequenz ist die Verstärkung im Allgemeinen am grössten. Für höhere Frequenzen muss generell mit einer Verstärkung der seismischen Wellen gerechnet werden, deren Amplitude von der Schichtfolge der Lockersedimente abhängig ist. Die Fundamentalfrequenz ist daher schon für sich allein eine wichtige Grösse. Zudem ist die Fundamentalfrequenz mit der S-Wellengeschwindigkeit der Lockersedimente und der Tiefe des Felsgesteins verbunden.
Innerhalb der Rheingrabenstruktur sind die Fundamentalfrequenzen sehr tief (0.4-1Hz), was auf weiche Sedimente bis in grosse Tiefen hindeutet. Ausserhalb des Rheingrabens ist die Fundamentalfrequenz generell grösser als 2 Hz. Die Amplitude der H/V Messung gibt einen Hinweis auf den Geschwindigkeitskontrast zwischen Fels und Lockersedimenten (Abbildung 8). Eine grosse Amplitude im H/V Spektrum (gute bis sehr gute Amplitudenqualität) weist auf einen hohen Kontrast hin, was zu einem starken Resonanzverhalten der Lockersedimente und somit zu höheren Verstärkung führen kann.
Die Kantonsgeologie der Universität Basel erarbeitete ein Modell der Geometrie und Zusammensetzung des Untergrundes. Dazu wurden Bohrlochinformationen und geologische Daten zusammengefasst. Drei der verwendeten Basiskarten sind in den Abbildungen 9, 10 und 11 gezeigt. Die Mächtigkeit der quartären Sedimente (Abbildung 9) wurde aus den Bohrlochinformationen hergeleiten. Ihre Einteilung in die drei geologischen Subzonen (Löss/Lehm, lockere holozäne Ablagerungen, ältere Ablagerungen) ist in Abbildung 10 gezeigt. Durch den Vergleich der gemessenen Fundamentalfrequenzen mit den bekannten Gesamttiefen und Eigenschaften der weichen Sedimente konnten die Modelle überprüft und verbessert werden. Der präquartäre Untergrund wurde in Härteklassen eingeteilt

(Abbildung 11). Diese Klassierung, welche im INTERREG Projekt eingeführt wurde, kann Werte zwischen 1 (weiches Gestein, wie z.B. Ton) und 5 (sehr hartes Gestein wie z.B. Granit) annehmen. Für alle Zonen und Subzonen wurden die Kriterien der Zoneneinteilung diskutiert und im Teilbericht 1 dokumentiert. Ein wichtiger Punkt ist die Definition der Zonengrenze und die Unterschiede zwischen benachbarten Zonen.

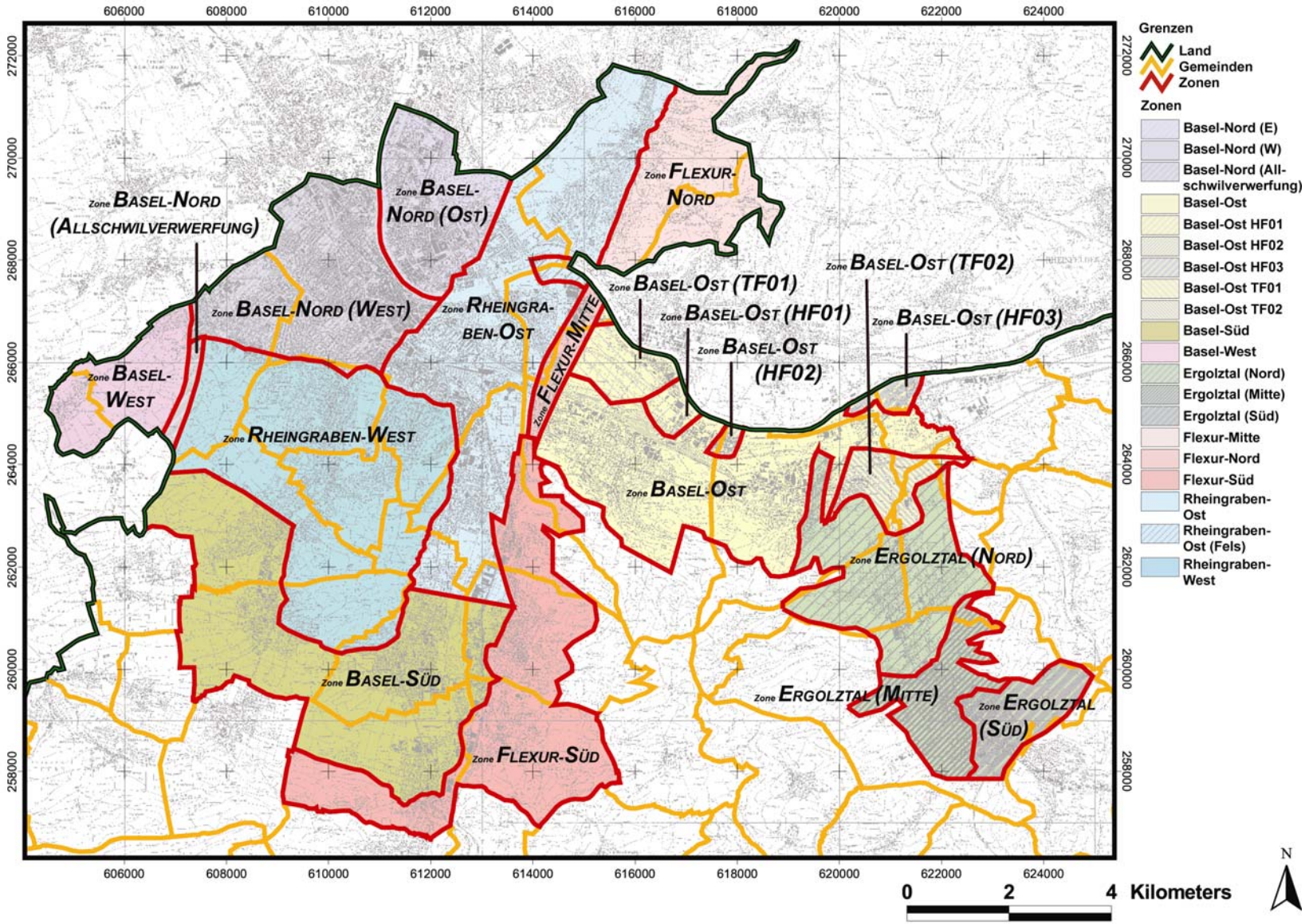

Abbildung 6: *Zoneneinteilung im Untersuchungsgebiet.*

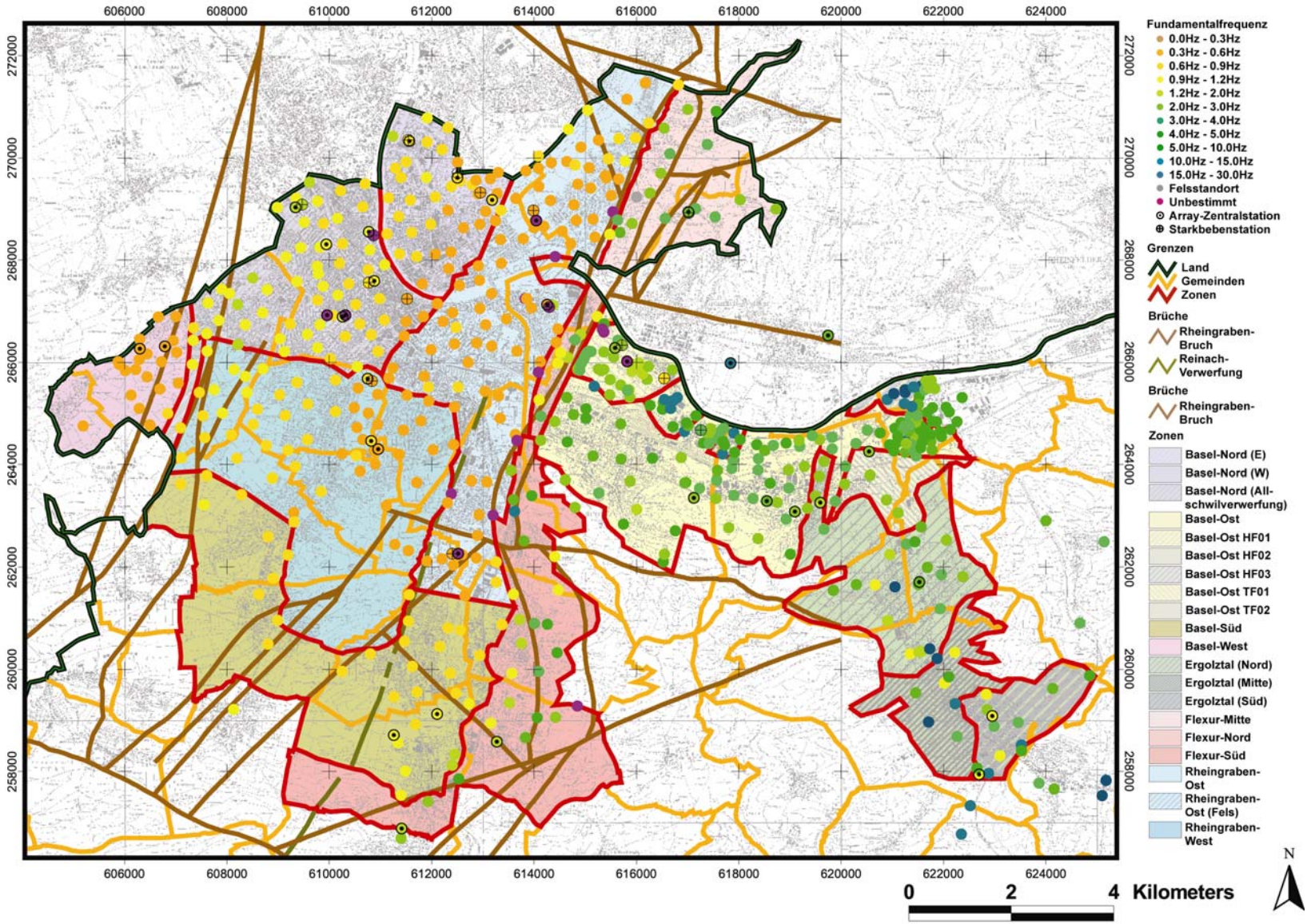

Abbildung 7: *Gemessene Fundamentalfrequenzwerte im Untersuchungsgebiet.*

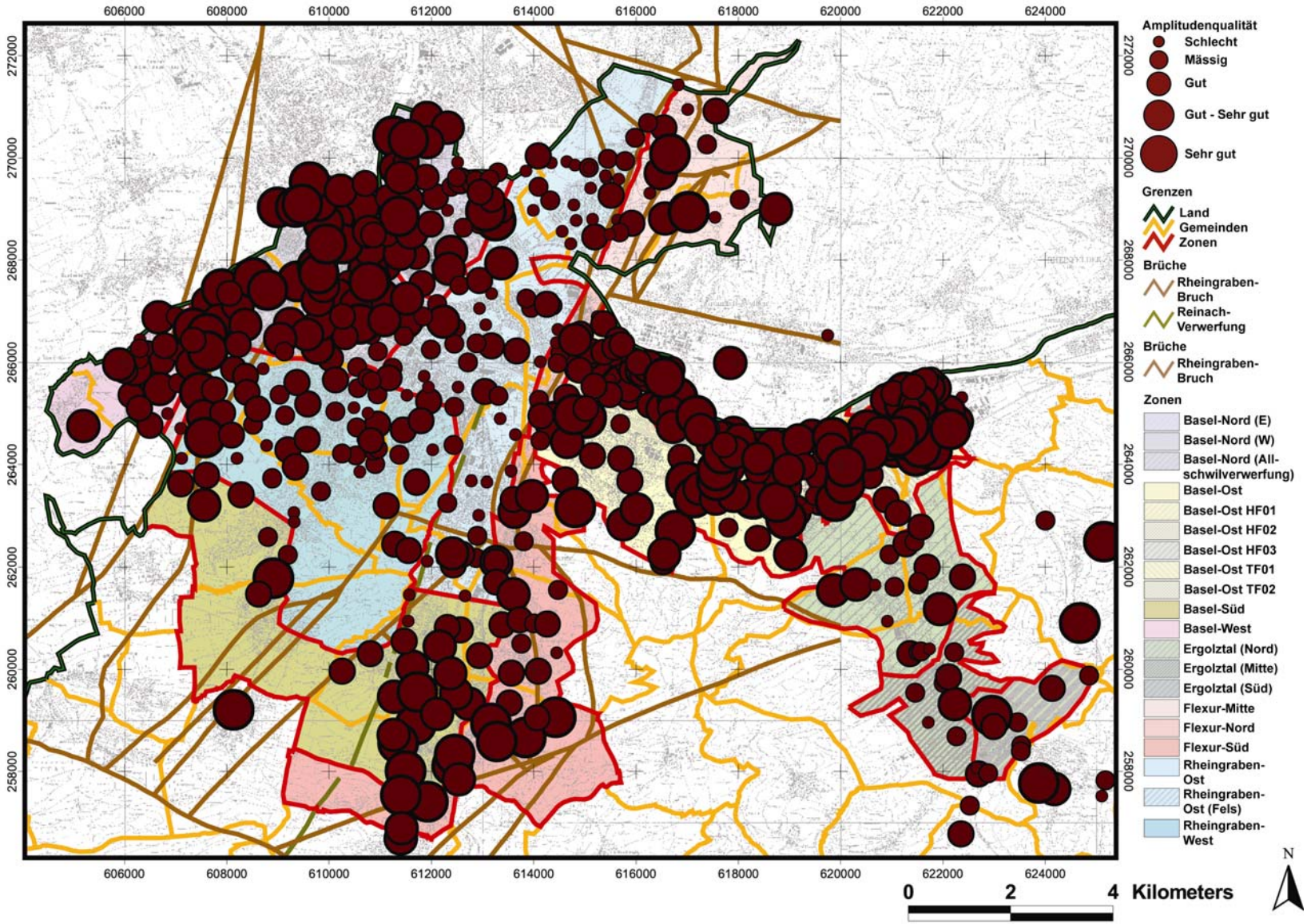

Abbildung 8: *Amplitudenqualität der H/V-Messungen.*

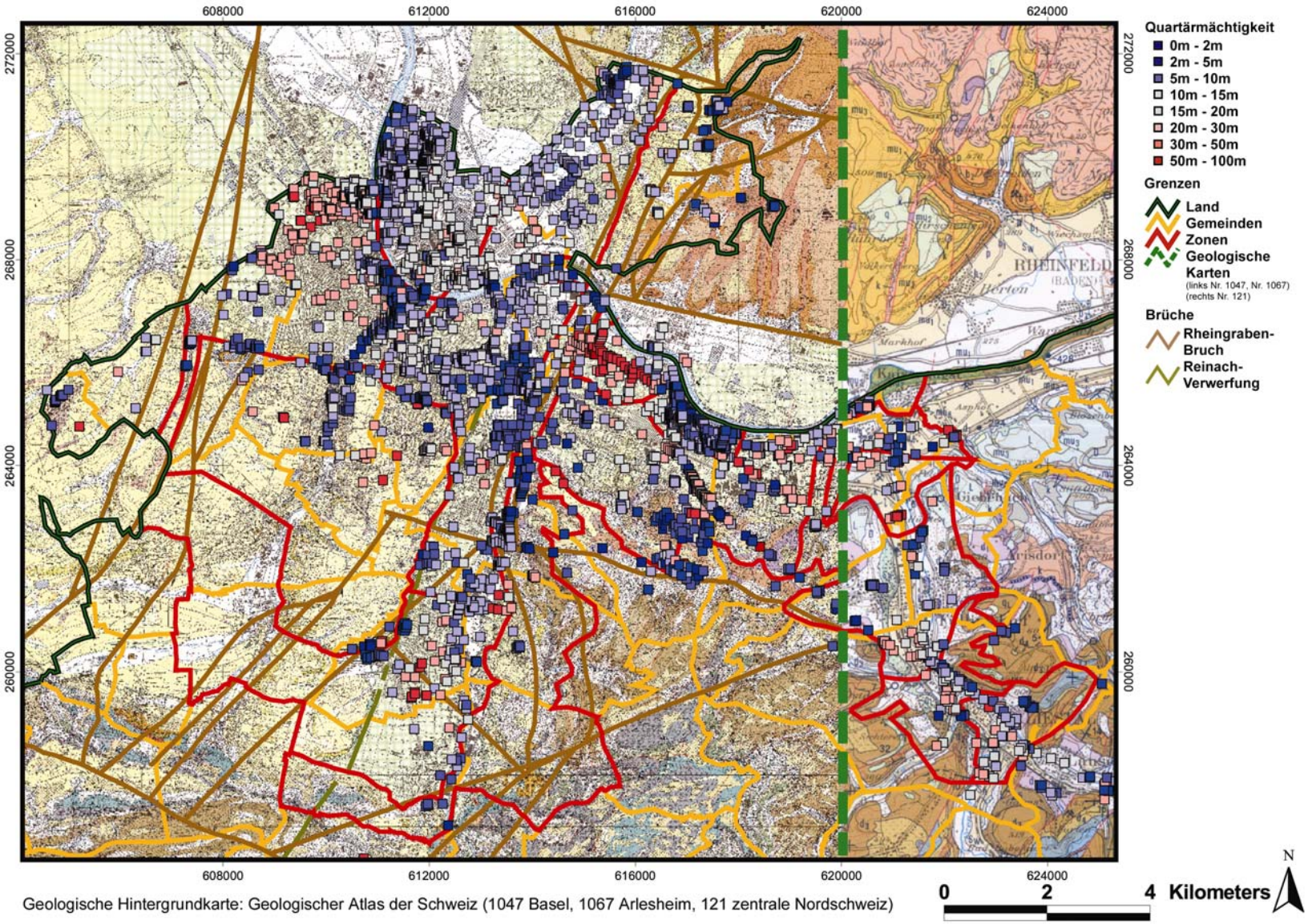

Abbildung 9: *Mächtigkeit der quartären Ablagerungen im Untersuchungsgebiet.*

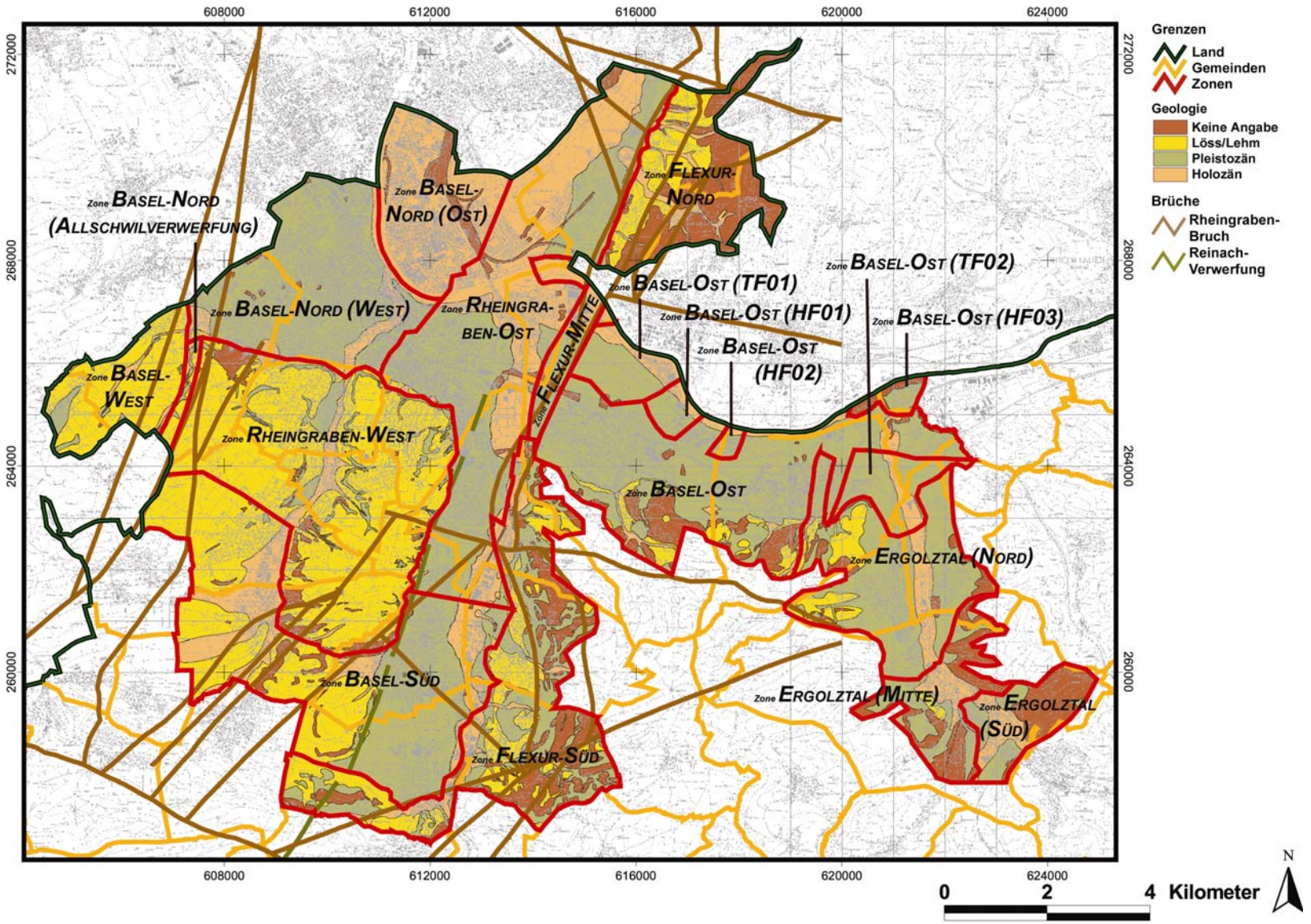

Abbildung 10: *Geologische Subzonen (Löss, lockere holozäne Ablagerungen, ältere Ablagerungen) im Untersuchungsgebiet.*

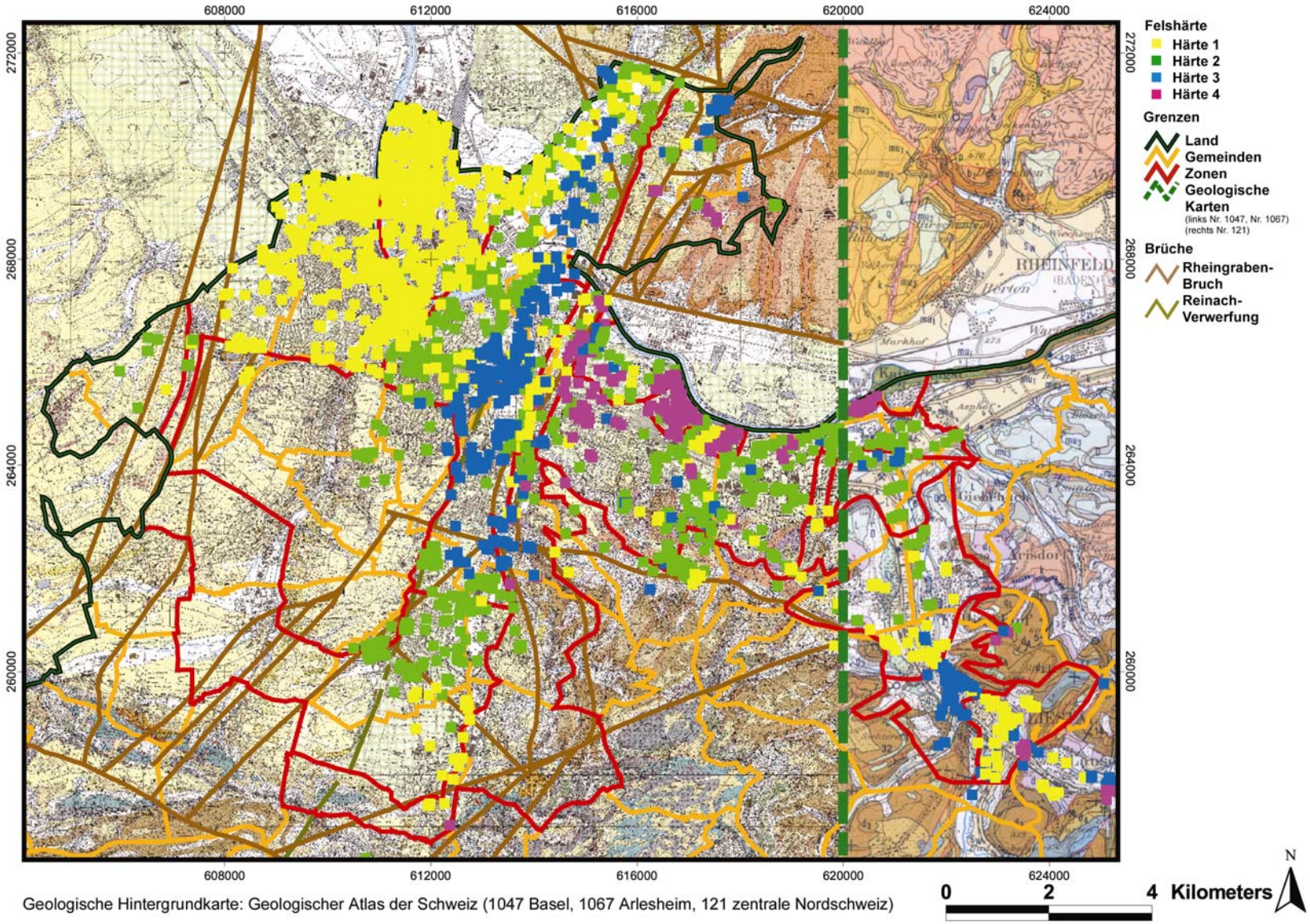

Abbildung 11: *Felshärte im Untersuchungsgebiet.*

10.3 Bestimmung der Scherwellengeschwindigkeiten (Teilbericht 2)

Um Abschätzungen der S-Wellengeschwindigkeit für die verschiedenen geologischen Formationen in der Region zu erhalten, wurde eine grosse Anzahl von Arraymessungen durchgeführt (Havenith und Fäh, 2006) (Abbildung 12). Das Ziel einer solchen Messung ist die Bestimmung der Phasengeschwindigkeit der Rayleighwellen (Fundamentalmode und höhere Moden) als Funktion der Frequenz. Aus der Phasengeschwindigkeit lassen sich Modelle für die S-Wellengeschwindigkeit der lokalen Struktur invertieren. Bei der Inversion werden sowohl geologische Informationen, als auch die gemessene Eigenfrequenz der Lockersedimente und die Eigenschaften der gemessenen H/V Kurve verwendet. Ergänzt wurden die Messungen des Schweizerischen Erdbebendienstes durch Messungen des Bureau de Recherche Geologique et Miniere (BRGM) und des Leibniz Instituts für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben, Hannover (GGA). Abbildung 12 zeigt die Standorte der durchgeführten Messungen im Untersuchungsgebiet.
Die Charakterisierung der verschiedenen geologischen Strukturen ist die Grundlage für die Entwicklung von Modellen für die numerische Modellierung. Es wurde darauf geachtet, dass eine grosse Anzahl der Standorte der Starkbebenmessgeräte untersucht wurde.

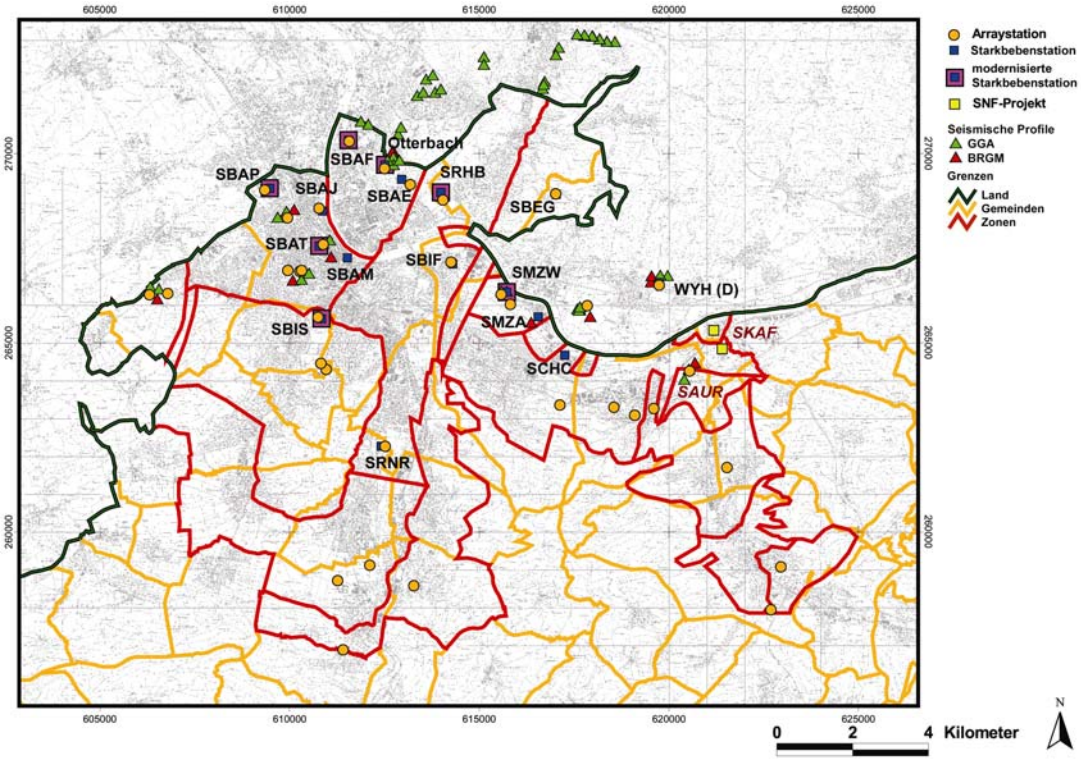

Abbildung 12: *Übersicht über die Messstandorte in verschiedenen geologischen Strukturen. Die orangefarbenen Punkte zeigen die Position der zentralen Station eines Arrays. Die Messpunkte des BRGM und GGA sind durch Dreiecke gekennzeichnet. Vierecke bezeichnen die Standorte der installierten Starkbebenmessgeräte.*

10.4 Numerische Modellierung (Teilbericht 3)

Die numerischen Simulationen haben zum Ziel, für die verschiedenen Zonen und Subzonen des Untersuchungsgebiets, eine für jede Zone typische Verstärkungsfunktion seismischer Wellen bezüglich einem Felsstandort zu definieren. Es wurden eindimensionale, zweidimensionale und dreidimensionale Modellierverfahren verwendet. Die Modelle beruhen auf den Messungen, welche innerhalb des Projekts ausgeführt wurden, und auf geologischen Informationen. Die geologischen und geophysikalischen Grundlagendaten sind in den Teilberichten 1 und 2 zusammengestellt. Da verschiedene Methoden und die Unsicherheiten der getroffenen Annahmen zu unterschiedlichen Resultaten führen können, wird vertieft auf diese Unterschiede und Unsicherheiten eingegangen.
Die Arbeiten umfassen eine Vielzahl von eindimensionalen und zweidimensionalen Modellierungen. Innerhalb des Europäischen Forschungsprojektes SAFE (Slow Active Faults in Europe) führte der Schweizerische Erdbebendienst dreidimensionale Simulationen von Erdbeben im Gebiet des südlichen Rheingrabens durch (Oprsal et al., 2005). Diese Modellierungen wurden für das INTERREG Projekt erweitert und die Ergebnisse zusammengefasst. Das Ziel war die Überprüfung der von Kind (2002) durchgeführten Modellierungen und das Aufspüren von wichtigen dreidimensionalen Verstärkungseffekten. Im Weiteren wurden 1D und 3D Modellierungen für das Gebiet Augusta Raurica dazu verwendet, Unterschiede zwischen 1D und 3D Modellierungen aufzuzeigen und somit Unsicherheiten zu quantifizieren (Fäh et al., 2006).
Das Materialverhalten wird als linear anelastisch angenommen, da bei den vorhandenen Lockersedimenten und dem angenommenen Gefährdungsniveau ein nichlineares Verhalten nur in wenigen Zonen der Region erwartet wird. Das Rechnen mit linearem Materialverhalten ist zudem konservativer als der nichtlineare Fall.

10.5 Regionale seismische Gefährdung

Der Schweizerische Erdbebendienst an der ETH Zürich publizierte im Jahre 2004 eine vollständige Revision der seismischen Gefährdungsmodelle für die Schweiz (Giardini et al., 2004; Wiemer et al., 2005). Diese basiert auf der Überarbeitung des Erdbebenkatalogs der Schweiz (Fäh et al., 2003), der seismotektonischen Regionalisierung und der Abminderungsmodelle für die Bodenbewegung (Bay et al., 2003; 2005). Seismische Gefährdungskarten stellen die Stärke der von Erdbeben bewirkten Bodenbewegung dar, welche für eine gewisse Wiederkehrperiode erwartet werden. Das Gefährdungsniveau (Antwortspektrum) auf Fels wird für jede Zone und die gewählte Wiederkehrperiode von 475 Jahren berechnet. Ein Fels-Referenzstandort ist definiert durch die Definition des Untergrunds in der Gefährdungskarte (vs30 von ca. 1500m/s).

10.6 Erneuerung bestehender Starkbebenstationen

Innerhalb des INTERREG Projekts wurde ein Teil der veralteten Starkbebeninstrumente erneuert (Abbildung 12). Durch INTERREG erfolgte eine Finanzierung von 3 Standorten. Der Kanton Basel Stadt hat die Erneuerung von vier weiteren Starkbebeninstrumenten bewilligt. Alle Standorte wurden mit modernen Sensoren und Rekordern ausgerüstet. Sie liefern die Bodenbewegung in Echtzeit an das Datenzentrum des Schweizerischen Erdbebendienstes, und erlauben somit eine schnelle Bestimmung der Wirkung eines Erdbebens innerhalb weniger Minuten. Zudem wurde die Empfindlichkeit der Sensoren und die Genauigkeit im tieffrequenten Signalbereich verbessert, sodass in Zukunft auch kleinere Bodenbewegungen von kleinen lokalen Erdbeben oder Signale von grossen Ereignissen in grosser Entfernung erfasst werden können.

10.7 Bestimmung der zonenspezifischen Antwortspektren (Teilbericht 5)

Für alle definierten Zonen wurden standortspezifische Antwortspektren bestimmt und mit Hilfe beobachteter Erdbebenaufzeichnungen überprüft. Die Spektralwerte der horizontalen Beschleunigung sind für eine Wiederkehrperiode von 475 Jahren im Frequenzbereich zwischen 0.5 und 10 Hz gegeben. Die Abschätzungen basieren auf den regionalen Gefährdungswerten für einen Felsstandort und auf den für den Standort berechneten möglichen Wellenverstärkungen. Die Bestimmung der zonenspezifischen Antwortspektren erfolgt durch Multiplikation des Gefährdungsspektrums für einen Felsstandort mit den lokalen Amplifikationsfunktionen. Um die aus der Modellierung bestimmten Amplifikationsfunktionen zu überprüfen, wurden alle heute vorhandenen Registrierungen der in Basel installierten Starkbebenstationen herangezogen. Diese Überprüfung konnte nur für einen Teil des Untersuchungsgebiets durchgeführt werden, da nicht alle Zonen instrumentiert sind. Generell zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen berechneten und beobachteten Werten der Verstärkung.
Ein Beispiel eines standortspezifischen elastischen Antwortspektrums einer Zone innerhalb des Rheingrabens ist in Abbildung 13 gezeigt. Im Teilbericht 5 sind alle Spektren gegeben. Die Antwortspektren sind aufgrund der berücksichtigten Unsicherheiten im tieffrequenten Teil des Spektrums leicht konservativer als im hochfrequenten Anteil. Innerhalb des Untersuchungsgebiets wurden die verschiedensten Formen von Antwortspektren gefunden, welche den unterschiedlichen Einfluss des lokalen Untergrundes wiederspiegeln. Dies soll hier durch den Vergleich von Abbildung 14 mit Abbildung 13 aufgezeigt werden. In Abbildung 14 ist ein Antwortspektrum gezeigt, welches für ein Gebiet ausserhalb des Rheingrabens definiert werden kann, während in Abbildung 13 ein für den Rheingraben typisches Antwortspektrum gezeigt wird. Durch die mächtigen Ablagerungen im Rheingraben werden vorallem die langperiodischen Anteile des Wellenfeldes verstärkt.

Soweit dies überprüft werden konnte, zeigt die Untersuchung eine gute Übereinstimmung zwischen berechneten und beobachteten Verstärkungen der seismischen Wellen. Das Beispiel für den Standort SBAJ in der Zone Basel Nord ist in Abbildung 15 gezeigt, und illustriert diese gut Uebereinstimmung. An zwei Stationen in der Zone Basel Nord wurden leicht erhöhte Werte der Verstärkung im Frequenzbereich unterhalb von 2 Hz beobachtet (Abbildung 16). Erste Abklärungen haben gezeigt, dass der Untergrund in Teilgebieten der Zone Basel Nord im Tiefenbreich von 20-50 m eventuell tiefere Werte der S-Wellengeschwindigkeit haben könnte, als die verschiedenen Messungen ergeben haben. Um diesen Punkt abzuklären sind weitere Untersuchungen geplant. Eine weitere Möglichkeit diese Beobachtung zu erklären, ist der Unterschied zwischen der für die Modellierung verwendeten Referenzstruktur und der realen Felsstruktur bei den Standorten SMZW und SBEG. Um dieser Beobachtung Rechnung zu tragen, werden die berechneten Verstärkungsfunktionen für die Zone Basel Nord im tiefen Frequenzbereich leicht erhöht (siehe Abbildung 16). Da in den Zonen Basel Süd und Basel West aufgrund unserer Untersuchungen eine ähnliche Verstärkung im tiefen Frequenzbereich erwartet werden muss, soll die Korrektur auch für diese Zonen angewandt werden. Mit dieser Korrektur wird für diese Zonen innerhalb des Rheingrabens der unterschiedliche Grad an Konservativität im tieffrequenten Bereich gegenüber den Zonen Rheingraben West und Rheingraben Ost ausgeglichen.

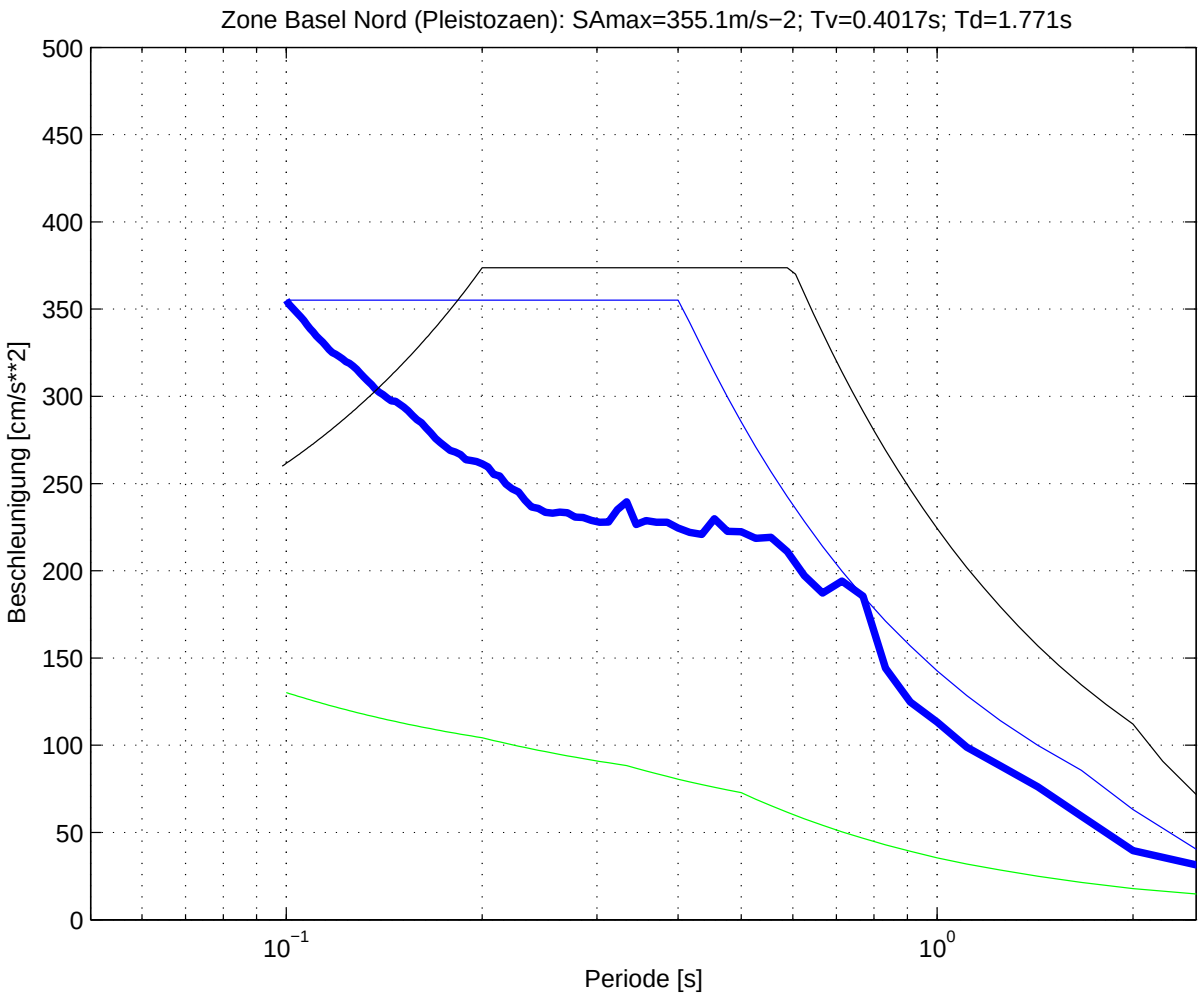

Abbildung 13: *Beispiel eines Antwortspektrums. Zone C: Basel Nord, Pleistozän. Berechnetes Antwortspektrum für eine Wiederkehrperiode von 475 Jahren (blaue, dicke Kurve). Umhüllende mit der klassischen Form des Antwortspektrums (blaue, dünne Kurve). Die Parameter der Kurve sind im Titel angegeben. Schwarze Kurve: Spektrum aus SIA261, Bodenklasse C, Zone 3a. Das Felsspektrum für eine Wiederkehrperiode von 475 Jahren ist in grün gezeigt.*

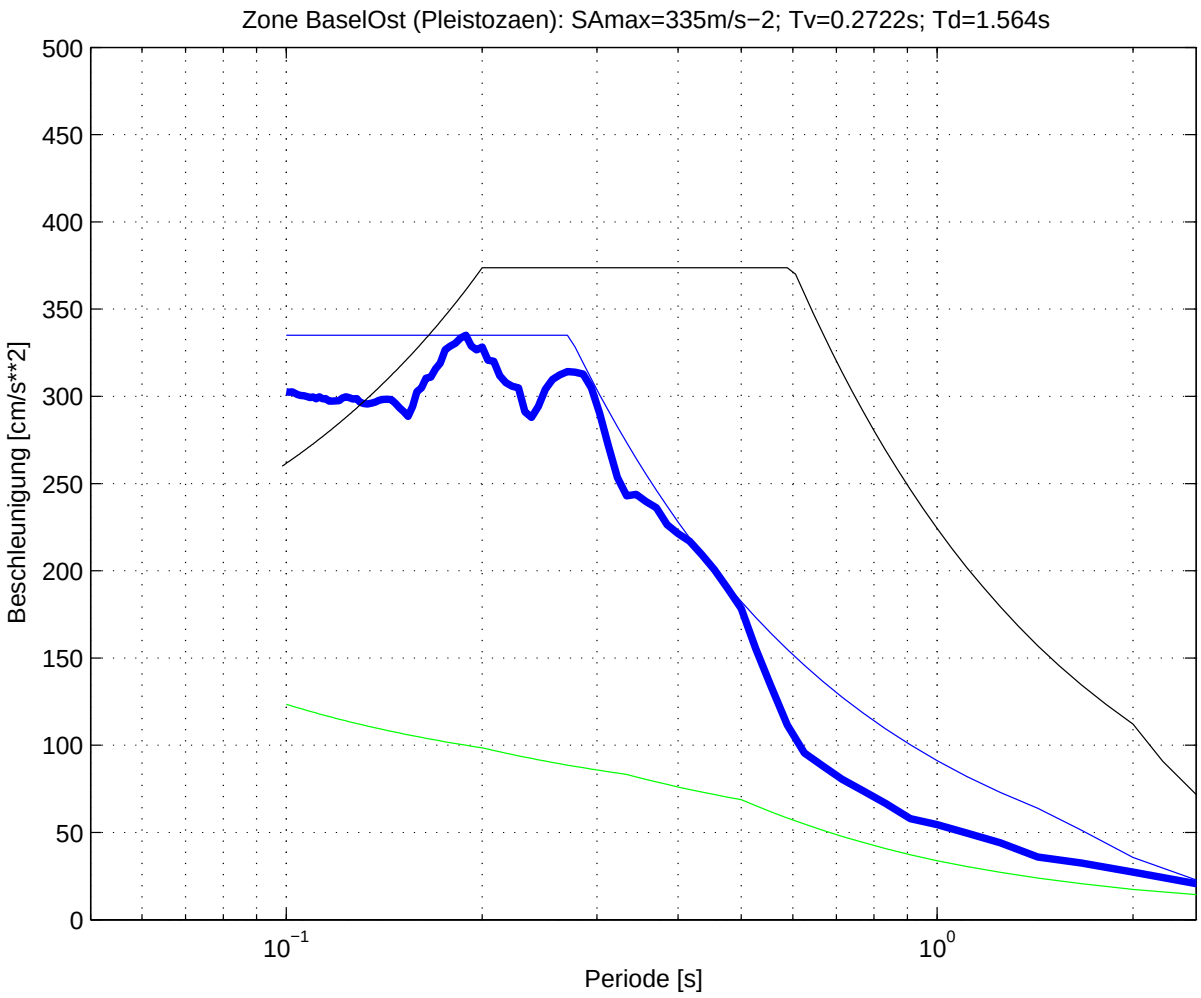

Abbildung 14: *Beispiel eines Antwortspektrums. Zone J: Basel Ost, Pleistozän. Berechnetes Antwortspektrum für eine Wiederkehrperiode von 475 Jahren (blaue, dicke Kurve). Umhüllende mit der klassischen Form des Antwortspektrums (blaue, dünne Kurve). Die Parameter der Kurve sind im Titel angegeben. Schwarze Kurve: Spektrum aus SIA261, Bodenklasse C, Zone 3a. Das Felsspektrum für eine Wiederkehrperiode von 475 Jahren ist in grün gezeigt.*

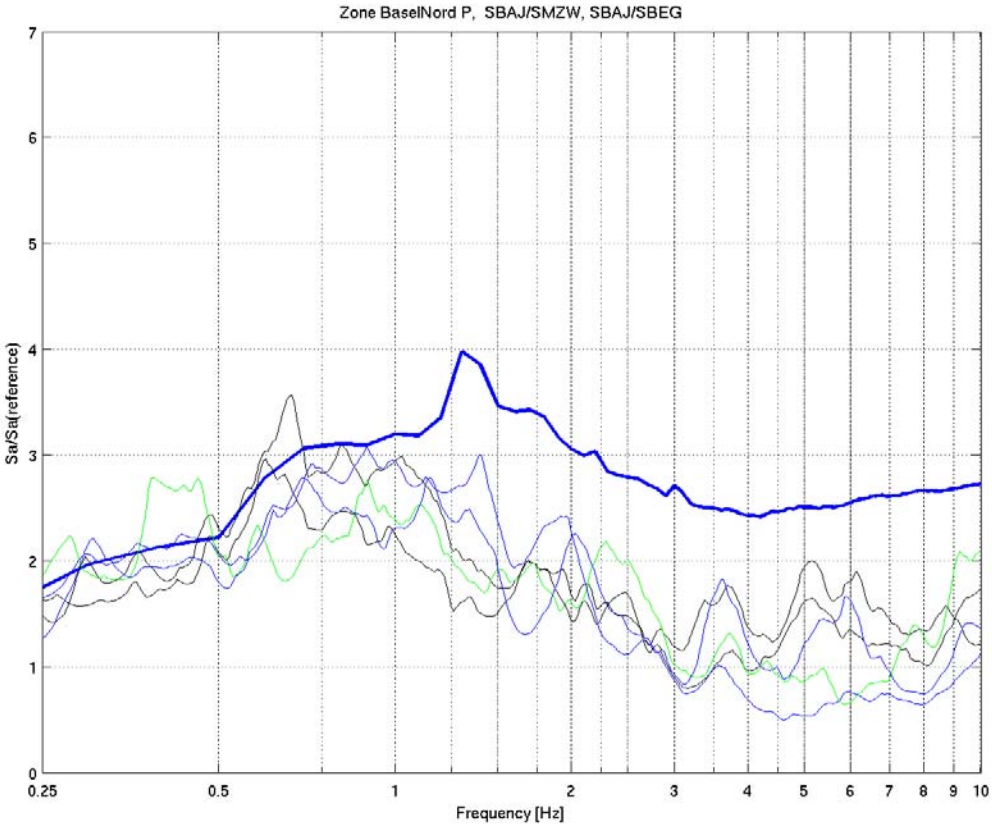

Abbildung 15: *Zone C: Basel Nord. Pleistozän.*
Vergleich zwischen der Umhüllenden der Amplifikationsfunktionen aus den Modellierungen (dicke blaue Kurve) und beobachteter Verstärkung (dünne Kurven) am Standort SBAJ. Referenzstationen: SBEG, SMZW.

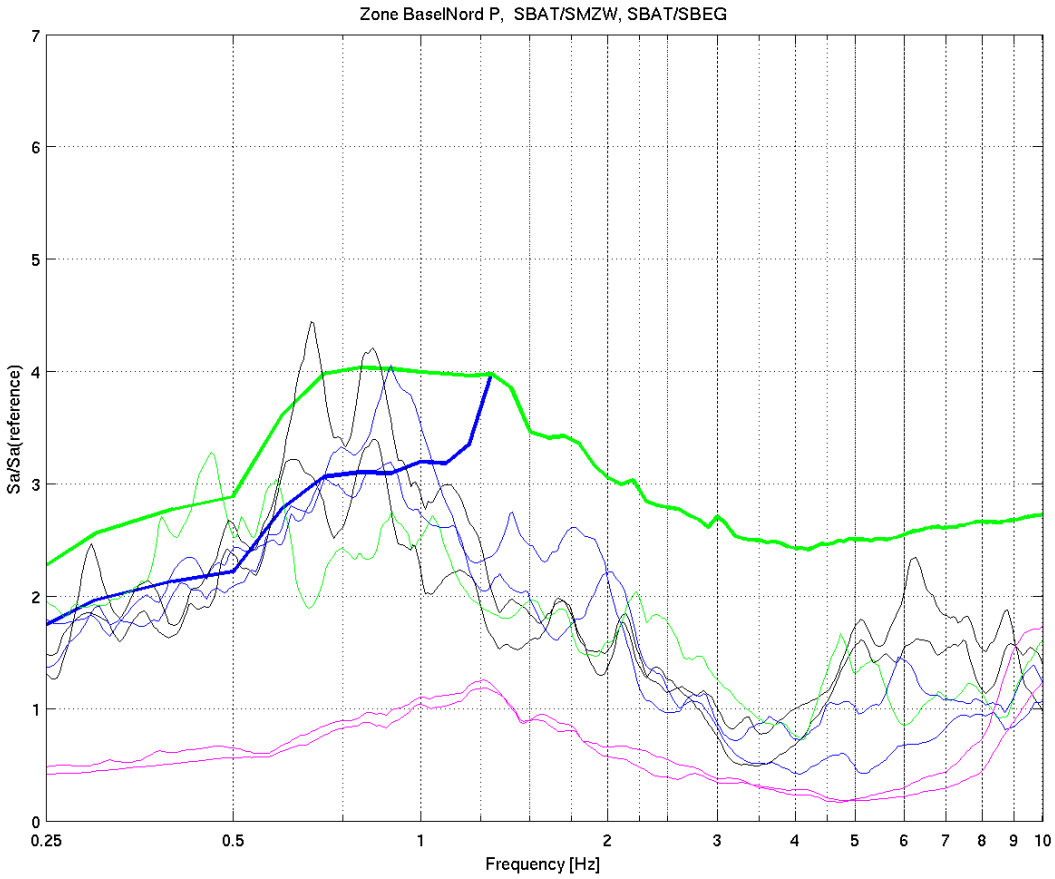

Abbildung 16: *Zone C: Basel Nord. Pleistozän.*
Vergleich zwischen der Umhüllenden der Amplifikationsfunktionen aus den Modellierungen (dicke blaue Kurve: nicht korrigiert; dicke grüne Kurve: korrigiert aufgrund der beobachteten Verstärkungen) und beobachteter Verstärkung (dünne Kurven) am Standort SBAT. Referenzstationen: SBEG, SMZW.

11 Umsetzung und weiteres Vorgehen

Das hier vorgestellte INTERREG Projekt “Erdbebenmikrozonierung am südlichen Oberrhein“ bildet die Fortsetzung wissenschaftlicher Forschung der letzten 15 Jahre und hatte zum Ziel, eine spektrale quantitative Mikrozonierung für den Kanton Basel Stadt und Teile der Kantone Basel Landschaft und Solothurn zu realisieren. Durch grenzübergreifende Zusammenarbeit mit Deutschland und Frankreich wurden Grundlagen geschaffen, welche eine einheitliche und grenzüberschreitende Gefährdungs- und Risikobeurteilung ermöglichen. Sowohl Deutschland als auch Frankreich realisierten innerhalb des INTERREG Projekts eine qualitative Mikrozonierung. Die gemeinsame Datenbasis wird auch dort in Zukunft eine spektrale quantitative Mikrozonierung ermöglichen. Da die Mikrozonierungsstudie in der Schweiz einen höheren Detailgrad aufweist als

diejenigen in Frankreich und Deutschland, wird es nötig sein, die koordinierte Arbeit im Bereich der Mikrozonierung in den nächsten Jahren fortzusetzen. Wegen bestehenden Unterschieden in den verschiedenen Baunormen der beteiligten Länder bestehen jedoch Abstimmungsprobleme in der Anwendung einer länderübergreifenden, quantitativen spektralen Gefährdungsbeurteilung. Dieses Problem kann innerhalb der Projektgruppe nicht gelöst werden, da nationale Bestimmungen diesen Teil regeln.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie liefern differenziertere Grundlagen als bisher den Ingenieuren für die Dimensionierung von Bauwerken zur Verfügung standen. Entsprechend können sie dazu verwendet werden, die Spektren der Baunorm SIA261 in Zukunft zu ersetzen. Die an dieses Projekt anschliessenden Arbeiten zielen somit in Richtung einer Umsetzung der vorgeschlagenen Mikrozonierung. Zonen mit gleichen Spektren und gleicher Spektrenform sollen zusammengefasst werden, um eine Optimierung der Anzahl der Gebiete zu erreichen und eine Anwendung der Mikrozonierung zu erleichtern. Die Resultate der vorliegenden Studie sollen in einem Vernehmlassungsentwurf zusammengefasst werden und zur Vernehmlassung an alle interessierter Kreise versandt werden. Das Ziel ist ein Umsetzungsdokument, welches die bestehende Baunorm SIA261 ergänzt.

Um die Mikrozonierung in Zukunft überprüfen zu können, wird vorgeschlagen, die Region mit Starkbebeninstrumenten weiterhin zu überwachen und die Modelle fortlaufend zu verfeinern. Bestehende veraltete Starkbebeninstrumente sollen erneuert werden. Um eine Überwachung auf dem gesamten Gebiet der Mikrozonierung zu gewährleisten, sind zusätzliche seismische Stationen notwendig. Um den Wert dieser Analyse zu erhöhen, sollen diejenigen Starkbeben-Stationsstandorte, welche innerhalb des INTERREG-Projekts nicht geophysikalisch beurteilt werden konnten, oder neue seismische Stationen einer Standort-Evaluation unterzogen werden.

Zusätzlich sollen alle in der Vergangenheit gesammelten makroseismischen Informationen ausgewertet werden, mit dem Ziel, die beobachteten Intensitätswerte mit den aus der Mikrozonierung gewonnenen Werten zu vergleichen und somit die vorgeschlagene Zonierung zu evaluieren.

Referenzen

Bay, F., Fäh, D., Malagnini, L. and D. Giardini, 2003. Spectral shear-wave ground motion scaling for Switzerland. Bull. Seism. Soc Am.,Vol.93, 414-429.

Bay, F., Wiemer, S., Fäh, D., Giardini, D., 2005. Predictive ground motion relations for Switzerland: Best estimates and uncertainties. Journal of Seismology, Vol. 9, Nr. 2, 223-240.

BWG, 2004. Verfahren zur Erstellung und Verwendung von Mikrozonierungsstudien in der Schweiz; Richtlinien des BWG. Bundesamt für Wasser und Geologie BWG. 68 Seiten.

Fäh, D., Rüttener, E., Noack, T. and P. Kruspan, 1997. Microzonation of the city of Basel. Journal of Seismology, 1, 87-102.

Fäh, D., Kind, F., Lang, K. and Giardini, D., 2001. Earthquake scenarios for the city of Basel. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 21, 405-413.

Fäh, D., D. Giardini, F. Bay, F. Bernardi, J. Braunmiller, N. Deichmann, M. Furrer, L. Gantner, M. Gisler, D. Isenegger, M.J. 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, 2003. Earthquake Catalogue Of Switzerland (ECOS) And The Related Macroseismic Database . Eclogae geol. Helv, 96, 219-236.

Fäh, D.. F. Kind, M. Gisler, S. Sellami, A. Becker, M. Ferry, D. Giardini, E. Zechner, P. Huggenberger, 2003b. Spektrale Mikrozonierung und Gefährdungsanalyse für Basel Stadt. Ein Bericht zuhanden des Kantons Basel Stadt 20.11.2003

Fäh, D., Steimen, S., Oprsal, I., Ripperger, J., Wössner, J., Schatzmann, R., Kästli, P., Spottke, I. and P. Huggenberger, 2005. The earthquake of 250 A.D. in Augusta Raurica, a real event with a 3D site-effect? Journal of Seismology, in press.

Giardini, D., Wiemer, S., Fäh, D. and N. Deichmann, 2004. Seismic Hazard Assessment of Switzerland, 2004. Report of the Swiss Seismological Service, ETH Zürich.

Havenith H.B. and D. Fäh, 2006. S-wave velocity measurements applied to the seismic microzonation of Basel, Upper Rhine Graben. Submitted to GJI.

Kind, F., 2002. Development of Microzonation Methods: Application to Basle, Switzerland. PhD Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Diss. ETH Nr. 14548.

Kind, F., Fäh, D., P., Giardini, D., 2005. Array measurements of S-wave velocities from ambient vibrations. Geophysical J. Int., 160, 114-126.

Mayer-Rosa, D., Rüttener, E., Fäh, D., Schindler, C., Beer, C., Wagner, J.-J. and C. Frischknecht, 1997. Erdbebengefährdung und Mikrozonierung in der Schweiz, Beitrag zur Erforschung des Erdbebenrisikos in Abhängigkeit vom geologischen Untergrund. VdF Hochschulverlag AG, ETH Zürich, pp 90.

Noack, T., Kruspan, T., Fäh, D., Rüttener, E., 1997. Seismic microzonation of the city of Basel (Switzerland) based on geological and geotechnical data and numerical simulations. Eclogea Geol. Helv.; 90: 433-448.

Noack,T., Fäh, D., P. Kruspan, 1999. Erdbebenmikrozonierung für den Kanton Basel-Stadt. Landeshydrologie und –geologie, Geologische Bericht Nr.24.

Oprsal, I., Fäh, D., Mai, M. and D. Giardini, 2005. Deterministic earthquake scenario for the Basel area - Simulating strong motion and site effects for Basel, Switzerland. J. Geophys. Res, VOL. 110, B04305, doi:10.1029/2004JB003188.

SIA-Dokumentation D0150, 1998. Handlungsbedarf von Behörden, Hochschulen, Industrie und Privaten zur Erdbebensicherung der Bauwerke in der Schweiz, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich 1998.

SIA, 2003. Norm 261, Einwirkungen auf Tragwerke. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Zürch, 75 p.

Wiemer, S., Giardini, D., Fäh, D., Deichmann, N., Sellami, S. and S. Jenny, 2005. Probabilistic Seismic Hazard Assessment for Switzerland: Best Estimates and Uncertainties. Journal of Seismology, submitted.