

Umweltforschung in Baden-Württemberg

Abschlussbericht

Verbundvorhaben: Basisdaten für tiefe Geothermievorhaben in Baden-Württemberg: Geothermale Fluide, tektonische Spannungen und Seismizität

von

Thomas Kohl, Philipp Blum, Thomas Mutschler,
Frank Schilling, Birgit Müller, Emmanuel Gaucher
Karlsruher Institut für Technologie, Campus Süd
Institut für Angewandte Geowissenschaften

Kurt Bucher
Universität Freiburg
Institut für Geowissenschaften

Manfred Joswig
Universität Stuttgart
Institut für Geophysik

Detlev Doherr
Hochschule Offenburg
Fakultät Maschinenbau und Verfahrenstechnik

Roland Koenigsdorff
Hochschule Biberach
Institut für Gebäude- und Energiesysteme

Förderkennzeichen: L75 12001 - 12005

Laufzeit: 1.5.2012 - 31.12.2013

Die Arbeiten dieses Projekts wurden mit Mitteln
des Landes Baden-Württemberg durchgeführt.

September 2014

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung	5
1.1 Motivation und Hintergrund – Konzeption des Verbunds	5
1.2 Übersicht über die Ergebnisse des Verbundvorhabens.....	6
1.2.1 Prognosetool für geothermale Fluide in Aquiferen des Reingrabens und seiner Randgebiete (Universität Freiburg, Prof. Bucher)	6
1.2.2 Definition eines wissenschaftlichen Begleitprogramms mit seismischen Monitoring für die Geothermiebohrung Pfullendorf (KIT, Professor Kohl, Dr. Gaucher)	6
1.2.3 Erstellung einer Detektionsschwelle kritischer Seismizität aus der Analyse der natürlichen Magnituden- Häufigkeitsbeziehung für Baden-Württemberg (Universität Stuttgart, Prof. Joswig)	7
1.2.4 Untersuchung der Schwell- und Quellfähigkeit sulfathaltiger Gesteine in Baden Württemberg in Hinblick auf deren Erschließung (KIT, Prof. Kohl, Prof. Blum, Dr. Mutschler).....	7
1.2.5 Forschungsdatenbank für geothermische Basisdaten in Baden-Württemberg (Hochschule Offenburg, Prof. Dr. Doherr).....	7
1.2.6 Energetisch und exergetisch verbesserte Nutzung von Wärme aus Tiefer Geothermie in Baden- Württemberg (Hochschule Biberach, Prof. Dr. Koenigsdorff)	8
1.2.7 Geomechanikmodell zur Nutzung des Untergrunds - Forschungsprojekt mit Service-Funktion (KIT/LFZG, Prof. Dr. Schilling, Dr. Müller, Dr. Hergert).....	8
1.3 Beitrag der Ergebnisse zu den Zielen des Förderprogramms des Zuwendungsgebers;	9
1.3.1 Nutzen und praktische Verwertbarkeit.....	9
1.3.2 Veröffentlichung der Ergebnisse.....	9
2 Abschlussberichte der Teilprojekte	10
2.1 Prognosetool für geothermale Fluide in Aquiferen des Rheingrabens und seiner Randgebiete (Universität Freiburg, Prof. Bucher).....	10
2.1.1 Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse.....	10
2.1.2 Motivation und Hintergründe des Vorhabens.....	10
2.1.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	10
2.1.4 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen.....	11
2.1.5 Planung und Ablauf des Vorhabens	11
2.1.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	11
2.1.7 Erzielte Ergebnisse (Daten und Resultate).....	12
2.1.8 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse	14
2.1.9 Literatur.....	14
2.2 Konzeption und wissenschaftliche Begleitung des seismischen Monitoring für das Bohrvorhaben Pfullendorf (KIT, Prof. Kohl, Dr. Gaucher)	14
2.2.1 Motivation und Hintergründe des Vorhabens.....	14

2.2.2	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	14
2.2.3	Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen	14
2.2.4	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	15
2.2.5	Planung und Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens	15
2.2.6	Nutzen und praktische Verwertbarkeit.....	15
2.2.7	Veröffentlichung der Ergebnisse.....	16
2.2.8	Literatur:	16
2.3	Quantitative Analyse der Vollständigkeit des instrumentellen Erdbebenkatalogs von Baden-Württemberg (Universität Stuttgart, Prof. Joswig).....	16
2.3.1	Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse;.....	16
2.3.2	Motivation und Hintergründe des Vorhabens;.....	16
2.3.3	Aufgabenstellung;	16
2.3.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde;	16
2.3.5	Planung und Ablauf des Vorhabens;	17
2.3.6	Datengrundlagen:	17
2.3.7	Zusammenarbeit mit anderen Stellen;	17
2.3.8	Beitrag der Ergebnisse zu den Zielen des Förderprogramms des Zuwendungsgebers;	17
2.3.9	Erzielte Ergebnisse;	18
2.3.10	Nutzen, insbesondere praktische Verwertbarkeit der Ergebnisse und Erfahrungen; Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer auch in projektfremde Anwendungen und Branchen;	19
2.3.11	Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse.	19
2.4	Untersuchung der Schwell- und Quellfähigkeit sulfathaltiger Gesteine in Baden-Württemberg in Hinblick auf deren Erschließung (KIT, M. Grimm, Prof. Kohl, Jun.-Prof Blum)	20
2.4.1	Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse.....	20
2.4.2	Motivation und Hintergründe des Vorhabens.....	20
2.4.3	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	20
2.4.4	Planung und Ablauf des Vorhabens	21
2.4.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	22
2.4.6	Erzielte Ergebnisse (Daten und Resultate).....	22
2.4.7	Nutzen, insbesondere praktische Verwertbarkeit der Ergebnisse und Erfahrungen	24
2.4.8	Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse	24
2.4.9	Literatur.....	24
2.5	Basisdaten für tiefe Geothermievorhaben in Baden-Württemberg: Geothermale Fluide, tektonische Spannungen und Seismizität (Hochschule Offenburg, Prof. Doherr)	25
2.5.1	Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse.....	25
2.5.2	Motivation und Hintergründe des Vorhabens.....	25

2.5.3	Portal der geothermischen Informationen als Pilotanwendung	25
2.5.4	Erzielte Ergebnisse	27
2.5.5	Nutzen und praktische Verwertbarkeit.....	29
2.5.6	Veröffentlichungen des Ergebnisses.....	29
2.5.7	Internet- Datenquellen	29
2.6	Energetisch und exergetisch verbesserte Nutzung von Wärme aus tiefer Geothermie in Baden-Württemberg (Hochschule Biberach, Prof. Dr.-Ing. Roland Koenigsdorff).....	30
2.6.1	Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse.....	30
2.6.2	Motivation und Hintergründe des Vorhabens.....	30
2.6.3	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	31
2.6.4	Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen.....	31
2.6.5	Planung und Ablauf des Vorhabens	31
2.6.6	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	31
2.6.7	Erzielte Ergebnisse (Daten und Resultate).....	32
2.6.8	Nutzen, insbesondere praktische Verwertbarkeit der Ergebnisse und Erfahrungen	35
2.6.9	Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer auch in projektfremde Anwendungen und Branchen	35
2.6.10	Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse	35
2.6.11	Literatur.....	35
2.7	3-D Geomechanikmodell zur Nutzung des Untergrunds - Forschungsprojekt mit Service-Funktion (KIT/LFZG, Prof. Schilling, Dr. Müller).....	38
2.7.1	Kurzbericht der Forschungsergebnisse (hier Zwischenstand)	38
2.7.2	Motivation und Hintergründe des Vorhabens.....	38
2.7.3	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	38
2.7.4	Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen.....	39
2.7.5	Planung und Ablauf des Vorhabens	39
2.7.6	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	40
2.7.7	Erzielte Ergebnisse (Daten und Resultate).....	40
2.7.8	Nutzung und praktische Verwertbarkeit.....	44
2.7.9	Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer auch in projektfremde Anwendungen und Branchen	44
2.7.10	Veröffentlichung des Ergebnisses.....	44
2.7.11	Literatur.....	44
3	Quantitative Analyse der Vollständigkeit des instrumentellen Erdbebenkatalogs von Baden-Württemberg - ausführlicher Bericht	45
3.1	Vorwort.....	45
3.2	Einleitung	45

3.3 Grundlagen	46
3.3.1 Die Vollständigkeitsmagnitude M_c	46
3.3.2 Seismisches Rauschen	47
3.3.3 Geologie und Erdbebengebiete von Baden-Württemberg	47
3.3.4 Historische Erdbeben-Aufzeichnungen	48
3.3.5 Das Stationsnetz in Südwestdeutschland	49
3.4 Datengrundlagen	51
3.5 Räumliche und zeitliche Abgrenzung	56
3.6 Die Vollständigkeitsmagnitude in Baden-Württemberg	56
3.6.1 Variationen von M_c beim Vergleich Tag-Nacht	56
3.6.2 Probabilistischer Ansatz	62
3.6.3 Katalogbezogener Ansatz	72
3.7 Vergleichende Betrachtung	77
3.7.1 Tag-Nacht-Vergleich und Probabilistischer Ansatz	78
3.7.2 Probabilistischer Ansatz und Katalogbezogener Ansatz	79
3.7.3 Fazit	81
3.8 Zusammenfassung	81
3.9 Literatur	82
3.10 Anhänge	83

1 Zusammenfassung

1.1 Motivation und Hintergrund – Konzeption des Verbunds

Die Forschungseinrichtungen in Baden-Württemberg haben im Verbundvorhabens geothermisch relevante Daten bearbeitet, um die komplex gekoppelten Prozesse im Untergrund transdisziplinär zu untersuchen, als Grundlage für die mit der effektiven und sicheren Nutzung der Geothermie verbundenen Fragestellungen. Das Vorhaben war in Arbeitspakete mit folgenden Zielen gegliedert:

- **Prognosetool für geothermale Fluide in Aquiferen des Rheingrabs und seiner Randgebiete.** Dieser Forschungsteil zielt darauf ab, zuverlässige Prognosen der zu erwartenden Wasserchemie vor dem Abteufen der ersten Bohrung eines Geothermievorhabens zu gewinnen und das Potential für Scaling und Korrosion der Tiefenwässer zu prognostizieren.
- **Definition eines wissenschaftlichen Begleitprogramms mit seismischem Monitoring** für die Geothermiebohrung Pfullendorf. Das Monitoring hätte beitragen sollen zur Minimierung der seismischen Gefährdung, Optimierung der Doublettenauslegung und Verbesserung in der Erfassung der Reservoireigenschaften. Dieser Projektteil ist bereits abgeschlossen.
- **Erstellung einer Detektionsschwelle kritischer Seismizität aus der Analyse der natürlichen Magnituden-Häufigkeitsbeziehung für Baden-Württemberg.** Im Vorhaben wird die Erfassungsschwelle der seismischen Netze für Baden-Württemberg detailliert untersucht, um das Auftreten von induzierten seismischen Ereignissen in der Nähe von geothermischen Kraftwerken von natürlicher Seismizität zu diskriminieren.
- **Untersuchung der Bedeutung sulfathaltiger Gesteine für Schadensfälle in Baden Württemberg** und Planung von Demonstrationsprojekten. Ziel ist die qualitative und quantitative Untersuchung bestehender Schadensfälle durch Erdwärmesonden in Baden-Württemberg basierend auf der 2011 vom Umweltministerium vorgelegten Studie zu Schadensfällen.
- **Forschungsdatenbank für geothermische Basisdaten in Baden-Württemberg.** In dem Pilotprojekt soll die geeignete Datenstruktur für multivariate Daten entwickelt und in ein Informationssystem implementiert werden, um übergreifende Vernetzungen der vielfältigen geowissenschaftlichen Daten geothermischer Projekte in Baden-Württemberg zu ermöglichen.
- **Energetisch und exergetisch verbesserte Nutzung von Wärme aus Tiefer Geothermie in Baden-Württemberg.** Tiefe geothermische Energie liegt zunächst als Wärme auf einem mittelhohen Temperaturniveau von i. d. R. weniger als 200 °C vor. Dies ist nur dann wirtschaftlich nutzbar, wenn eine genügend hohe Wärmeabnahme nahe genug am Standort der geothermischen Anlage möglich ist. In diesem Arbeitspaket sollen die Möglichkeiten der Effizienzsteigerung systemanalytisch untersucht und als Datenbasis zur Verfügung gestellt werden.
- **3D Geomechanikmodell zur Nutzung des Untergrunds.** Auf der Basis eines numerischen 3D-Geomechanikmodells sollen plausible Spannungs- und Deformationswerte zwischen den Lokationen tatsächlicher Messungen des Spannungsfelds in BW als Grundlage für Forschungsarbeiten und Gutachten bereitgestellt werden.

Ein über die Einzelvorhaben hinausgehendes Ziel war, dass die Forschung im Verbundvorhaben die unterschiedlichen Einrichtungen des Landes Baden-Württemberg besser vernetzt, die Forschung regional gestärkt und auf die Themen, die für Baden-Württemberg entscheidend sind, fokussiert wird, um damit wissenschaftlich fundierte Grundlagen für umweltpolitische Entscheidungen geschaffen.

1.2 Übersicht über die Ergebnisse des Verbundvorhabens

Im Folgenden werden die Hauptergebnisse jedes Teilprojekts zusammenfassend dargestellt. Die detaillierten Berichte sind für jedes Projekt in der Anlage gegeben.

1.2.1 Prognosetool für geothermale Fluide in Aquiferen des Reingrabens und seiner Randgebiete (Universität Freiburg, Prof. Bucher)

Die Kenntnis und Prognose der chemischen Zusammensetzung der geförderten Wässer ist für Geothermie-Kraftwerke von Bedeutung, weil aus den Wässern Minerale ausfallen (scaling) und durch die heißen Salzlauge auch massive Werkstoff-Korrosion (corrosion) verursacht werden können. Eine gezielte Abwehr von Scaling und Korrosion setzt eine zuverlässige Prognose der zu erwartenden Wasserchemie vor dem Abteufen der ersten Bohrung voraus. Ziel des Vorhabens ist es, möglichst zuverlässige Vorhersagen über die Wasserchemie bei Tiefengeothermie-Projekten im Rheintalgraben machen zu können und das Potential für Scaling und Korrosion der Tiefenwässer zu prognostizieren. Dazu werden und wurden Experimente mit einem Hochdruckreaktor durchgeführt, mit welchen die Reaktionen von Gestein und Wasser simuliert werden können. Die Experimente umfassen Reaktionen von Graniten und Einzelmineralen aus Graniten aus potentiellen geothermalen Reservoirgesteinen des Rheintals mit 1 bis 2 m NaCl Lösungen bei Temperaturen bis 350°C und Drucken bis 350 bar. Dabei wird auch mit unterschiedlichen CO₂ Partialdrucken und REDOX Bedingungen gearbeitet. Der Reaktor ist Ende April 2013 geliefert worden. Nach Aufbau der Einrichtung und einer Testphase wurden die ersten Experimente im Mai 2013 gefahren. Im Einzelnen wurden folgende Resultate erzielt:

- Experimente mit reinem Quarz, dem Material der Sandsteinaquifere, ergaben die bereits von der Literatur bekannte Löslichkeit in Abhängigkeit der Temperatur und auch die erwartete Lösungskinetik.
- Die neuen Quarz-Experimente mit 2m NaCl Lösung zeigten eine etwas höhere Löslichkeit in Fluiden mit realen Salinitäten von Tiefenfluiden.
- Experimente mit Plagioklas, dem Hauptmineral aller Kristallingesteine aus Tiefenaquiferen, zeigten durchgehend Anzeichen für kongruente Lösung des Feldspats. Das heißt, Ca und Na in der Flüssigphase waren in allen Experimenten identisch mit Ca/Na im Feldspat. Dies war so nicht erwartet und unterscheidet sich von Vorhersagen der Literatur.
- Experimente mit Granit aus dem Untergrund des Rheintals mit Wasser ergaben sehr hohe Fluorid-Gehalte (6.33 mg/L). Dies ist ein wichtiges Ergebnis. Es zeigt, dass die gemessenen hohen Fluoridgehalte in Tiefenwässern aus dem Rheintal aus der Aquifermatrix stammen. $XK=0.3$ zeigt, dass Kalium/Natrium Verhältnis aus der Wasser-Gestein Reaktion sehr hoch ist. Ein Umstand welcher wegen der hohen NaCl-Salinität natürlicher Tiefenwässer aus dem Rheintal nicht erkennbar ist.
- Einige Analysendaten zu diesem Experiment sind noch ausstehend. Die Daten zum > 800 Std Experiment Granit mit 2m NaCl Lösung liegen noch nicht vor.

1.2.2 Definition eines wissenschaftlichen Begleitprogramms mit seismischen Monitoring für die Geothermiebohrung Pfullendorf (KIT, Professor Kohl, Dr. Gaucher)

Die Bundesrepublik Deutschland hat für die Liegenschaft der Bundeswehr, Kaserne Pfullendorf, eine Nutzung von Erdwärme mit Tiefengeothermie konzipiert, die momentan umgesetzt wird. Im Rahmen des LFZG-Verbundvorhabens wurden die vorbereitenden Arbeiten und die Antragstellung für das begleitende wissenschaftliche Monitoringprogramm durchgeführt. Leider konnte keine Förderung durch das BMU erhalten werden. Das Monitoring hätte zur Minimierung der seismischen Gefährdung, Optimierung der Doublettenauslegung und Verbesserung in der Erfassung der Reservoirigenschaften beitragen sollen. Dieser Projektteil ist bereits abgeschlossen. Die erste Bohrung in Pfullendorf und die Testarbeiten in dieser Bohrung sind beendet. Die zweite Bohrung ist ebenfalls abgeschlossen und wird momentan ausgebaut und getestet. Die Bohr- und Testprogramme werden vom LFZG fachlich begleitet.

1.2.3 Erstellung einer Detektionsschwelle kritischer Seismizität aus der Analyse der natürlichen Magnituden-Häufigkeitsbeziehung für Baden-Württemberg (Universität Stuttgart, Prof. Joswig)

Die Fähigkeit seismischer Netze zur Ereigniserfassung wird durch eine in Raum und Zeit veränderliche Detektionsschwelle beschrieben. Stehen genügend Katalogdaten seismischer Ereignisse zur Verfügung, kann mit Ableitung einer ebenfalls raumzeit-abhängigen Magnitude M_c als Vollständigkeitschwelle beschrieben werden, bis zu welcher Empfindlichkeit alle statistisch erwartbaren Erdbeben erfasst wurden, das heißt in wie weit der Katalog vollständig ist. Im Projekt wurden zwei verschiedene Zeiträume (1996-2005 und 2006-2011) untersucht, um zusätzlich die zeitliche Änderung zu dokumentieren. Der ausführliche Bericht des Teilprojekts ist in der Anlage 1 enthalten.

Im Vorhaben konnte eine umfassende Analyse der Vollständigkeitsmagnitude für das Landesgebiet erstellt werden. Diese Schwelle der Detektionsvollständigkeit variiert im Tagesgang und ist zudem räumlichen Variationen unterworfen. Im Verlauf der letzten 4-5 Jahre wurde durch die Einrichtung von Online-Verbindungen der Stationen des Landeserdbebendienst eine deutliche Senkung der Vollständigkeitsmagnitude erzielt, wobei diese Änderung, über das Landesgebiet gesehen, unterschiedlich stark ausfällt. Insbesondere ist zu vermerken, dass

- Die Vollständigkeitsmagnitude großen regionalen Schwankungen unterworfen ist. Es finden sich über das gesamte Landesgebiet Differenzen im Bereich von 0.7 Magnituden. Dies gilt für beide betrachteten Zeiträume.
- Die Vollständigkeitsmagnitude im Zeitraum 1996-2005 die niedrigsten Werte im Bereich des Erdbebengebiets der westlichen Schwäbischen Alb aufwies, dieses Gebiet der niedrigen Vollständigkeitsmagnituden sich aber später weiter in den Südwesten des Landes verlagerte. Dort kann anhand der Ergebnisse dieser Arbeit rezent von einer Vollständigkeitsmagnitude im Bereich von rund 1.2 ausgegangen werden. Der Nordosten des Landes kommt auf Werte von rund 1.7.
- Durch die zunehmende Zahl an Online-Stationen, und hier sei vor allem das BFO genannt, die Detektionsempfindlichkeit des Gesamtnetzwerks deutlich verbessert wurde. Die Änderungen betragen bis zu einer Magnitude im Südwesten des Landes, im Raum zwischen Ulm und Stuttgart nur rund 0.2 Magnituden.

1.2.4 Untersuchung der Schwell- und Quellfähigkeit sulfathaltiger Gesteine in Baden Württemberg in Hinblick auf deren Erschließung (KIT, Prof. Kohl, Prof. Blum, Dr. Mutschler)

Seit dem Bekanntwerden erster Schadensfälle im Zusammenhang mit Erdwärmesonden wächst in Baden-Württemberg die Verunsicherung in der Bevölkerung und die Zahl der jährlichen Neuinstallationen ist seit 2009 rückläufig. In dieser Studie konnten Ursachen und Auswirkungen anhand geologischer und hydrogeologischer Charakterisierung der entstandenen Schadensfälle zu konzeptionellen Schadensmodellen zusammengefasst werden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass in 90 % der Fälle lokale Grundwasservorkommen, mit auf- oder absteigenden Potentialen, beteiligt waren und die Ursachen in einer unvollständigen, undichten Hinterfüllung der Erdwärmesonde liegen. Des Weiteren liegt die Schadensursache in fast 70 % der Fälle im Bereich der Grenze zwischen Keuper und Muschelkalk. Eine erste Gefahreinschätzung hat ergeben, dass sich das Risiko eines Schadenfalls, mit Erreichen der Grenze zwischen Keuper und Muschelkalk um das 40-fache erhöht. Trotz mittlerweile über 30.000 funktionierenden Erdwärmesonden, allein in Baden-Württemberg, gilt es durch die weitere Verbesserung von Qualitätssicherungsstrategien das Risiko für zukünftige Schadensfälle zu minimieren.

1.2.5 Forschungsdatenbank für geothermische Basisdaten in Baden-Württemberg (Hochschule Offenburg, Prof. Dr. Doherr)

Die vielfältigen geowissenschaftlichen Daten geothermischer Projekte in Baden-Württemberg sind in unterschiedlichen Systemen und verschiedenen Formaten gespeichert, so dass keine übergreifenden Vernetzungen möglich sind. In dem Pilotprojekt wurde die Erschließung von eigenen Basisdaten und Fremddaten zum Thema tiefe Geothermievorhaben in Baden-Württemberg durchgeführt. Eigens zu diesem Zweck wurde ein LINUX- Server an der Hochschule Offenburg eingerichtet, der die erforderliche Website inklusive der entwickelten Portalfunktionen bereitstellt. Der Server nutzt als Content-Management-System der Webseiten und deren Inhalte das Programm WordPress, welches mit einem eigenen Layout für die Forschungsdatenbank FPTGeo aktiviert wurde. Als Datenbanksystem wird das MySQL genutzt, um die Projektdaten zu speichern und bei Anfragen zur Verfügung zu stellen. Die Forschungsdatenbank FPTGeo ist unter <http://geo.hs-offenburg.de> zu erreichen.

Unter Nutzung der Programmierschnittstelle von Google Maps wurden die Projektdaten der verschiedenen internen und externen Quellen zu einer Kartenanwendung zusammengefasst, die über die Webseite der Forschungsdatenbank erreichbar

ist. Verfügbar sind Daten aus der Aufschlussdatenbank des LGRB (Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau – Freiburg), des Geothermischen Informationssystems (GeotIS) und weiterer Projektdaten über Planungen oder bereits im Bau befindlicher Systeme. Durch diese Zusammenführung der publizierten Daten in einem Portal ergibt sich eine übergreifende Übersicht zu Aufschlussdaten, Vertikalschnitten und geothermischen Standorten mit direkter Weiterleitung zu den entsprechenden Datenquellen. Darüber hinaus lassen sich Features von Google Maps, wie z.B. eine Ortssuche und verschiedene Kartendarstellungen (Maps, Geländedaten, Satellitenbilder, Street View) nutzen. Ergänzt wird das Portal durch eine fachspezifische Literatursammlung zu Themen rund um die Geothermie, die sich aus verschiedenen externen Projektbeschreibungen und Ausarbeitungen speist. Das Pilotprojekt der Forschungsdatenbank kann jederzeit durch weitere externe Quellen erweitert und ergänzt werden, wenn z.B. die Landes- Bohrdatenarchive für einen Internetzugriff geöffnet werden, bzw. aufbereitete Bohrdaten verfügbar gemacht werden.

1.2.6 Energetisch und exergetisch verbesserte Nutzung von Wärme aus Tiefer Geothermie in Baden-Württemberg (Hochschule Biberach, Prof. Dr. Koenigsdorff)

Bei der Nutzung tiefer Geothermie sind grundsätzlich Stromerzeugung und Wärmenutzung gegeneinander abzuwägen bzw. aufeinander abzustimmen, um eine optimale energetische und exergetische Ausnutzung zu erreichen. In Fällen mit entsprechenden Randbedingungen, hoher Wärmenutzungstemperatur (nahe der Thermalwassertemperatur) sowie jährlicher Wärmenutzungsdauer kann die reine Wärmenutzung ohne Stromerzeugung der reinen oder auch gekoppelten Stromerzeugung vorzuziehen sein. Die im Betrieb befindlichen Geothermieanlagen weisen heute noch hohe Eigenenergieverbräuche auf. Diese zu senken, sollte ein vorrangiges Ziel künftiger Planungen, Betriebsstrategien sowie von Forschung und Entwicklung sein. Auch zur Optimierung des Kraftwerksprozesses selbst steht eine ganze Reihe von Maßnahmen zur Verfügung. Sowohl auf Komponenten- als auch auf System- und Planungsebene ist noch ein signifikantes Entwicklungspotenzial vorhanden.

In Verbindung mit Nutzungskonzepten für Niedertemperatur- & Kaltnetze (LowEx-Netze) lässt sich die exergetische Ausnutzung der Wärme aus tiefer Geothermie über konventionelle Lösungen hinaus maximieren. Hier sollte in Kraftwerken die Wärmeauskoppelung und ggf. Wärmespeicherung aus dem Rückkühlprozesses in Erwägung gezogen werden, wodurch sich in bestimmten Betriebssituationen auch der Wirkungsgrad des Stromerzeugungsprozesses noch etwas verbessern lässt. Zur sekundären Stromerzeugung über Niedertemperatur-Wärmekraftprozesse stehen momentan noch keine relevanten Technologien marktreif zur Verfügung, sind aber aktuell Gegenstand der Forschung. Hier könnten zukünftig insbesondere die Thermoelektrik, Thermotunnelung und neuartige Stirling-Motoren vielversprechend sein.

1.2.7 Geomechanikmodell zur Nutzung des Untergrunds - Forschungsprojekt mit Service-Funktion (KIT/LFZG, Prof. Dr. Schilling, Dr. Müller, Dr. Hergert)

Ziel des Projekts ist die Bereitstellung von Information über Spannung und Deformation im Untergrund, die mittels eines 3D numerischen geomechanischen Finite Elemente Modells abgeschätzt werden. Dieses Modell liefert Randbedingungen für hochauflösendere Submodelle an Standorten zukünftiger Geothermieprojekte und dient somit als Grundlage für Forschungsarbeiten, Gutachten und zur Unterstützung von Genehmigungsbehörden. Ausgehend von den bisher nur punktuell vorliegenden Daten soll mithilfe des Modells zu einer dreidimensionalen Darstellung des Spannungsfeldes im Raum gelangt werden. Bei der Umsetzung des Modells konnten wesentliche Meilensteine bereits erzielt werden. So wurden für Baden-Württemberg die Schichten des geologischen Landesmodells bereitgestellt, diese werden derzeit technisch soweit bearbeitet, dass sie Eingang in ein geomechanisches Finite Element Modell finden können. Da bei Modellierungen immer ein Trade-off zwischen der Anzahl der Elemente und der Rechnerleistung einerseits, der Detailtreue andererseits existiert, war es von großer Wichtigkeit, diejenigen Strukturelemente, die unbedingt in das Modell implementiert werden müssen, zu identifizieren. Das ist sowohl, was die Störungszonen als auch die Schichten betrifft, gelungen. Die möglichen Vergleichsdaten (Hebungen, Senkungen, Spannungsfeld in Betrag und Richtung) wurden mit den dafür verantwortlichen Stellen besprochen.

1.3 Beitrag der Ergebnisse zu den Zielen des Förderprogramms des Zuwendungsgebers;

Im Ergebnis hat das Verbundvorhaben eine strukturbildende Funktion aufgrund der Inter- und Transdisziplinarität der Forschung. Diese führte zu einer gezielten und stärkeren regionalen Fokussierung der Themen auf die spezifischen Gegebenheiten von Baden-Württemberg, die es den Entscheidungsträgern erlauben wird, wissenschaftlich fundierte Grundlagen für nachhaltige umweltpolitische Entscheidungen zu treffen.

1.3.1 Nutzen und praktische Verwertbarkeit

Das Internet-Tool zur Forschungsdatenbank für geothermische Basis-Daten in Baden-Württemberg bietet zum ersten Mal die Möglichkeit, die wesentlichen, aber sonst dezentral zugänglichen Daten wie z.B. von GEOTIS oder der Aufschlusdatenbank des LGRB direkt miteinander zu verknüpfen. Das Tool kann mit Google-Funktionen kombiniert werden (z.B. ortsbezogene Informationen aus Google Maps) und ist daher auch unkompliziert in der Bedienung, da viele Elemente aus dem Standard-Internet-Betrieb den Nutzern bereits bekannt sind.

Die experimentellen Ergebnisse der geochemischen Analysen können, wie vorgesehen, dazu verwendet werden, um fundierte Vorhersagen über die zu erwartende chemische Zusammensetzung der Fluide zu machen, die aus einem bestimmten Aquifertyp (Gesteinsmatrix) des Rheingrabens gefördert werden sollen.

Die Klassifizierung der Schadensfälle bei Erdwärmesonden erfolgte über die Zuteilung von Ursachen und Auswirkungen. Daraus können konzeptionelle Schadensmodelle entwickelt werden, die zu einem verbesserten Prozessverständnis der Ursachen und damit zu einer zukünftigen Vermeidung von Schadensfällen beitragen.

Die für Pfullendorf vorgeschlagene –leider aber nicht umgesetzte- Methode des passiven Imaging beeinflusst die Bohraktivitäten nicht und stellt eine Möglichkeit dar, im Bereich der Grundlagenforschung eine Methode zu entwickeln, an Hand derer man aus dem Bohrvorgang selbst ein Geschwindigkeits-Tiefenmodell ermitteln kann. Letzteres wird im Allgemeinen für seismisches Monitoring bei Reservoirs benötigt und üblicherweise durch eine meist teure VSP Messung geliefert.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Detektionsschwelle der Seismizität in Baden-Württemberg implizieren weitergehende Studien, die einen bedeutenden Beitrag zum Kenntnisstand der Erdbeben-Verteilung und -Entwicklung auf der Schwäbischen Alb leisten könnten.

Das geomechanische Modell dient als Grundlage für lokale Untersuchungen für Projekte der Geothermie aber auch im Hinblick auf (Gas)Speicherung im Untergrund bzw. Lagerung von Abfällen und kann dort im Vorfeld von Untersuchungen/Bohrungen schon erste Hinweise auf Spannungskonzentrationen im Untergrund liefern.

1.3.2 Veröffentlichung der Ergebnisse

Die Daten wurden auf den Statuskolloquien 2013 und 2014 präsentiert. Das Internet-Tool zur Forschungsdatenbank für geothermische Basis-Daten in Baden-Württemberg ist auf der Web-Seite <http://geo.hs-offenburg.de> eingerichtet und bereits jetzt frei zugänglich. Links werden z.B. von der Homepage des LFZG (www.lfzg.de) geschaltet.

Die Ergebnisse der Feldmessungen der Schwäbischen Alb im Rahmen der "Quantitativen Analyse der Vollständigkeit des instrumentellen Erdbebenkatalogs von Baden-Württemberg" wurden auf der DGG-Jahrestagung 2014 im Rahmen eines Vortrags veröffentlicht.

Die Ergebnisse zu den Untersuchungen "Untersuchung der Schwell- und Quellfähigkeit sulfathaltiger Gesteine in Baden-Württemberg in Hinblick auf deren Erschließung" wurden in der Zeitschrift "Grundwasser" eingereicht (Grimm et al., 2014).

Das Teilprojekt "Energetisch und exergetisch verbesserte Nutzung von Wärme aus Tiefer Geothermie in Baden-Württemberg" plant eine Veröffentlichung in der Zeitschrift "Brunnenbau".

Die geomechanischen Modellierungen sollen über das geologische Landesamt in Freiburg einer größeren Menge von Nutzern zugänglich gemacht werden.

2 Abschlussberichte der Teilprojekte

2.1 Prognosetool für geothermale Fluide in Aquiferen des Rheingrabens und seiner Randgebiete (Universität Freiburg, Prof. Bucher)

2.1.1 Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse

Im Rahmen des geförderten Projekts wurden für den Rheingraben typische Reservoirgesteine und deren Minerale mit Wasser und anderen charakteristischen Tiefen-Fluiden bei Reservoirtemperaturen (meist 200°C und ca. 20 bar) in einem, mit Projektmitteln beschafften, Autoklaven (Büchi Limbo li) reagiert. Die experimentellen Reaktionszeiten variierten von ca. 50 bis 810 Stunden (2 – 34 Tage).

Experimente mit reinem Quarz, dem Material der Sandsteinaquifere, ergaben die bereits von der Literatur bekannte Löslichkeit in Abhängigkeit der Temperatur und auch die erwartete Lösungskinetik. Die neuen Quarz-Experimente mit 2m NaCl Lösung zeigten eine etwas höhere Löslichkeit in Fluiden mit realen Salinitäten von Tiefenfluiden.

Experimente mit Plagioklas, dem Hauptmineral aller Kristallingesteine aus Tiefenaquiferen, zeigten durchgehend Anzeichen für kongruente Lösung des Feldspats. Das heißt, Ca und Na in der Flüssigphase waren in allen Experimenten identisch mit Ca/Na im Feldspat. Dies war so nicht erwartet und unterscheidet sich von Vorhersagen der Literatur.

Experimente mit Granit aus dem Untergrund des Rheintals mit Wasser ergaben sehr hohe Fluorid-Gehalte (6.33 mg/L). Dies ist ein wichtiges Ergebnis. Es zeigt, dass die gemessenen hohen Fluoridgehalte in Tiefenwässern aus dem Rheintal aus der Aquifermatrix stammen. $XK=0.3$ zeigt, dass Kalium/Natrium Verhältnis aus der Wasser-Gestein Reaktion sehr hoch ist. Ein Umstand welcher wegen der hohen NaCl-Salinität natürlicher Tiefenwässer aus dem Rheintal nicht erkennbar ist. Einige Analysendaten zu diesem Experiment sind noch ausstehend. Die Daten zum > 800 Std Experiment Granit mit 2m NaCl Lösung liegen noch nicht vor.

Die experimentellen Ergebnisse können, wie vorgesehen, dazu verwendet werden, um fundierte Vorhersagen über die zu erwartende chemische Zusammensetzung der Fluide zu machen, die aus einem bestimmten Aquifertyp (Gesteinsmatrix) des Rheingrabens gefördert werden sollen.

2.1.2 Motivation und Hintergründe des Vorhabens

Die Nutzung der tiefen Geothermie basiert auf der Förderung von heißem Wasser aus Speichergesteinen im Untergrund. Je nach mineralischer Zusammensetzung und Temperatur der Speichergesteine enthalten die geförderten Thermalwässer unterschiedliche gelöste Inhaltsstoffe - Salze. Dabei spielen die Wasser-Fließwege und Gaszutritte (z.B. CO₂) eine Rolle für die Wasserchemie. Die Kenntnis und Prognose der chemischen Zusammensetzung der geförderten Wässer ist für Geothermie-Kraftwerke von Bedeutung, weil aus den Wässern Minerale ausgeschieden (scaling) und durch die heißen Salzlaugen auch massive Werkstoff-Korrosion (corrosion) verursacht werden können. Eine gezielte Abwehr von Scaling und Korrosion setzt eine zuverlässige Prognose der zu erwartenden Wasserchemie vor dem Abteufen der ersten Bohrung voraus. Ziel des Vorhabens ist es, möglichst zuverlässige Vorhersagen über die Wasserchemie bei Tiefengeothermie-Projekten im Rheintalgraben machen zu können und das Potential für Scaling und Korrosion der Tiefenwässer zu prognostizieren.

2.1.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Der grundsätzliche Wissensstand über die chemische Zusammensetzung von Tiefenwässern im Kristallin wurde von Frapé et al. (2004) und von Bucher & Stober (2010) zusammengefasst. Nicholson (1993) gibt einen Überblick über die Chemie von Thermalwässern im Hinblick auf Hochenthalpie-Geothermieranlagen. Experimente mit Fluid-Gestein Reaktionen wurden von Moore et al. 1983 veröffentlicht. Dabei wurde in Durchfluss-Experimenten Wasser mit Granit reagiert. Entlang des Fließweges wurden Temperaturgradienten angelegt. Diese frühen Experimente haben wesentlich zum Verständnis der für Geothermieranwendungen relevanten Vorgänge beigetragen.

Konkret zu den geothermalen Reservoiren des Oberrheingrabens wurden erstmals von Pauwels et al (1992) Experimente an Graniten von Soultz-sous-Forets durchgeführt. Weil die Bohrung damals erst 1800 m tief war, hat man die Experimente bei 137°C durchgeführt. Seither ist Soultz 5 km tief und die Reservoir-Temperatur bei 200°C. Unsere Experimente wurden deshalb hauptsächlich bei 200°C gefahren. Pauwels et al. (1993) haben auf der Basis der experimentellen Daten und der gemessenen Tiefenfluiden generelle Überlegungen zur chemischen Entwicklung von Tiefenfluiden im Rheingraben angestellt. Aquilina et al.

(1997) haben in diese Überlegungen auch den Buntsandstein aufgenommen. Bartier et al. (2008) berichten detailliert über die mineralischen Reaktionsprodukte der Wasser-Gestein Wechselwirkung im Untergrund von Soultz. Dieser Beitrag ist sehr wichtig, weil experimentelle Reaktionsprodukte oftmals schwierig zu identifizieren sind.

2.1.4 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Unseres Wissens sind keine weiteren chemisch experimentellen Arbeiten zu den Aquifergesteinen und Tiefenwässern des Oberrheingrabens gemacht worden.

2.1.5 Planung und Ablauf des Vorhabens

Im beschriebenen Projekt wurden Experimente mit einem Hochdruckreaktor durchgeführt, mit welchen die Reaktionen von Gestein und Wasser simuliert werden können (Abb. 1). Die Experimente umfassten Reaktionen von Graniten und Einzelmineralen aus Graniten aus den Kristallingesteinen und anderen potentiellen geothermalen Reservoirgesteinen des Rheintals mit 1 bis 2 m NaCl Lösungen bei Temperaturen bis 350°C und Drucken bis 350 bar. Dabei war auch vorgesehen mit unterschiedlichen CO₂ Partialdrucken und REDOX Bedingungen zu arbeiten. Die Reaktionszeiten richteten sich nach den notwendigen Zeiten für die Erreichung stationärer Zustände. Der zeitliche Aufwand für ein Experiment bestimmte im Wesentlichen, wie viele Experimente mit unterschiedlichen Parametern insgesamt im Rahmen des Projekts gefahren werden konnten. Der Reaktor ist Ende April 2013 geliefert worden. Nach Aufbau der Einrichtung und einer Testphase wurden die ersten Experimente im Mai 2013 gefahren. Seither war der Reaktor ohne Unterbruch im Betrieb. Es konnten bisher etwa 20 Einzelexperimente mit Laufzeiten zwischen 50 und 810 Stunden gefahren werden (2 – 34 Tage). Wegen der hohen Laufzeiten von Silikatexperimenten war es nicht möglich, innerhalb der Projektzeit REDOX und CO₂ Experimente zu fahren. Das letzte Experiment mit Soultz-Granit in Salzlake wurde nach 800 Stunden Laufzeit am 10. März 2014 abgeschlossen. Die chemischen Analysen des produzierten Fluids liegen noch nicht vor.



Abb. 1: Autoklav (Reaktor) Limbo LI in Betrieb.

2.1.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Entscheidend wichtig ist die Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Stober vom KIT. Ihre neuesten Arbeiten haben eine Fülle von bisher unbekanntem Daten über die chemische Zusammensetzung der Tiefenfluide in allen geothermalen Aquiferen des Rheingrabens zu Tage gefördert. Die Daten werden derzeit in einer gemeinsamen Arbeit zusammengefasst und interpretiert. Diese Arbeit und die neuen Erkenntnisse erweitern das angestrebte Prognosetool für die Rheingraben Geothermiewässer wesentlich.

2.1.7 Erzielte Ergebnisse (Daten und Resultate)

Die erste Serie Experimente wurden mit Quarz und Wasser durchgeführt. Dieses System ist relativ gut bekannt und eignet sich deshalb für Startexperimente, um sich mit der Handhabung des Reaktors vertraut zu machen und Erfahrung mit der Kinetik der Quarz-Lösung zu sammeln. Die gewonnenen Daten zeigen eine gut reproduzierbare Abhängigkeit der Qtz-Löslichkeit von der Reaktionszeit und der Temperatur (Abb. 2).

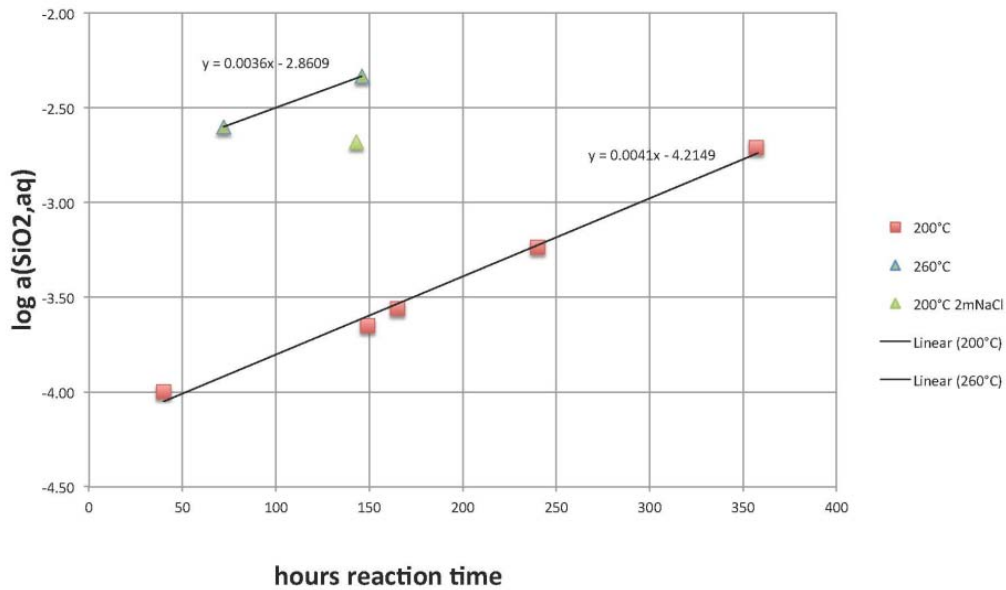


Abb. 2: Experimentelle SiO₂ Konzentrationen ($\log a \sim \log m$; y-Achse) bei der Reaktion von Quarz mit verschiedenen temperierten Fluiden (nach unterschiedlichen Reaktionszeiten (Stunden; x-Achse)).

Der Vergleich mit der z.Z. in der Literatur verwendeten Gleichgewicht-Qtz-Löslichkeit (rote Kurve Abb. 3) zeigt, dass bei 200°C etwa nach 350 Stunden Reaktionszeit Sättigung erreicht wird. Tiefenwässer des Rheintals haben eine Salinität von etwa 2m NaCl. In einem solchen Fluid wird die Qtz-Sättigung bereits nach 143 Stunden erreicht.

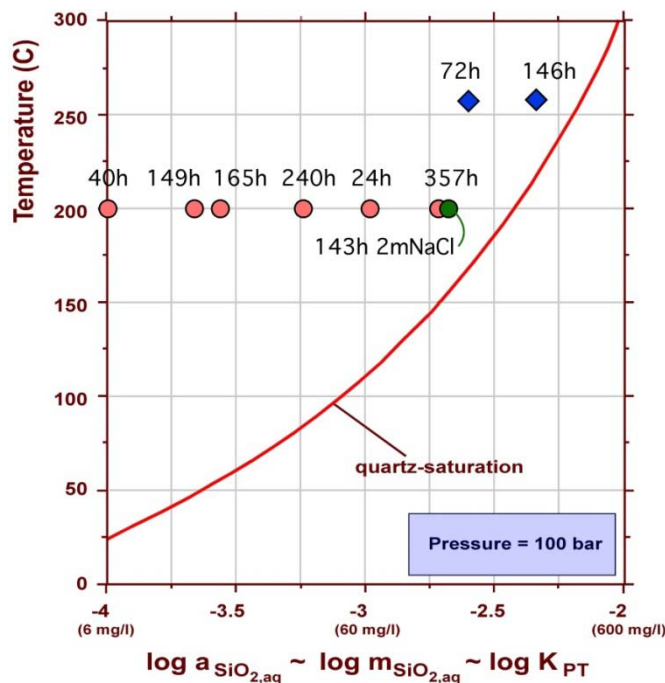


Abb. 3: Experimentelle SiO₂ Konzentrationen ($\log a \sim \log m$; x-Achse) bei der Reaktion von Quarz mit verschiedenen temperierten Fluiden (°C; y-Achse) nach unterschiedlichen Reaktionszeiten (Stunden). Rote Kurve: Gleichgewicht- Löslichkeit von Quarz (Walther & Helgeson 1977).

Die Experimente bei 200 und 260 °C ergaben eine Differenz zur Literaturkurve (Walther & Helgeson 1977). Die experimentellen SiO₂-Konzentrationen sind niedriger und die beiden Datenpunkte 146 und 294 Stunden zeigen, dass Gleichgewicht erreicht wurde. Dies bedeutet, dass die SiO₂ Konzentration mit der Temperatur möglicherweise weniger ansteigt als gedacht. Dies hätte zur Folge, dass die aus Standard-Geothermometern abgeleiteten Reservoir-Temperaturen zu niedrig wären. Dies hätte Konsequenzen nicht nur für Rheintal-Projekte. Diesem Problem werden wir weiter nachgehen. Drei Experimente mit Qtz-Löslichkeit in NaOH-Lösungen bei hohen pH-Werten sind nicht auf den Abbildungen eingetragen. Diese gestalteten sich schwierig und erfordern weitere Arbeit. In Rheintal-Nutzungshorizonten sind keine hoch-pH Fluide zu erwarten.

Plagioklas ist das häufigste Mineral in Kristallingesteinen der thermalen Fluidreservoirs des Rheintals. Deshalb haben wir eine Reihe von Plagioklas-Experimenten durchgeführt. Die Resultate waren überraschend und nicht so, wie wir das erwartet und vorhergesagt hatten (Bucher & Stober 2010). Die Experimente wurden mit Labradorit-Plagioklas durchgeführt (Abb. 4). Das Material wurde bei verschiedenen Temperaturen (meist jedoch 200°C) in reinem Wasser, in NaCl -Lösung und in HCl-Lösungen (unterschiedliche Säure-Konzentrationen) verschieden lang reagiert. In allen Experimenten zeigte sich, dass das Ca/Na Verhältnis in der Lösung bei langen Versuchszeiten sich dem Ca/Na Verhältnis des Plagioklas annähert. D.h. der Plagioklas löst sich stöchiometrisch und es wird keine neue Na-reiche (Ton) oder Ca-reiche (Zeolith) Festphase gebildet. Hier sind noch Experimente mit Kaolin-Keimen (oder anderen Keimen) notwendig. Die Interpretation der Resultate bezüglich der Konsequenzen für die Rheintal-Fluide sind noch nicht abgeschlossen. Jedoch ist es wohl so, dass der Anteil CaCl₂ an der Salinität wesentlich geringer sein wird, als bisher von uns prognostiziert (e.g. Bucher & Stober 2010).

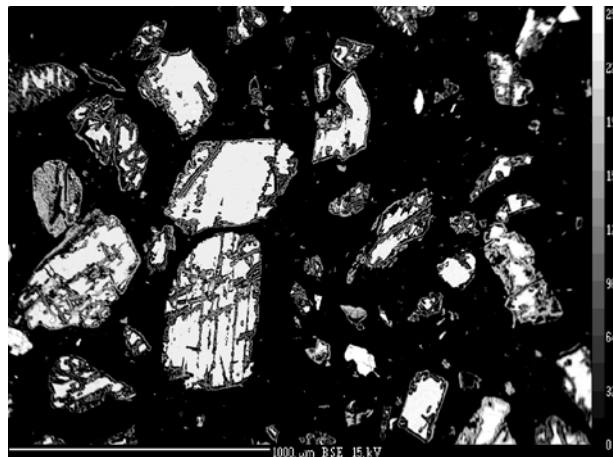


Abb. 4: Experimentelle Run-Produkte aus der Labradorit (Plagioklas) Reaktion (back scatteredelectron BSE Bild von der Elektronenstrahlmikroskopie). Weiss: Labradorit unverändert. Graue Strukturen in Rissen in und an den Rändern um die Labradorit-Körner: Ca-Na-freies Umwandlungsprodukte der Feldspatauflösung (Kaolinit, Gibbsit).

Experimente zur Olivin-Löslichkeit und zur Serpentinisierung sowie zu CO₂-Sequestrierungsreaktionen sind noch nicht abgeschlossen. Experimente zur Löslichkeit und Umwandlung von Anhydrit zeigten, dass die Reaktionskinetik so schnell ist, dass der Reaktor nicht schnell genug gekühlt werden kann um die Lösungszusammensetzung bei hoher Temperatur zu erhalten. Eine nachbestellte Zusatzeinrichtung zum Reaktor wurde zwischenzeitlich geliefert. Diese erlaubt in-situ Probenahme. Damit werden wir mit schnell löslichen Salzen mit reziprokem Lösungsverhalten messen können (Anhydrit, Cölestin, Baryt). Es zeigte sich auch bei diesen Arbeiten, dass die Datenlage in der Literatur nicht so gut ist, wie eigentlich erwartet.

Mitte Dezember wurde das erste Experiment mit Gesteinspulver aus Soultz-Granit mit Reinwasser angesetzt. Die Maschine wurde Mitte Januar geöffnet und neu beladen mit Soultz-Granit und 2m NaCl Lösung (alle Experimente bei 200 °C). Experimente mit Granit aus dem Untergrund des Rheintals mit Wasser ergaben sehr hohe Fluorid-Gehalte (6.33 mg/L). Dies ist ein wichtiges Ergebnis. Es zeigt, dass die gemessenen hohen Fluoridgehalte in Tiefenwässern aus dem Rheintal aus der Aquifermatrix stammen. XK=0.3 zeigt, dass Kalium/Natrium Verhältnis aus der Wasser-Gestein Reaktion sehr hoch ist. Ein Umstand welcher wegen der hohen NaCl-Salinität natürlicher Tiefenwässer aus dem Rheintal nicht erkennbar ist. Zudem ergeben sich aus dem Na/K Verhältnis Thermometrie-Temperaturen von 470°C (Can 2002). Diese deutet darauf hin, dass in den Experimenten das K/Na Verhältnis durch die relativen Reaktionsraten und nicht durch das Austauschgleichgewicht kontrolliert wird. Dies analog zu unseren Ergebnissen aus den Plagioklas-Experimenten.

2.1.8 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

Verschiedene Veröffentlichungen sind in Bearbeitung erfordern jedoch zum Abschluss noch weiterführende Experimente, resp. zusätzliche Daten.

2.1.9 Literatur

- Aquilina, L., Pauwels, H., Genter, A. & Fouillac, C., 1997. Water-rock interaction processes in the Triassic sandstone and the granitic basement of the Rhine Graben: Geochemical investigation of a geothermal reservoir. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61, 4281-4296.
- Bartier, D., Ledéser, B., Clauer, N., Meunier, A., Liewig, N., Morvan, G. & Addad, A., 2008. Hydrothermal alteration of the Soultz-sous-Forêts granite (Hot Fractured Rock geothermal exchanger) into a tosylite and illite assemblage. *European Journal of Mineralogy*, 20, 131-142.
- Bucher, K. and Stober, I. 2010. Fluids in the upper continental crust. *Geofluids*, 10, 241-253.
- Can, I., 2002. A new improved Na/K geothermometer by artificial neural networks. *Geothermics*, 31, 751-760.
- Frape, S. K., Blyth, A., Blomqvist, R., McNutt, R. H. & Gascoyne, M., 2004. Deep Fluids in the Continents: II. Crystalline Rocks. In: Surface and Ground Water, Weathering, and Soils (eds Drever, J. I., Holland, H. D. & Turekian, K. K.) *Treatise on Geochemistry*, pp. 541-580, Elsevier, Amsterdam.
- Moore, D. E., Morrow, C. A. & Byerlee, J. D., 1983. Chemical reactions accompanying fluid flow through granite held in a temperature gradient. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47, 445-453.
- Nicholson, K., 1993. *Geothermal Fluids: chemistry and exploration techniques*, pp. 263pp, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin.
- Pauwels, H., Fouillac, C. & Criaud, A., 1992. Water-rock interactions during experiments within the geothermal Hot Dry Rock borehole GPK1, Soultz-sous-Fôrest, Alsace, France. *Applied Geochemistry*, 7, 243-255.
- Pauwels, H., Fouillac, C. & Fouillac, A.-M., 1993. Chemistry and isotopes of deep geothermal saline fluids in the Upper Rhine Graben: Origin of compounds and water-rock interactions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57, 2737-2749.
- Walther, J. V. & Helgeson, H. C., 1977. Calculation of the thermodynamic properties of aqueous silica and the solubility of quartz and its polymorphs at high pressures and temperatures. *American Journal of Science*, 277, 1315-1351.

2.2 Konzeption und wissenschaftliche Begleitung des seismischen Monitoring für das Bohrvorhaben Pfullendorf (KIT, Prof. Kohl, Dr. Gaucher)

2.2.1 Motivation und Hintergründe des Vorhabens

Die Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das staatliche Hochbauamt Ulm hat für die Liegenschaft der Bundeswehr, Kaserne Pfullendorf, eine Nutzung von Erdwärme mit Tiefengeothermie vorgesehen und u.a. ein Sonderbetriebsplan Monitoring Seismizität vor und während der Bohr- und Testphase eingereicht. Der Antragsteller und das planende Unternehmen sind daran interessiert, ein Gesamtkonzept für ein wissenschaftliches Monitoring – auch für die Betriebsphase zu erarbeiten. Aufgrund der Projektstruktur mit einem staatlichen Projektträger ist eine enge Zusammenarbeit mit einer wissenschaftlichen Institution möglich. Diese Kooperation hat mehrere wissenschaftliche Fragestellungen, von der Minimierung seismische Gefährdung über die Optimierung einer Doublettenauslegung und der Reservoireigenschaften bis hin zu zukünftigen Fragestellungen in einem Gebiet mit ehemaliger Erdölförderung. Das geplante wissenschaftliche Begleitprogramm sollte mehrere Aspekte umfassen, wobei das seismische Monitoring eine besondere Rolle einnimmt.

2.2.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Im Projekt sollten Elemente des Vertical Seismic Profiling, der Ambient Seismic Noise Analyse (Rector et al., 1991, 1992), der Tomographie (Iyer, 1993; Polettto and Miranda, 2004, Shapiro 2005) und des SPWD (Seismic Prediction While Drilling (Jaksch et al. 2009,)) einfließen.

2.2.3 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Dem Zuwendungsempfänger sind keine ähnlichen Untersuchungen zum seismischen Monitoring in vergleichbaren Molasseregionen bekannt.

2.2.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Eine intensive Zusammenarbeit mit den verantwortlichen Stellen der Bundeswehr hat sich bereits bei den Maßnahmen für die Ausarbeitung des BMU-Antrags ergeben und hätte bei erfolgreicher Bewilligung ausgebaut werden können. Die Technische Koordination wäre durch das Geophysikalische Institut des KIT erfolgt, die Leitung des Projekts und die Auswertung beim Antragsteller. Das Deutsche GeoForschungszentrum Potsdam wäre für den Technischen Betrieb und das Processing der Daten verantwortlich gewesen und MinesParistech hätte den Bereich der Softwareentwicklung abgedeckt. Die Verantwortlichkeiten waren im Verlauf der Antragstellung geklärt worden.

2.2.5 Planung und Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

Um die Bundeswehrkaserne Generaloberst-von-Fritsch in Pfullendorf durch Geothermie mit Wärme zu versorgen sind zwei auf eine Tiefe von rund 1500m geplante Bohrungen im Oktober 2012 und März 2013 vorgesehen. In einem wissenschaftlichen Begleitprojekt sollte die Möglichkeit genutzt werden durch Instrumentierung des umliegenden Geländes, geophysikalische Erkundungsmethoden zu entwickeln, die die Schwingungen der Bohraktivitäten nutzt. Geplant war der Einsatz eines passiven Netzwerks aus 3K seismischen Stationen an der Oberfläche um die Bohrungen Pfullendorf GTB1 und GTB2. Ein weiteres Netzwerk, das aus einer seismischen Linie besteht, wird zwischen den beiden Bohrungen verlegt. In Verbindung mit Geophonen am Bohrturm und der Aufnahme des seismischen Hintergrundrauschens auch über den Bohrzeitraum hinaus, werden mehrere Geschwindigkeitsmodelle und Untergrundabbildungen erstellt. Zwei unterschiedliche Anwendungen sollen dabei zum Einsatz kommen. Einerseits, die "passive seismische Tomographie", in der Geschwindigkeitsmodelle aus seismischen Ersteinsätzen ermittelt werden und andererseits die "passive seismische Abbildung", in der aus den seismischen Zweiteinsätzen die Identifizierung der seismischen Reflektoren ermittelt werden. Die dadurch generierten 2D, 3D und 4D Geschwindigkeitsmodelle werden durch gegenseitigen Vergleich einer intensiven Qualitätskontrolle unterzogen. Dabei werden die Vor- und Nachteile der einzelnen Methoden analysiert und optimiert sowie der Erkenntnisgewinn durch die Zusammenführung der seismischen Eigenschaften erhöht. Das Netzwerk steht dem Betreiber zudem im Falle von seismischen Ereignissen zur Untersuchung der Herdquelle zur Verfügung.

Das Arbeitsprogramm umfasst 3 Komponenten: „Ambientnoisetomography“, „Drill bittomography“ und „Drill-bit VSP“. Jede Komponente sollte die Geschwindigkeitsmodelle des Hintergrunds auf demselben Gebiet abbilden. Dies bietet eine einzigartige Möglichkeit zur Entwicklung von Prozessierungsverfahren bei gleichzeitiger Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Das Verfahren der „Ambientnoisetomography“ ist im Gegensatz zu den anderen Komponenten nicht vom Bohrverlauf abhängig. Für die beiden anderen Komponenten bietet die vorgesehene Bohrtiefe von 1.5 km eine einmalige Gelegenheit, diese Methoden zu testen. In diesen geringen Tiefen sollte die Verwendung des schwachen Signals des Bohrmeißels erfolgreich sein. Für die „Ambientnoisetomography“ und die „Drill-bit Tomography“ sollte ein Netzwerk aus seismischen Sensoren benutzt werden. Für die „Drill-bit VSP“ wäre eine eigene Sensorlinie zwischen den beiden erwarteten Bohrungen ausgelegt worden. Während der Laufzeit des Projekts im Verbundantrag (Oktober-Dezember 2012) wurden folgende Arbeiten durchgeführt.

- Antragstellung für ein vom BMU gefördertes Projekt. Entwicklung einer Projektskizze.
- Beantragung von Geophonen und Registriereinrichtungen beim GFZ Instrumentenpool (GIPP)
- Erstellung eines Flyers, um die Bevölkerung auf das Projekt hinzuweisen und frühzeitig zu informieren (Enge Zusammenarbeit mit der Wehrbereichsverwaltung Süd)
- Kommunikation der Projektziele, des Zeitplans und der Milestones an:
 - Soldaten und Personal in der Kaserne Pfullendorf
 - Bürgermeister und Verwaltung von Pfullendorf
 - Hydro-data und Oberfinanzdirektion Karlsruhe, Bundesbau VW

Der letzte Punkt erforderte zahlreiche Treffen in Pfullendorf und am KIT. Der Antrag an das GIPP war erfolgreich, leider wird keine Finanzierung des Projekts durch das BMU erfolgen. Daher können die Arbeiten nicht weiter fortgeführt werden.

2.2.6 Nutzen und praktische Verwertbarkeit

Im Falle einer positiven Bewilligung hätten die Ergebnisse zeigen können, in wieweit die vorgeschlagene Methode bei Geothermie- aber auch allen anderen Bohrungen eingesetzt werden könnte. Die vorgeschlagene Methode beeinflusst die Bohraktivitäten nicht und stellte eine Möglichkeit dar, durch die passive Messung der Schwingungen während des Bohrfortschritts und zusätzlich des Hintergrundrauschens (passive seismic imaging) im Bereich der Grundlagenforschung eine Methode zu entwickeln, an Hand derer man aus dem Bohrvorgang selbst ein Geschwindigkeits-Tiefenmodell ermitteln kann (Tomographywhiledrilling (TWD)). Letzteres wird im Allgemeinen für seismisches Monitoring bei Reservoiren benötigt und üblicherweise durch eine meist teure VSP Messung geliefert.

2.2.7 Veröffentlichung der Ergebnisse

Da das Projekt keine weitere Förderung durch das BMU erfahren hat, wird es keine Veröffentlichungen geben.

2.2.8 Literatur:

Iyer, H. M. (1993), Seismic Tomography: Theory and Practice, Chapman & Hall, London.

Jaksch et al. 2009 : Projekt (S)PWD – (Seismic) PredictionWhile Drilling: Entwicklung eines Systems für die hochauflösende seismische Vorerkundung in Bohrungen, Beitrag “Der Geothermiekongress 2009” Bochum, Germany, 17-19 November 2009.

Jay, J., M. Pritchard, M. West, D. Christensen, M. Haney, E. Minaya, M. Sunagua, S. McNutt, and M. Zabala (2012), Shallow seismicity, triggered seismicity, and ambientnoisetomography at the long-dormant Uturuncu Volcano, Bolivia, Bulletin of Volcanology, 74(4), 817-837.

Poletto, F., and F. Miranda (2004), Seismic While Drilling - Fundamentals of Drill-Bit Seismic for Exploration, 586 pp., Elsevier, Amsterdam.

Rector III, J. W., and B. P. Marion (1991), The use of drill-bit energy as a downhole seismic source, Geophysics, 56(5), 628-634.

Rector III, J. W., and B. A. Hardage (1992), Radiation pattern and seismic waves generated by a working roller-cone drill bit, Geophysics, 57(10), 1319-1333.

Shapiro, N. M., M. Campillo, L. Stehly, and M. H. Ritzwoller (2005), High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise, Science, 307(5715), 1615-1618.

2.3 Quantitative Analyse der Vollständigkeit des instrumentellen Erdbebenkatalogs von Baden-Württemberg (Universität Stuttgart, Prof. Joswig)

Anmerkung: Der ursprüngliche Titel, welcher im Verbundantrag aufgelistet ist, wurde zugunsten dieses zutreffenderen Titels verworfen. Der ausführliche Bericht ist in Anlage 1 enthalten.

2.3.1 Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse;

Es wurde eine umfassende Analyse der Vollständigkeitsmagnitude für das Landesgebiet erstellt. Diese Schwelle der Detektionsvollständigkeit variiert im Tagesgang und ist zudem räumlichen Variationen unterworfen. Im Verlauf der letzten 4-5 Jahre wurde durch die Einrichtung von Online-Verbindungen der Stationen des Landeserdbebendienst eine deutliche Senkung der Vollständigkeitsmagnitude erzielt, wobei diese Änderung, über das Landesgebiet gesehen, unterschiedlich stark ausfällt.

2.3.2 Motivation und Hintergründe des Vorhabens;

Für seismische Ereignisse in der Nähe eines Geothermiekraftwerks gilt es zu unterscheiden, ob diese erst neuerdings auftreten, d.h. induziert wurden oder ob bisher an dieser Stelle nicht empfindlich genug gemessen wurde und vergleichbar große seismische Ereignisse in der Vergangenheit zwar auftraten, aber nicht erfasst wurden.

2.3.3 Aufgabenstellung;

Es sollten für jeden Punkt Baden-Württembergs möglichst akkurate Beschreibungen der lokalen Vollständigkeitsmagnitude angefertigt werden. Dies erfolgt pragmatischerweise in Form von Kartendarstellungen, aus denen sich die jeweiligen Zahlenwerte entnehmen lassen.

2.3.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde;

Es existieren bereits Arbeiten zur Vollständigkeitsmagnitude, jedoch nicht speziell für Baden-Württemberg. Methoden zum Beschreiben des Tagesgangs der Detektionsschwelle sind seit den 1980er Jahren nicht mehr weiterentwickelt worden. Methoden, um die räumliche Verteilung anhand von Katalogdaten exakt zu beschreiben, existieren seit rund 10 Jahren, basieren jedoch auf der Annahme, dass große Datenmengen zur Verfügung stehen, was für Baden-Württemberg nicht der Fall ist. Der Ansatz, über die Verteilung und Güte der Erdbebenmessstationen ein Bild der Detektionsschwellen zu erhalten, wurde erst in den vergangenen 5 Jahren ausgearbeitet. Wir verwenden eine eigene, angepasste Methode.

Grundsätzlich werden als Magnitudenangabe die sogenannten Lokalmagnituden (ML) verwendet, die für die in Baden-Württemberg auftretenden Erdbebenstärken den Werten auf der Richter-Skala entsprechen. Arbeiten zum Thema Vollständigkeitsmagnitude verschiedener Länder gibt es unter anderem von Sagar & Leonard (2007), Schorlemmer et al. (2010) und Mignan et al. (2010).

2.3.5 Planung und Ablauf des Vorhabens;

- a) Sichtung Literatur
- b) Festlegung der Methoden
- c) Datenakquirierung und Sichtung (Erdbebenkataloge)
- d) Programmierung von Software-Tools zur Datenverarbeitung
- e) Evaluierung erster Ergebnisse und Anpassung der Methoden
- f) Zweite Ausarbeitung

2.3.6 Datengrundlagen:

Als Datengrundlage dienen die Katalogbestände des Landeserdbebendienstes von Baden-Württemberg. Es werden die Katalogdaten von 1996 bis 2011 verwendet (2225 Einträge). Die Daten von 2012 waren zur Zeit der Projektbearbeitung noch in Revision und wurden nicht verwendet. Die Katalogdaten - Bulletins - liegen ab 1996 in digitaler Form vor (siehe Homepage des LED: <http://www.lgrb.uni-freiburg.de/lgrb/Fachbereiche/erdbebendienst/>), müssen aber zum Einsatz modifiziert und aufbereitet werden.

Von besonderer Bedeutung sind die Lokalisierungsfiles, in denen zusätzlich zur Herdinformation auch die an der Detektion beteiligten Stationen des LED angegeben werden. Aus dieser Information lassen sich stationsspezifische Kataloge für den Probabilistischen Ansatz extrahieren. Durch das Auslesen aller Protokolldaten konnten 304 stationsspezifische Kataloge zusammengestellt werden. Wichtig für die Bewertung der "Performance" der Stationen des LED und der grenznahen Stationen der assoziierten Messnetzbetreiber ist es, genaue Kenntnisse über die Betriebs- und Ausfallzeiten der Stationen zu besitzen.



Abb. 5: Übersicht über die Betriebszeiten der Stationen.

Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Feldmessungen führten zu keinem zielführenden Ergebnis im Sinne dieses Teilprojekts. Es werden jedoch vom Institut für Geophysik weitere Studien in dieser Richtung folgen (unabhängig vom LFZG und PTKA).

2.3.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen;

Wir bedanken uns sehr herzlich für die freundschaftlichen Hilfestellungen des Landeserdbebendienst Baden-Württemberg bei verschiedenen Fragestellungen u.a. zum Aufbau des Seismometernetzwerks.

2.3.8 Beitrag der Ergebnisse zu den Zielen des Förderprogramms des Zuwendungsgebers;

Tiefengeothermische Anlagen tragen bisher nur zu einem geringen Teil zur Energieversorgung Deutschlands bei. Während früher beispielsweise technische Probleme und die Bereitstellungsfrage von Nah- und Fernwärmenetzen als Hemmnisse

galten, bietet sich heute, nach den Vorfällen in Basel ein gänzlich anderes Bild der Lage. Die Sensibilität der Menschen vor Ort ist hinsichtlich der Vorhaben von Energieerzeugern (wie in Basel) gewachsen. Die Folgen der Stimulation des tieferen Untergrunds sind spürbar geworden. Die vorliegende Studie zeigt, inwiefern in einer Region mit einem künftigen oder bereits eingerichteten Geothermiekraftwerk schwache Erdbeben detektiert oder nicht-detektiert wurden. Diese Informationsweitergabe ist im Rahmen der Kommunikation mit der Bevölkerung bzw. den Anwohnern bei der Errichtung und dem Betrieb von Geothermischen Anlagen dringend geboten.

2.3.9 Erzielte Ergebnisse;

Vollständigkeitsmagnitude: Der LED gibt für das Landesgebiet einen Wert für M_c von rund 2.0 an. Dies ist eine vorsichtige Abschätzung für das Gesamtgebiet (Dr. Brüstle, pers. comm). In dieser Studie zeigen wir auf, dass es große regionale Unterschiede gibt. Zudem hat sich durch die verbesserte Vernetzung der Stationen seit dem Jahr 2010 eine erhebliche Steigerung der Empfindlichkeit ergeben. Es wurden drei verschiedene Methoden verwandt, um ein umfassendes Bild der Entwicklung der Vollständigkeitsmagnitude zu zeichnen. Es sind dies der Vergleich der Detektionszahlen bei Tag und Nacht, der Probabilistische Ansatz sowie der Katalogbezogene Ansatz. Alle drei Methoden sind in der Vergangenheit in verschiedenen Studien zur Bestimmung der Vollständigkeitsmagnitude M_c verwendet worden. Der Vergleich der erfassten Erdbeben bei Tag und Nacht beispielsweise von Rydelek & Sacks(1989), der Probabilistische Ansatz von Mignan & Woessner (2012) und der Katalogbezogene Ansatz von Woessner & Wiemer (2005).

2.3.9.1 Methode 1: Variationen von M_c beim Vergleich Tag-Nacht

In Tabelle 1 sind die Vollständigkeitsmagnituden für die 36 betrachteten Stationen angegeben. Die Festlegung der Werte erfolgte durch Begutachtung und Bewertung der Mittelwertkurven. Wenn die Kurven einen wie unter Punkt e) angegebenen Trend zeigten, wurde ab dort Vollständigkeit angenommen. Diese Vorgehensweise bot sich gegenüber einer mathematisch-statistischen Auswertung an, da eine erhebliche Variabilität zwischen den Stationen vorherrscht und das Kriterium der Steigungsänderung nicht immer gleich ausgeprägt ist.

Tabelle 1: Vollständigkeitsmagnituden für die drei betrachteten Zeiträume. Aufgrund der teilweise sehr kleinen Datenmenge ist eine Auswertung nicht immer möglich gewesen.

Station	M_c 1996-2005	M_c 2006-2011	M_c 2010-2011
ABH	2.3	1.4	-
BALS	-	-	-
BBS	2.9	-	-
BEU	2.7	-	-
BFO	-	2	1.1
BHB	-	-	-
BOUR	-	-	-
BUCH	-	2	-
ECH	2.3	2	1.1
END	2.1	0.9	-
FELD	2.3	1.9	0.9
GUT	2.3	2	1
HDH	-	-	-
KIZ	2.3	1.9	0.9
KTD	-	-	-
LANF	2.3	-	-
LBG	2.3	2	-
LIBD	2.9	-	-
LOMF	2.3	1.2	-
MOF	2.3	1.3	-
OPP	-	1	-
PEB	-	-	-
RUP	2.3	-	-
SIND	2.3	-	-
SISB	-	2	-
SLE	2.3	0.9	0.9
SPAK	2.5	-	-
SULZ	-	0.9	-
SWS	-	-	-
THEF	-	-	-
TNS	-	1.4	-
TOD	2.3	-	-
TUBL	-	-	-
UBR	2.5	-	-
WILA	-	-	-
WLS	-	-	-
Mittelwert	2.39	1.55	0.98
Std.-Abw.	0.21	0.45	0.09
Gesamter Katalog	2.3	2	1.4

2.3.9.2 Methode 2: Probabilistischer Ansatz

Der Probabilistische Ansatz beruht auf der Erfassung, Bewertung und Anwendung der Detektionsfähigkeit einzelner Stationen innerhalb eines Netzwerks (Schorlemmer & Woessner, 2008). Den Kern der Auswertung bildet somit nicht der raumbezogene (Gesamt-)Katalog, sondern ein eigens zu erstellender stationspezifischer Katalog - hergeleitet aus den Bulletins. Es sei darauf hingewiesen, dass eine Station durchaus ein Ereignis detektieren kann, diese jedoch zu keinerlei Lokalisierung führt, da zu wenig weitere Stationen das Ereignis abbilden oder die Qualität des Signals ungenügend ist. Die Lokalisierungsfähigkeit bildet also den Kern dieses Ansatzes. Der Probabilistische Ansatz bietet gegenüber dem katalogbezogenen Ansatz die Möglichkeit, in Gebieten mit geringer Zahl an Erdbeben und somit dünnen Datenbeständen eine Aussage über eine mögliche Vollständigkeitsmagnitude zu machen. Es ist daher möglich, das Landesgebiet Baden-Württembergs vollständig und zugleich mit großer Genauigkeit zu überdecken.

2.3.9.3 Methode 3: Katalogbezogener Ansatz

Der katalogbezogene Ansatz beruht auf der Auswertung der Katalogdaten hinsichtlich der Position und Stärke der einzelnen Beben. Eine Differenzierung nach Stationen wird nicht durchgeführt. In jedem beliebigen Flächenbereich lässt sich eine Menge $N \geq 0$ an Erdbeben aufzeichnen. Die Tiefenlage soll hierbei vernachlässigt werden. Es wurden, wie beim Probabilistischen Ansatz, zwei verschiedene Zeiträume (1996-2005 und 2006-2011) betrachtet. Die Probenzahl wurde auf ein Minimum von 100 festgelegt bzw. bei geringerer Probenzahl wurden 50 km als Betrachtungsradius gewählt (Abb. 6, 7).

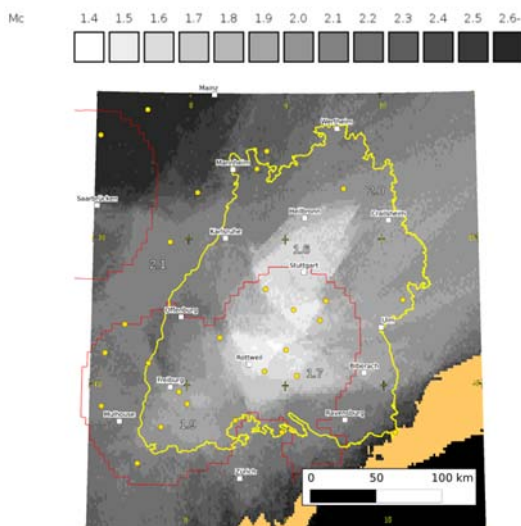


Abb. 6: Karte der Vollständigkeitsmagnitude für den Zeitraum 1996-2005 (Katalogbezogener Ansatz, Probenzahl 100). Die roten Konturen zeigen die Grenze der Genauigkeit von +/- 50 km.

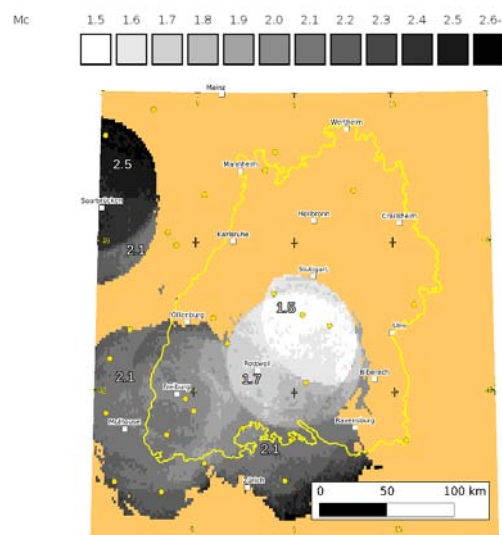


Abb. 7 Karte der Vollständigkeitsmagnitude für den Zeitraum 1996-2005 (Katalogbezogener Ansatz, Probennahme-Radius 50 km).

2.3.10 Nutzen, insbesondere praktische Verwertbarkeit der Ergebnisse und Erfahrungen; Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer auch in projektfremde Anwendungen und Branchen;

Die Ergebnisse der Feldmessungen implizieren weitergehende Studien, die einen bedeutenden Beitrag zum Kenntnisstand der Erdbeben-Verteilung und -Entwicklung auf der Schwäbischen Alb leisten könnten.

2.3.11 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse.

Die Ergebnisse der Feldmessungen von der Schwäbischen Alb werden auf der DGG-Jahrestagung 2014 im Rahmen eines Vortrags veröffentlicht.

2.4 Untersuchung der Schwell- und Quellfähigkeit sulfathaltiger Gesteine in Baden-Württemberg in Hinblick auf deren Erschließung (KIT, M. Grimm, Prof. Kohl, Jun.-Prof Blum)

2.4.1 Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse

Seit dem Bekanntwerden erster Schadensfälle im Zusammenhang mit Erdwärmesonden wächst in Baden-Württemberg die Verunsicherung in der Bevölkerung und die Zahl der jährlichen Neuinstallationen ist seit 2009 rückläufig. In dieser Studie konnten Ursachen und Auswirkungen anhand geologischer und hydrogeologischer Charakterisierung der entstandenen Schadensfälle zu konzeptionellen Schadensmodellen zusammengefasst werden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass in 90 % der Fälle lokale Grundwasservorkommen, mit auf- oder absteigenden Potentialen, beteiligt waren und die Ursachen in einer unvollständigen, undichten Hinterfüllung der Erdwärmesonde liegen. Des Weiteren liegt die Schadensursache in fast 70 % der Fälle im Bereich der Grenze zwischen Keuper und Muschelkalk. Eine erste Gefahreinschätzung hat ergeben, dass sich das Risiko eines Schadenfalls, mit Erreichen der Grenze zwischen Keuper und Muschelkalk um das 40-fache erhöht. Trotz mittlerweile über 30.000 funktionierenden Erdwärmesonden, allein in Baden-Württemberg, gilt es durch die weitere Verbesserung von Qualitätssicherungsstrategien das Risiko für zukünftige Schadensfälle zu minimieren.

2.4.2 Motivation und Hintergründe des Vorhabens

Ende der 1990er bis in das Jahr 2008 gab es einen starken jährlichen Anstieg neu installierter EWS-Anlagen (Abb. 8). Seit 2009 sind die Zahlen neu installierter Anlagen allerdings rückläufig. Grund hierfür sind zum einen auslaufende Förderprogramme und zum anderen wahrscheinlich auch die Verunsicherung der Bevölkerung durch das Bekanntwerden erster größerer Schadensfälle, sowie die in Folge immer aufwändigeren Genehmigungsverfahren und der damit auch steigenden Investitionskosten. Die Absatzzahlen für erdgekoppelte Wärmepumpen in der Bundesrepublik Deutschland zeigen ebenfalls einen rückläufigen Trend (Abb. 8).

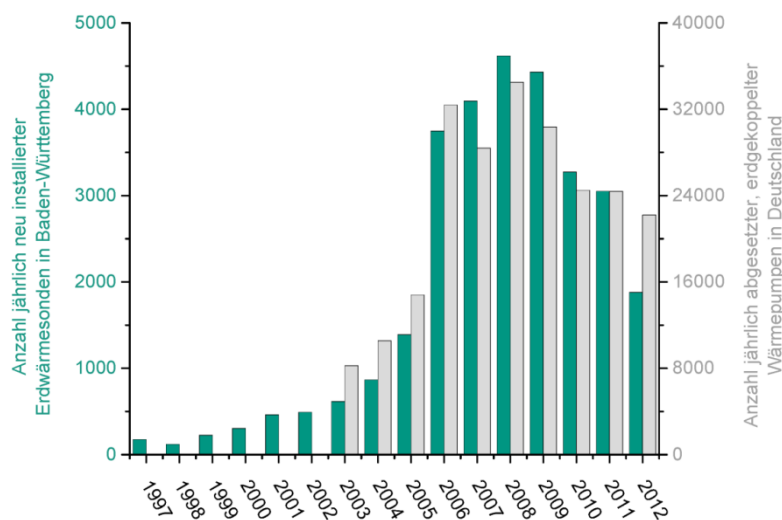


Abb. 8: Anzahl der jährlich neu installierten und offiziell dem Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) gemeldeten Erdwärmesonden (EWS) in Baden-Württemberg und die jährlichen, dem Bundesverband Wärmepumpe (BWP) gemeldeten, Absatzzahlen von erdgekoppelten, mit EWS betriebenen Wärmepumpen in Deutschland.

Trotz der unumstrittenen Vorteile von EWS-Anlagen, wie z. B. die Einsparung von CO₂ Emissionen (Bayer et al. 2012), die erneuerbare und nachhaltige Wärmegegewinnung (Hähnlein et al. 2013), die dezentrale Anwendungsmöglichkeit und der geringe Platzbedarf, birgt die Technologie gewisse Risiken (AD-HOC-AG Geologie 2011, Bonte et al. 2011, Butscher et al. 2011).

2.4.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Untersuchung der Schadensfälle, im Hinblick auf Erdwärmesondenbohrungen, baut auf den dem Umweltministerium Baden-Württemberg gemeldeten Auffälligkeiten bei Erdwärmesondenbohrungen in Baden-Württemberg auf. Für einige wenige Fälle wurden Erkenntnisse aus den Untersuchungen des Landesamtes für Geologie und Rohstoffe Baden-Württemberg bereits veröffentlicht. So z.B. die beiden Sachstandsberichte zum Schadensfall Staufen (LGRB 2010, 2012).

2.4.4 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der erste Schritt war die Definition von Schadensfällen im Zusammenhang mit Erdwärmesonden in Baden-Württemberg festzulegen. Schäden, nach den im Jahr 2011 eingeführten Leitlinien (LQS-EWS 2011), sind Gebäudeschäden, die durch Setzungen und Hebungen des Untergrundes verursacht wurden. Ebenso wird das dauerhafte Versiegen oder der dauerhafte Rückgang einer Quellschüttung, ein Kurzschluss mehrerer Grundwasserleiter, der zu einer Veränderung der physikalischen und chemischen Eigenschaften eines Grundwassers führt, und auch Beschädigungen von Kanälen oder das Verunreinigen von Oberflächengewässern als Schadensfall angesehen. Die Auswahl, der in dieser Arbeit zu analysierenden Schadensfälle basiert einerseits auf der Definition nach LQS-EWS und zum anderen auf deren Medienpräsenz und dem Ausmaß der entstandenen Schäden.

Um die Schadensfälle genauer untersuchen zu können, wurden Bohrdaten der Schadensbohrungen und von umliegenden Aufschlüssen beim LGRB angefordert und gesichtet. Des Weiteren wurden Gutachten, Anfragen bei den Landratsämtern und Presseberichte als Informationsquellen herangezogen (z.B. SO 2008, StZ 2011, 2013, SWR 2013). Die Klassifizierung der Schadensfälle erfolgte über die Zuteilung von Ursachen und Auswirkungen. Daraus können konzeptionelle Schadensmodelle entwickelt werden, die zu einem verbesserten Prozessverständnis der Ursachen und damit zu einer zukünftigen Vermeidung von Schadensfällen beitragen. In Abb. 9 sind die wichtigsten Ursachen und Auswirkungen aufgeführt, die im Zusammenhang mit EWS-Bohrungen in Baden-Württemberg aufgetreten sind oder für die ein grundsätzliches Schadenspotential besteht. Zusätzlich wurde eine erste Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit für einen Schadensfall in Baden-Württemberg (WSchaden) durchgeführt. Diese wurde wie folgt berechnet:

$$W_{\text{Schaden}} = \frac{S_{\text{Schaden}}}{S_{\text{Gesamt}}} \times \frac{1}{t} \quad (1)$$

mit der Anzahl der für Schäden ursächlichen Sonden S_{Schaden} , der Gesamtanzahl von Erdwärmesonden in Baden-Württemberg S_{Gesamt} und der betrachtete Zeitraum t in Jahren.

Um eine Übersicht über das Risiko von Erdwärmesondenbohrungen zu bekommen, wurde außerdem eine erste Abschätzung der Schadenshöhen der einzelnen Schadensfälle mit einem konservativen Ansatz durchgeführt, der sich am Schadensausmaß des Falls Staufen orientiert. Hierbei wird die häufig genannte Schadenssumme von 50 Millionen Euro durch die Anzahl der beschädigten Gebäude (z. Zt. 269 beschädigte Gebäude in Staufen) geteilt. Im Mittel ergibt das einen Schaden von etwa 185.000 Euro pro Gebäude. Über die Anzahl an beschädigten Gebäuden je Schadensfall (ungefähre Anzahl aus Presseberichten oder Anfragen bei den Landratsämtern) konnte dann eine erste Abschätzung der Schadenshöhe für jeden einzelnen Schadensfall erfolgen. Da bei den meisten Fällen nicht alle Gebäude gleich stark beschädigt wurden, spiegelt die angenommene Schadenshöhe von 185.000 Euro pro Gebäude, welcher eine strukturelle Beschädigung voraussetzt, eine konservative Betrachtung (worst case) wieder. Allerdings wird dies, durch eventuelle Schäden an der Infrastruktur, welche hier nicht einbezogen wurden, zum Teil wieder ausgeglichen. Da diese Betrachtung der Schadenshöhen einer gewissen Ungenauigkeit unterliegt, wurden die einzelnen Schadensfälle in folgende drei Schadensklassen unterteilt: < 1 Mio. Euro, 1-10 Mio. Euro und > 10 Mio. Euro.

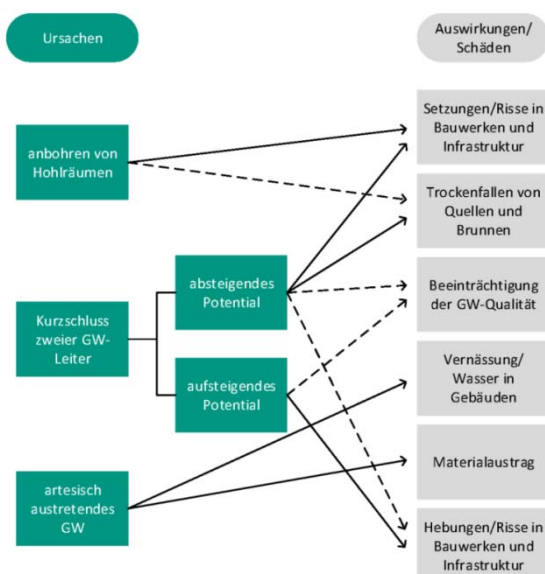


Abb. 9: Prozessdiagramm zur Einordnung von Ursachen und Auswirkungen der betrachteten Schadensfälle (durchgezogene Pfeillinien). Gestrichelte Pfeillinien zeigen mögliche Verbindungen zwischen Ursache und Auswirkung, die bei den vorliegenden Schadensfällen jedoch nicht beobachtet wurden.

2.4.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Von entscheidender Bedeutung war und ist die Zusammenarbeit mit Frau Eva De Haas vom Umweltministerium Baden-Württemberg, Herrn Dr. Christian Trapp vom Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) in Baden-Württemberg und natürlich den unteren Wasserbehörden der einzelnen Landkreise.

2.4.6 Erzielte Ergebnisse (Daten und Resultate)

In Tabelle 2 sind die untersuchten Schadensfälle, die in Baden-Württemberg im Zusammenhang mit Erdwärmesondenbohrungen aufgetreten sind, aufgelistet. Abb. 10 zeigt die räumliche Verteilung der einzelnen Schadensfälle.

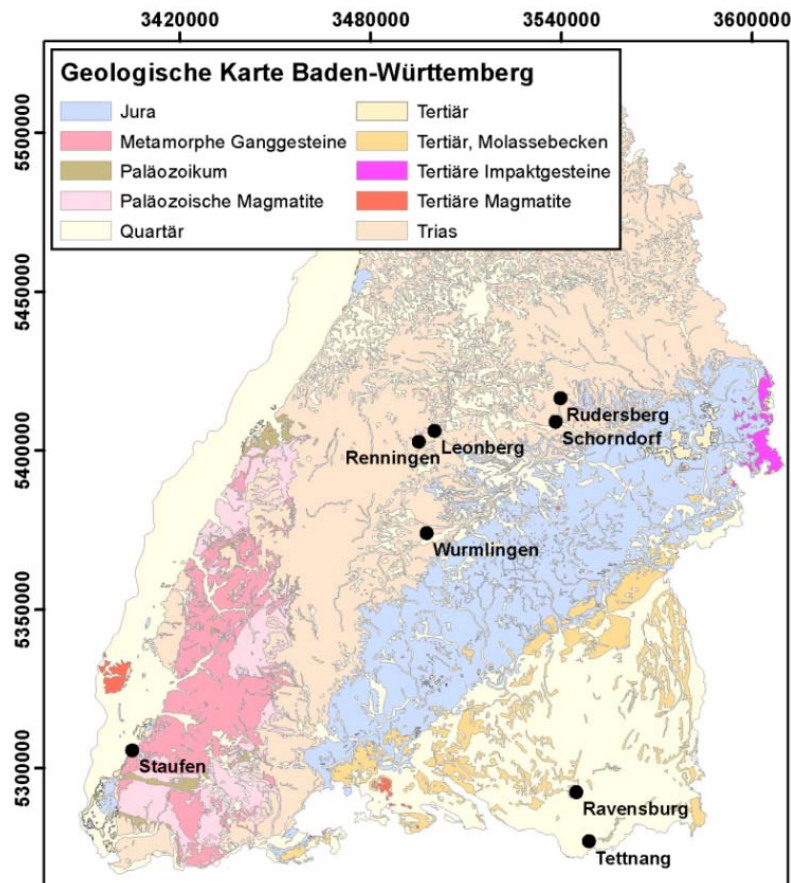


Abb. 10: Die im Zusammenhang mit Erdwärmesondenbohrungen aufgetretenen Schadensfälle in Baden-Württemberg. Im Hintergrund ist die geologische Übersichtskarte Baden-Württemberg dargestellt.

In allen 8 untersuchten Fällen wurde eine unvollständige, undichte Hinterfüllung der Erdwärmesonden festgestellt und es besteht ein direkter Zusammenhang mit dem Grundwasservorkommen am Standort. In 6 von 8 Fällen liegt die Schadensursache außerdem im Bereich der Grenze zwischen Keuper und Muschelkalk. Die untersuchten Fälle können daher nochmals wie folgt nach deren Ursache unterteilt werden:

- In 2 Fällen (Unterlangnau und Ravensburg) wurde artesisch gespanntes Grundwasser angebohrt, welches an der Oberfläche, meist mit hoher Materialfracht, unkontrolliert ausgetreten ist und dort zu Vernässung von Grundstücken und verschlammten Abwasserkanälen führte.
- In 3 Fällen wurde gespanntes Grundwasser im Oberen Muschelkalk angetroffen, welches in den Gipskeuper aufsteigen konnte und dort zu Anhydritquellungen (Staufen und Rudersberg) oder zu verstärkter Gipsauslaugung (Wurmlingen) führte.
- In weiteren 3 Fällen wurden zwei Grundwasserstockwerke mit absteigendem hydraulischem Potential durch Erdwärmesondenbohrungen kurzgeschlossen. Daraus resultierte eine Wasserspiegelabsenkung im oberen Grundwasserleiter, wodurch sich die effektive Auflast erhöhte und die entwässerten Schichten sich setzten. Bei relativ oberflächennahen Brunnen kann dies zur Austrocknung der Brunnen oder zum Versiegen von Quellen (Renningen, Schorndorf) führen. Durch die Subsidenz können an nahe gelegenen Gebäuden Schäden verursacht werden (Leonberg, Schorndorf).

Tabelle 2: Übersicht der untersuchten Schadensfälle, deren zugrunde liegender Schadensmechanismus und die betroffenen geologischen Einheiten.

Ort (Landkreis)	Erdwärm- sonden *	Jahr der Bohrung	Geologie	Ursache	Schäden	Geschätzte Schadenshöhe [Mio. Euro]
<u>Unterlangnau</u> (Bodenseekreis)	1	1997	Quartär	<u>Arteseraustritt</u>	<u>Vernässung</u> von fremdem Grundstück und angrenzendem Weg	< 1
<u>Wurmlingen</u> (Tübingen)	1	2002	Keuper/Muschelkalk	aufsteigendes Potential, Hohlraumbildung durch <u>Subrosion</u> des Gipskeupers	Straßen- und Gebäudeschäden durch <u>Subsidenz</u>	< 1
Ravensburg (Ravensburg)	1	2006	Quartär	<u>Arteseraustritt</u>	Versandung von Abwasserkanälen, Wasserschaden im Keller des Nachbarn	< 1
<u>Staufen</u> (Freiburg Land)	1	2007	Keuper/Muschelkalk	aufsteigendes Potential, <u>Anhydritquellen</u>	Straßen- und Gebäudeschäden durch Geländehebungen	> 10
<u>Rudersberg</u> (Rems-Murr-Kreis)	1	2007-2008	Keuper/Muschelkalk	aufsteigendes Potential, <u>Anhydritquellen</u>	Straßen- und Gebäudeschäden durch Geländehebungen	1 - 10
<u>Schorndorf</u> (Rems-Murr-Kreis)	2	2008	Keuper/Muschelkalk	GW-Kurzschluss, absteigendes Potential	Versiegen der <u>Rainbrunnenquelle</u> , Gebäudeschäden durch <u>Subsidenz</u>	1 - 10
Leonberg (Böblingen)	1	2011	Keuper/Muschelkalk	GW-Kurzschluss, absteigendes Potential	Gebäudeschäden durch <u>Subsidenz</u>	1 - 10
<u>Renningen</u> (Böblingen)	1	2011	Keuper/Muschelkalk	GW-Kurzschluss, absteigendes Potential	Versiegen mehrerer Brunnen	< 1

* Anzahl der an dem Schadensereignis beteiligten Erdwärmesonden

Bei der Vermischung von Grundwässern aus verschiedenen Schichten kann grundsätzlich zudem auch immer eine Beeinflussung der Wasserqualität durch Stoffaustausch stattfinden (Santi et al. 2006, Stober & Bucher 2012), allerdings wurde dieses in Baden-Württemberg nicht beobachtet bzw. nicht eingehend untersucht. Die Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonde Baden-Württemberg schreiben bei der Erwartung größerer Potentialdifferenzen und kritischem Stockwerksbau die Formulierung einer projektspezifischen Arbeitsanweisung vor, die in Problemfällen eine Hilfestellung geben soll (LQS EWS 2011). Im Allgemeinen muss geeignetes Gerät zur Abdichtung von Grundwasserzutritten und Artesern auf der Bohrstelle vorgehalten werden. Zum Schutz von Grundwasservorkommen gilt daher in allen Bundesländern das Verbot für Erdwärmesonden innerhalb der Wasserschutzzonen I und II. Die Zone III wird unterschiedlich gehandhabt (Hähnlein et al. 2011).

Die Problematiken, die in Zusammenhang mit sulfathaltigen Gesteinen entstehen können, sind in Baden-Württemberg durch den Tunnelbau schon lange bekannt (Nies 1868). Seit dem Fall Staufen im Jahr 2007 müssen diese nun auch im Bereich der Erdwärmesonden genauer betrachtet werden. Als eine Reaktion auf diesen Schadensfall hat das LGRB eine Auflagenempfehlung zum Vorgehen beim Abteufen von Erdwärmesondenbohrungen in sulfatführende Gesteine formuliert (LGRB 2009b), die in das Formblatt für einen „Auftrag für eine hydrogeologisch-geotechnische Beurteilung von Bohrvorhaben für Erdwärmesonden“ (LGRB 2009a) aufgenommen wurde. Die Bohrung sollte in jedem Fall schon bei Erreichen des Gipsspiegels abgebrochen werden, da die Unterscheidung von Gips und Anhydrit anhand des Bohrkleins nur mit der Hilfe von zusätzlichen Laboruntersuchungen möglich ist (Scheiber et al. 2011) und daher keine Vor-Ort-Bestimmung zulässt.

Ein weiterer Punkt, der bei der Untersuchung der Schadensfälle aufgefallen ist, ist die langsame Reaktion nach Bekanntwerden von Auffälligkeiten oder Schäden. Bevor Maßnahmen zur Sanierung oder Schadensfallminimierung eingeleitet wurden, war stets das erste Ziel, den Verursacher zu finden, um die Kosten für die anfallenden Sanierungsmaßnahmen zu sichern. Dass viele der aufgetretenen Schwierigkeiten aber technisch händelbar sind und somit also vermeidbar gewesen wären, zeigen vorhandene, technisch einwandfrei ausgeführte und funktionierende Erdwärmesondenanlagen in der näheren Umgebung der Schadensfälle. Laut LGRB wurden in Baden-Württemberg bisher über 30.000 Erdwärmesondenbohrungen abgeteuft. Bei etwa 820 Anlagen wurde die Grenze zwischen Keuper und Muschelkalk erreicht. Bei durchschnittlich 2,6 Sonden pro Anlage ergeben sich hieraus rund 2100 EWS-Bohrungen, in denen sulfatführende Gesteine angetroffen wurden. Eine im Zuge dieser Studie berechnete erste Abschätzung des Risikos von Erdwärmesondenbohrungen in Baden-Württemberg ergab eine Eintrittswahrscheinlichkeit für einen Schadensfall von unter 0,002 % pro Jahr. Im Vergleich dazu liegt die Wahrscheinlichkeit in Deutschland tödlich bei einem Verkehrsunfall zu verunglücken bei 0,007 % pro Jahr (berechnet aus Daten des StBA 2013) und die Wahrscheinlichkeit eines schweren Unfalls in einem Kernreaktor weltweit sogar bei 0,02 % pro Jahr (berechnet aus Daten

der IAEA 2013). Abb. 11 zeigt außerdem die Wahrscheinlichkeit mit der ein Schadensfall in Abhängigkeit von dessen Schadenshöhe und der anstehenden Geologie, eintritt. Wird bei einer EWS-Bohrung die Grenze zwischen Keuper und Muschelkalk erreicht, erhöht sich das Risiko eines Schadensfalls um ein Vielfaches gegenüber einer Bohrung, bei der diese Grenze nicht erreicht wird. Bei Schadenshöhen im Bereich von 1 - 10 Mio. Euro und > 10 Mio. Euro wurden bisher nur Schadensfälle bekannt, deren Ursachen im Bereich der Grenze zwischen Keuper und Muschelkalk liegen.

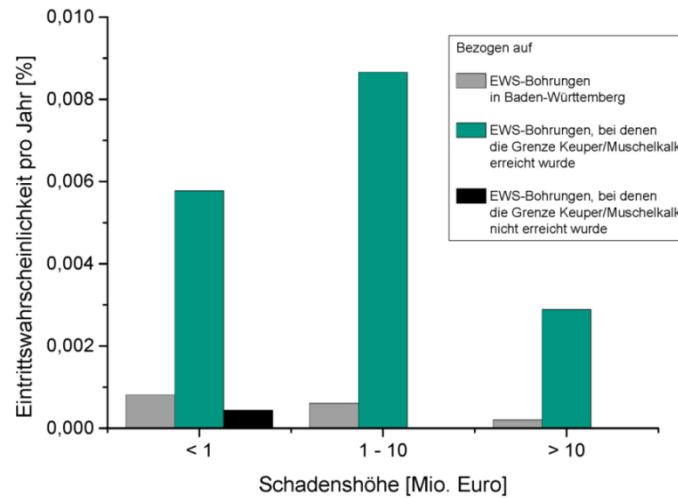


Abb. 11: Eintrittswahrscheinlichkeiten bestimmter Schadenshöhen in Abhängigkeit der geologischen Verhältnisse.

2.4.7 Nutzen, insbesondere praktische Verwertbarkeit der Ergebnisse und Erfahrungen

Die Ergebnisse der Untersuchung bereits entstandener Schadensfälle im Zusammenhang mit Erdwärmesonden können einen wichtigen Beitrag zur zukünftigen Vermeidung weiterer Schadensfälle leisten. Außerdem können wir die Bestrebungen des Umweltministeriums Baden-Württemberg die Qualitätssicherungsmaßnahmen bei der Erschließung sulfathaltiger Gesteine, dem Antreffen stockwerkstrennender Schichten oder im Bereich Hinterfüllung weiter auszubauen nur nachhaltig bestätigen.

2.4.8 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

Die Ergebnisse wurden in der Zeitschrift "Grundwasser" eingereicht (Grimm et al.).

2.4.9 Literatur

- AD-HOC-AG Geologie: Fachbericht zu bisher bekannten Auswirkungen geothermischer Vorhaben in den Bundesländern. Staatliche geologische Dienste Deutschlands, Wiesbaden (2011)
- Bayer, P., Saner, D., Bolay, S., Rybach, L. und Blum, P.: Greenhouse gas emission savings of ground source heat pump systems in Europe: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 1256-1267 (2012)
- Bonte, M., Stuyfzand, P. J., Hulsmann, A. und Van Beelen, P.: Underground thermal energy storage: Environmental risks and policy developments in the Netherlands and European Union. *Ecology and Society* 16, 22 (2011)
- Butscher, C., Huggenberger, P., Auckenthaler, A. und Bänninger, D.: Risikoorientierte Bewilligung von Erdwärmesonden. *Grundwasser* 16, 13-24 (2011)
- Hähnlein, S., Blum, P. und Bayer, P.: Oberflächennahe Geothermie – aktuelle rechtliche Situation in Deutschland. *Grundwasser* 16, 69-75 (2011)
- Hähnlein, S., Bayer, P., Ferguson, G. und Blum, P.: Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy. *Energy Policy* 59, 914-925 (2013)
- IAEA: Power Reactor Information System - World Statistics. International Atomic Energy Agency, Wien (2013) www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx
- LGRB: Auftrag für eine hydrogeologisch-geotechnische Beurteilung von Bohrvorhaben für Erdwärmesonden. Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, Freiburg im Breisgau (2009a)
- LGRB: Information zum Vorgehen beim Abteufen von Erdwärmesondenbohrungen in sulfatführende Gesteine. Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, Freiburg im Breisgau (2009b)
- LGRB: Geologische Untersuchungen von Baugrundhebungen im Bereich des Erdwärmesondenfeldes beim Rathaus in der historischen Altstadt von Staufen i. Br. Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, (2010)
- LGRB: Zweiter Sachstandsbericht zu den seit dem 01.03.2010 erfolgten Untersuchungen im Bereich des Erdwärmesondenfeldes beim Rathaus in der historischen Altstadt von Staufen i. Br. Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, (2012)

- LQS EWS: Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden (LQS EWS). Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Stuttgart (2011)
- Nies, F.: Beiträge zur Kenntnis des Keupers im Steigerwald. 79 S., Stuber Verlag, Würzburg (1868)
- Santi, P. M., McCray, J. E. und Martens, J. L.: Investigating cross-contamination of aquifers. Hydrogeology Journal 14, 51-68 (2006)
- Scheiber, J., Stosch, H. G., Schwotzer, M., Eckhardt, J. D., Kölbl, T. und Burkhardt, H.: Detektion von Anhydrit in Bohrklein - Vergleich verschiedener Analysekonzepte. Erprobung von Analysekonzepten. bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau 62, 18-27 (2011)
- SO: Nach Erdwärme-Bohrung: Eine Stadt zerreißt (15.11.2008). Spiegel Online, Hamburg (2008) www.spiegel.de/wissenschaft/natur/nach-erdwaerme-bohrung-eine-stadt-zerreisst-a-589944.html
- StBA: Polizeilich erfasste Unfälle. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden (2013) www.destatis.de/DE/-ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/TransportVerkehr/Verkehrsunfaelle/Tabellen/Strassenverkehrsunfaelle.html
- Stober, I. und Bucher, K.: Geothermie. 287 S., Springer, Heidelberg [u.a.] (2012)
- StZ: Erdwärme - Technik ist besser als ihr Ruf (16.08.2011). Stuttgarter Zeitung Online, Stuttgart (2011) www.stuttgarterzeitung.de/inhalt.energie-gewinnung-erdwaerme-technik-ist-besser-als-ihr-ruf.805372c0-dbe1-4382-abd5-f5952a5d8429.html
- StZ: Leben wie auf einem Pulverfass (30.07.2013). Stuttgarter Zeitung Online, Stuttgart (2013) www.stuttgarterzeitung.de/inhalt.minister-informiert-sich-ueber-schaeden-durch-erdwaermebohrungen-leben-wie-auf-einem-pulverfass.d0e4623b-667a-4db8-aacb-fa7b3a1bf472.html
- SWR: Rudersberger fühlen sich allein gelassen (10.07.2013). SWR Fernsehen, Stuttgart (2013) www.swr.de/zur-sache-baden-wuerttemberg/schaeden-erdwaerme//id=3477354/nid=3477354/did=11508692/1dq3bg/index.html

2.5 Basisdaten für tiefe Geothermievorhaben in Baden-Württemberg: Geothermale Fluide, tektonische Spannungen und Seismizität (Hochschule Offenburg, Prof. Doherr)

2.5.1 Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse

Im Internet sind verschiedene Datenquellen über Geothermiedaten aus Baden-Württemberg verfügbar, die unterschiedliche Aspekte der Geothermie auf unterschiedlichste Art und Weise präsentieren und diese Daten über eigene Benutzeroberflächen verfügbar machen. Durch die Zusammenführung der publizierten Daten in einem Portal ergibt sich eine übergreifende Übersicht zu Aufschlussdaten, Vertikalschnitten und geothermischen Standorten mit direkter Weiterleitung zu den entsprechenden Datenquellen. Darüber hinaus lassen sich Features von Google Maps wie z.B. eine Ortssuche und verschiedene Kartendarstellungen (Maps, Geländedaten, Satellitenbilder, Street View) nutzen.

2.5.2 Motivation und Hintergründe des Vorhabens

Die vielfältigen geowissenschaftlichen Daten geothermischer Projekte in Baden-Württemberg sind in unterschiedlichen Systemen und verschiedenen Formaten gespeichert, so dass keine übergreifenden Vernetzungen von einem System zu einem anderen Online-Archiv möglich sind. Um eine übergreifende Auswertung der im Internet verfügbaren Daten zu erreichen, müssen die Informationsquellen in einem Portal zusammengeführt und verfügbar gemacht werden. So muss eine Plattform eingerichtet und eine Konzeption zur Vernetzung der externen Datenquellen konzipiert werden, um die Strukturen in einem geeigneten Informationssystem bereitzustellen.

Wichtige Datenquellen, die im Portal erschlossen werden sollen, sind Daten aus der Aufschlussdatenbank des LGRB (Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau – Freiburg), des Geothermischen Informationssystems (GeotIS), des Forschungsprojektes GeOrg und weiterer Projektdaten über Planungen oder bereits im Bau befindlicher Systeme.

2.5.3 Portal der geothermischen Informationen als Pilotanwendung

Nach Sichtung der verfügbaren Datenquellen und der bestehenden Datenstrukturen wurde die Konzeption des Informationssystems zum Thema „Tiefe Geothermievorhaben in Baden-Württemberg“ durchgeführt. Anhand dieser Untersuchungen wurde ein vorläufiges Datenmodell für eigene Basisdaten und Fremddaten entwickelt und auf einer eigens dafür eingerichteten Web-Plattform auf einem LINUX- Server der Hochschule Offenburg implementiert.

Dieser Server entspricht den Sicherheitsanforderungen der Hochschule Offenburg und ist über die Internet-Adresse: „<http://geo.hs-offenburg.de>“ zu erreichen (Siehe Abb. 12).



Abb. 12: Portal der Forschungsdatenbank „FPTGeo“ auf einem Server der Hochschule Offenburg

Der Server nutzt als Content-Management-System der Webseiten und deren Inhalte das Programm WordPress [1], welches mit einem eigenen Layout für die Forschungsdatenbank FPTGeo aktiviert wurde. Als Datenbanksystem wird das MySQL[2] genutzt, um die Projektdaten zu speichern und bei Anfragen zur Verfügung zu stellen.

Die kartenbezogenen Dienste werden über das Google Maps bereitgestellt, indem die auf JavaScript basierende Programmierschnittstelle des Google Maps (API)[3] zur Entwicklung genutzt wird. Damit werden die Projektdaten der verschiedenen internen und externen Quellen zu einer Kartenanwendung zusammengefasst, die über die Webseite der Forschungsdatenbank zur Verfügung gestellt wird.

Ergänzt wird das Portal durch eine fachspezifische Literatursammlung zu Themen rund um die Geothermie, die sich aus verschiedenen externen Projektbeschreibungen und Ausarbeitungen speist (Siehe Abb. 13).

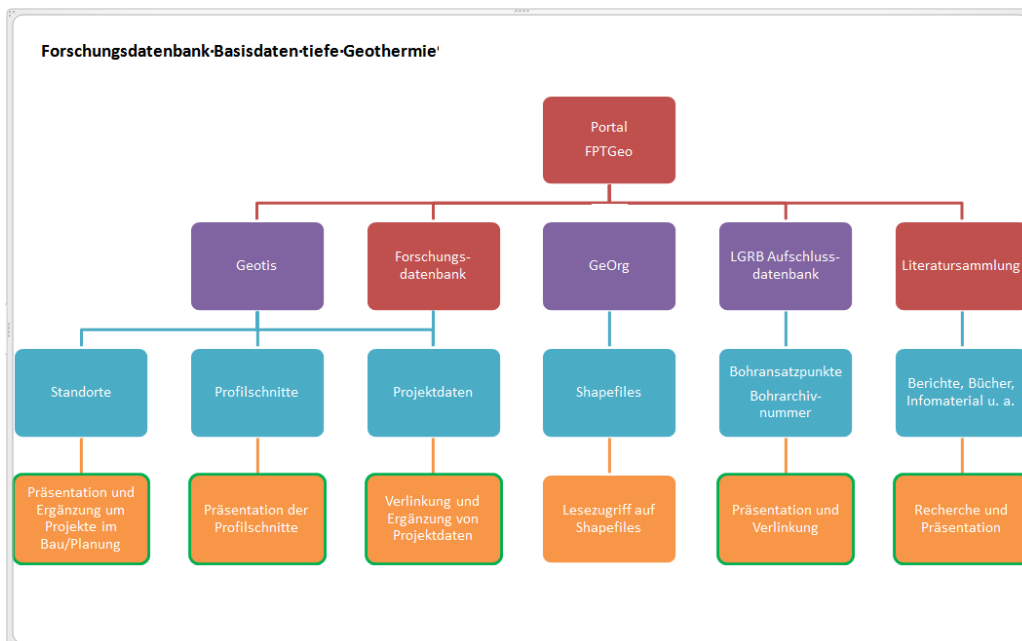


Abb. 13: Schema der zusammengeführten und im Portal bereitgestellten Daten mit den Datenquellen, den Themen und technischen Hinweisen zu den Datenzugriffen

Keine der untersuchten Datenquellen verfügt über eine Schnittstelle zum lesenden Direktzugriff auf die externen Datenbestände, so dass im Portal nur wenige Direktzugriffe programmiert werden konnten. Die meisten Datenvernetzungen

wurden über Hyperlinks auf die präsentierten Daten erreicht, die auf den internen Datenstrukturen aufbauen und gemäß der Anforderungen der Fremddatenarchive zusammengestellt wurden. Die im Portal realisierten Zugriffsmöglichkeiten sind in der Abb. 2, in der untersten Ebene mit grünen Umrandungen gekennzeichnet. Besonders für die Daten des Forschungsprojektes GeOrg konnte keine Einbindung außer einer manuellen Datenübernahme programmiert werden, auch wenn sich ein Zugriff auf die Shapefiles des GeOrg als Ergänzung der Kartenanwendung anbieten würde.

Das Bohrchiv des LGRB konnte nur insofern eingegliedert werden, als die Daten in Form von ausgewerteten Formblättern im Internet und damit auch über das Portal verfügbar sind. Ein Lesezugriff auf die Einzeldaten, obwohl technisch jederzeit möglich, konnte nicht realisiert werden, da kein Zugriff auf die digitalen Daten des LGRB eingeräumt wurde.

2.5.4 Erzielte Ergebnisse

Über die Forschungsdatenbank erreicht man den Zugriff auf die auf Google Maps basierende Kartendarstellung für Baden-Württemberg, die entsprechend der angebotenen Funktionsknöpfe mit Geothermiedaten gefüllt werden kann (Siehe Abb. 14). Je nach geöffneter Thematik wird die unter den Schaltknöpfen präsentierte Legende auf den jeweiligen Karteninhalt angepasst.

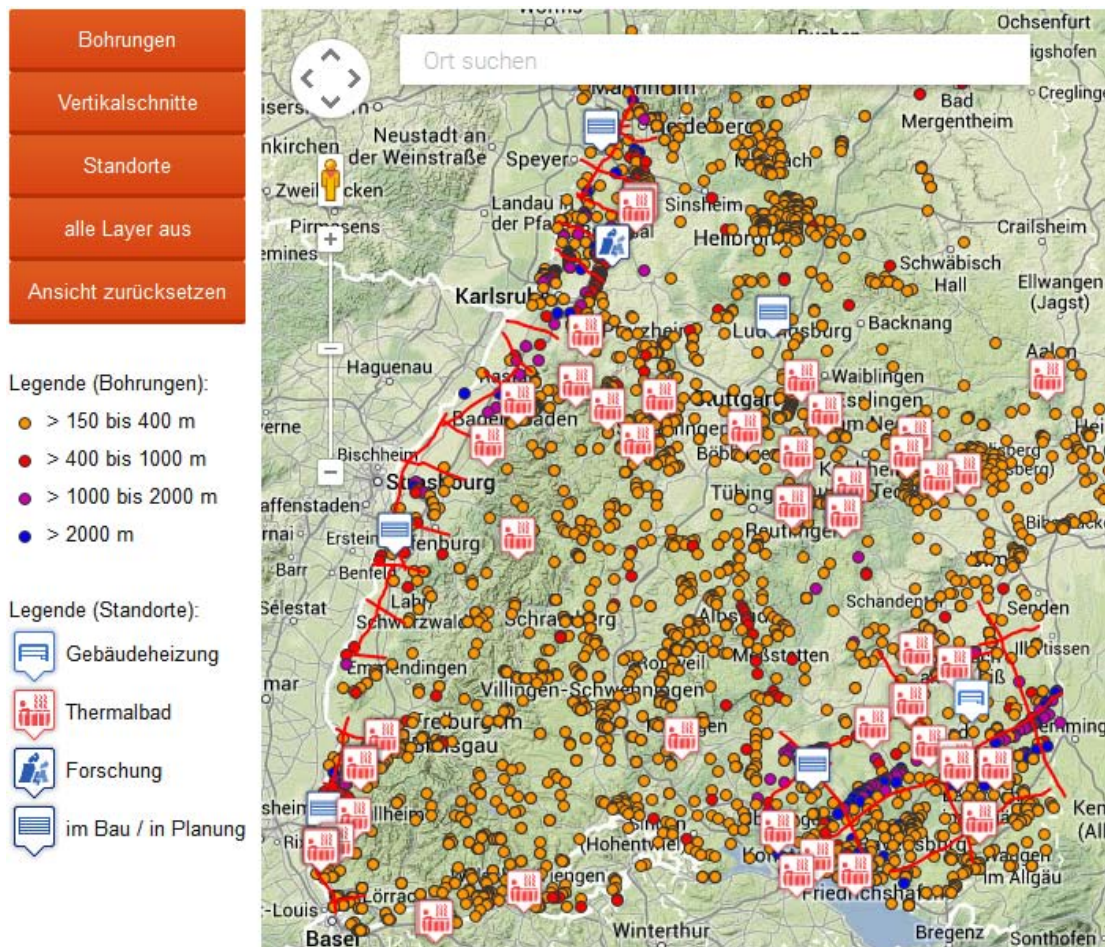


Abb. 14.: Google Maps- Anwendung der Forschungsdatenbank FPTGeo mit Daten aus verschiedenen externen Datenquellen über Bohrungen und Standorten in Baden-Württemberg, die zu einer Gesamtübersicht zusammengefasst wurden.

Die auf Google Maps basierende Karte kann interaktiv bedient, d.h. vergrößert und auf beliebige Bereiche fokussiert werden. Je weiter in die Karte hineingezoomt wird, desto mehr Details auch der Bohrungen und Lokationen werden erkennbar (Siehe Abb. 15). Wird eine der angebotenen Markierungen angeklickt, so öffnet sich ein Fenster mit weiteren Details zum jeweiligen Standort. Diese Daten entstammen der Portaleigenen Datenbank. Das Fenster enthält aber auch einen Link, mit dem der Anwender auf die externe Datenquelle zugreifen und sich über weitere Details z.B. aus der Aufschlusssdatenbank des LGRB informieren kann.

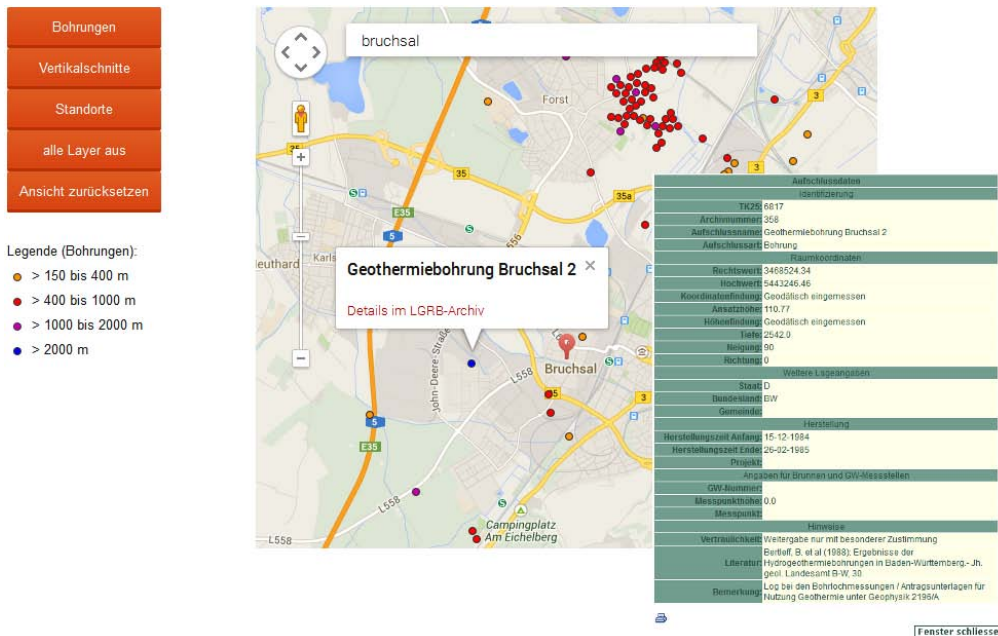


Abb. 15: Je nach Standort der Bohrung kann eine Detailinformation im Portal und darin eine automatische Verlinkung auf die Aufschlusdaten des LGRB aktiviert werden.

Weitere Anwendungsmöglichkeiten ergeben sich aus der interaktiven Verlinkung der Google Karte mit zweidimensionalen geologischen Tiefenschnitten, deren geografische Lage aus Layerdaten des Projektes GeoTool extrahiert und ergänzt mit Links zu aufbereiteten Profilschnitten aus GeotIS präsentiert wird. Die Daten können mit einem Mausklick angesehen oder heruntergeladen werden (Abb. 16).

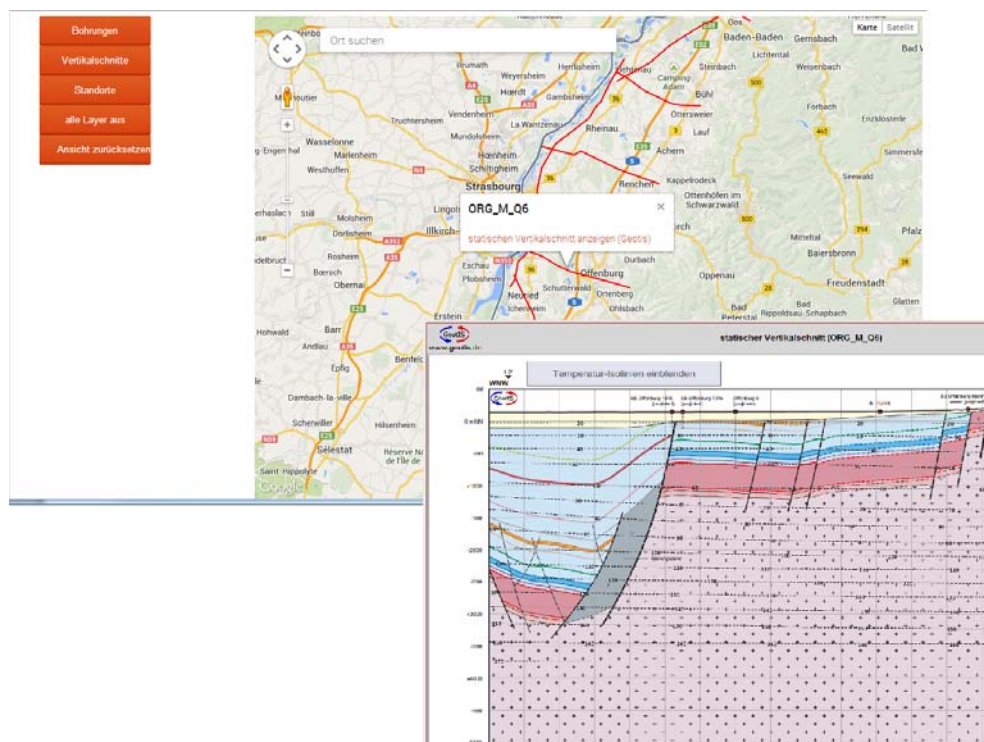


Abb. 16: Im GeotIS sind verschiedene Profilschnitte hinterlegt, die im Portal ebenfalls angezeigt werden. Diese stellen die Lage dieser Schnitte auf der Google Maps –Karte dar und sind aktiviert, d.h. sie können angeklickt werden und verweisen dann auf die im GeotIS hinterlegte Darstellung.

Ein besonderes Merkmal der Karte im Portal ist die Aktivierung der Google-Funktionen, die Suchen nach Orten oder Lokationen aber auch den Google- Dienst Street View zulassen, wie in Abb. 17 gezeigt. Diese Funktionen können für die Erkundung von ortsbezogenen Informationen direkt aus dem Portalfenster heraus verwendet werden.

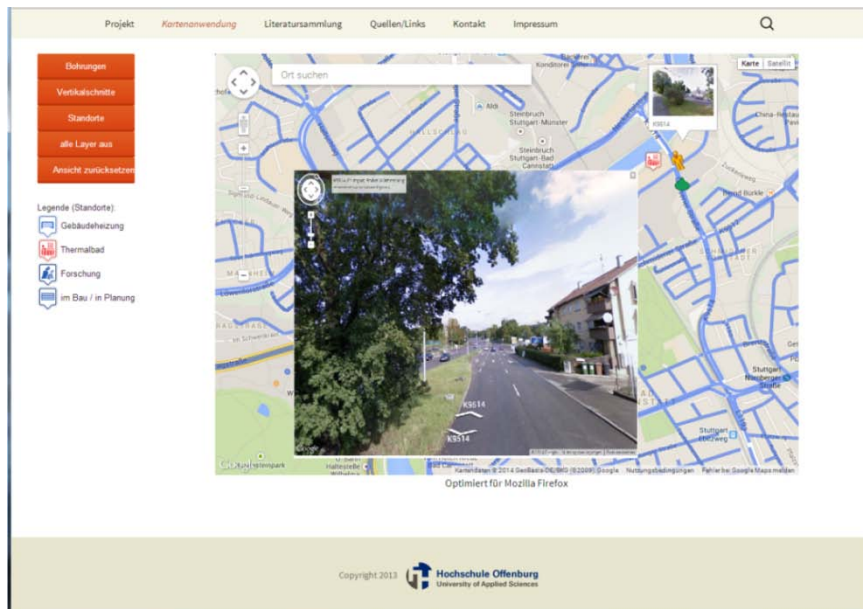


Abb. 17: Kartendarstellung der einzelnen Geothermie- Standorte in Stuttgart mit Verknüpfung zum Street-View des Google als interaktive Karte des Portals

2.5.5 Nutzen und praktische Verwertbarkeit

Im Rahmen des Pilotprojektes wurde gezeigt, dass die im Internet verfügbaren Datenquellen in vernetzter Form zusammengeführt und zu einer vernetzten Nutzung in einem Portal bereitgestellt werden können. Leider bestehen noch immer Hindernisse bei der Einrichtung von Lesezugriffen auf Datenbestände, wie sie gerade in der Frage der Zugänglichkeit von Bohrchiven oder Kartenmaterial nützlich wären. Datensätze der LGRB-Aufschlussdatenbank ließen sich vollständig nutzen, da halbautomatisch nicht alle Inhalte extrahiert werden können. Zusätzlich würden Änderungen und Aktualisierungen automatisch in die Forschungsdatenbank übernommen werden. Ähnlich verhält es sich mit den Datensätzen aus GeotIS. Hier bestünde ebenfalls die Möglichkeit einer automatischen Datensynchronisation und die Weiterverarbeitung der Inhalte. Dieses würde der Nutzbarkeit des Portals einen enormen Schub erweisen, da dann nicht nur vorgefertigte Formulare und Datenblätter präsentabel wären, sondern thematisch und ortsbezogen übergreifende Datenanalysen und –auswertungen erreichbar wären, die in dieser Form zurzeit nur in manueller Arbeit erstellbar sind.

Das Pilotprojekt der Forschungsdatenbank kann jederzeit durch weitere externe Quellen erweitert und ergänzt werden, wenn z.B. die Landes- Bohrdatenarchive für einen Internetzugriff geöffnet werden, bzw. aufbereitete Bohrdaten verfügbar gemacht werden.

2.5.6 Veröffentlichungen des Ergebnisses

Das Resultat der Forschungstätigkeit ist in Form eine Webseite allgemein zugänglich. Die eingesetzten technischen Methoden zur Realisierung der Datenvernetzung wurden beim Statuskolloquium 2014 in Karlsruhe präsentiert. Eine weitere Publikation ist im Rahmen der nächsten GeoTHERM, Messe und Kongress 2015 in Offenburg geplant.

2.5.7 Internet- Datenquellen

[1] <http://wpde.org/>

[2] <http://www.mysql.de/>

[3] <https://developers.google.com/maps>

2.6 Energetisch und exergetisch verbesserte Nutzung von Wärme aus tiefer Geothermie in Baden-Württemberg (Hochschule Biberach, Prof. Dr.-Ing. Roland Koenigsdorff)

2.6.1 Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse

Bei der Nutzung tiefer Geothermie sind grundsätzlich Stromerzeugung und Wärmenutzung gegeneinander abzuwägen bzw. aufeinander abzustimmen, um eine optimale energetische und exergetische Ausnutzung zu erreichen. In Fällen mit entsprechenden Randbedingungen, hoher Wärmenutzungstemperatur (nahe der Thermalwassertemperatur) sowie langer jährlicher Wärmenutzungsdauer kann die reine Wärmenutzung ohne Stromerzeugung einer Stromerzeugung oder auch gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung vorzuziehen sein.

Die im Betrieb befindlichen Geothermieanlagen weisen heute noch hohe Eigenenergieverbräuche auf. Diese zu senken sollte ein vorrangiges Ziel künftiger Planungen, Betriebsstrategien sowie von Forschung und Entwicklung sein. Auch zur Optimierung des Kraftwerksprozesses selbst steht eine ganze Reihe von Maßnahmen zur Verfügung. Sowohl auf Komponenten- als auch auf System- und Planungsebene ist noch ein signifikantes Entwicklungspotenzial vorhanden. In besonderen Situationen, wie z. B. der Überbrückung der Bauzeit eines Wärmenetzes oder bei Vorliegen geeigneter einzelner Verbraucher abseits des Wärmenetzes, kann der Wärmetransport mit „mobiler Wärme“, d. h. mittels auf LKW oder Schienen transportierten Latentwärmespeichern, eine interessante Option sein, deren Wirtschaftlichkeit allerdings im Einzelfall zu prüfen ist.

In Verbindung mit Nutzungskonzepten für Niedertemperatur- & Kaltnetze (LowEx-Netze für Niedertemperaturanwendung bzw. als Wärmequelle für verbraucherseitige Wärmepumpen) lässt sich die exergetische Ausnutzung der Wärme aus tiefer Geothermie über konventionelle Lösungen hinaus maximieren. Bei geothermischen Kraftwerken sollte hierbei insbesondere die Wärmeauskoppelung und ggf. Wärmespeicherung aus dem Rückkühlprozess in Erwägung gezogen werden, wodurch sich in bestimmten Betriebssituationen auch der Wirkungsgrad des Stromerzeugungsprozesses noch etwas verbessern lässt. Die verstärkte Auskühlung des Thermalwassers für LowEx-Netze und LowEx-Anwendungen kann grundsätzlich auch aktiv erfolgen, indem das Thermalwasser als Wärmequelle für Wärmepumpen herangezogen wird.

Zur sekundären Stromerzeugung über Niedertemperatur-Wärme kraftprozesse stehen momentan noch keine Technologien im relevanten Leistungs- und Temperaturbereich marktreif zur Verfügung, sind aber aktuell Gegenstand der Forschung. Hier könnten zukünftig insbesondere die Thermoelektrik, Thermotunnelung und neuartige Stirling-Motoren vielversprechend sein.

2.6.2 Motivation und Hintergründe des Vorhabens

Tiefe geothermische Energie liegt zunächst als Wärme auf einem mittelhohen Temperaturniveau von i. d. R. weniger als 200 °C vor. Hiermit lässt sich Strom erzeugen, allerdings, thermodynamisch bedingt, nur mit einem begrenzten Wirkungsgrad, sodass ein großer Teil der gewonnenen geothermischen Wärme nicht zur Stromerzeugung genutzt werden kann und in Form von Abwärme der Umgebung bei möglichst niedrigem Temperaturniveau zugeführt wird. Weiterhin wird bei geothermischen Kraft- und/oder Heizwerken das Thermalwasser häufig mit einer Temperatur zwischen 50 und 80 °C in das Erdreich reinjiziert, sodass ein hoher Anteil der im Thermalwasser enthaltenen thermischen Energie und Exergie ungenutzt bleibt. Ziel muss es jedoch sein, ein Maximum an Energie aus dem Thermalwasser zu entziehen und möglichst effizient zu nutzen. Neben einer Verbesserung der Wirtschaftlichkeit würden dadurch sowohl die Primärenergieeinsparung erhöht als auch die Risiken durch die geothermischen Anlagen vermindert, weil deren Anzahl bezogen auf eine bestimmte gelieferte Energiemenge minimiert wird.

Die nächstliegende und häufig praktizierte Nutzung der im Thermalwasser nach Abkühlung zum Antrieb des Kraftwerksprozesses verbliebenen Wärme ist die Einspeisung in Nah- oder Fernwärmenetze. Dies ist jedoch nur dann wirtschaftlich machbar, wenn eine genügend hohe Wärmeabnahme bei hinreichender Dichte, d. h. nahe genug am Standort der geothermischen Anlage, möglich ist. Weiterhin ist die nutzbare Wärmemenge durch das Temperaturniveau auf der Verbraucherseite begrenzt (erforderliche Mindest-Rücklauftemperatur). Sind diese Voraussetzungen einer Nutzung der geothermischen Wärme nicht oder nur eingeschränkt gegeben, könnten alternative Wärmenutzungskonzepte und/oder die Nutzung von Wärme auf einem tieferen Temperaturniveau als üblich zum Tragen kommen. Der letztgenannte Punkt kann auch an günstigen Abnehmerstandorten die Ausnutzung der Wärme verbessern und damit Effizienz und Wirtschaftlichkeit geothermischer Anlagen erhöhen.

2.6.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

2.6.3.1 Stand der Technik:

- Thermalwasser wird mit Temperaturen im Bereich zwischen ca. 50 und 80 °C wieder ins Erdreich verpresst. Falls Fernwärmenutzung vorliegt, betragen die Rücklauftemperaturen des Heiznetzes i. d. R. mindestens 55 °C, weil keine oder nur wenige Niedertemperaturverbraucher im Netz eingebunden sind.
- Für eine mobile Wärmenutzung mit Latentwärmespeichern (Phasenwechselmaterialien) sind seit einigen Jahren erste Produkte in Form von Container-Lösungen, die mit LKWs transportiert werden können, am Markt. Eine Wirtschaftlichkeit ist allerdings bislang nur in Sonderfällen gegeben.
- Auf dem Markt vertretene Wärmepumpen arbeiten bei Quellentemperaturen bis maximal ca. 20 °C. Quellenseitig werden im Regelfall Systeme eingesetzt (erdgekoppelte Wärmepumpen), die Quellentemperaturen im Bereich von ca. 5 °C gewährleisten.

2.6.3.2 Stand der Wissenschaft:

- Temperaturkaskaden zur effizienten LowEx-Wärmenutzung sind bekannt, werden jedoch in Verbindung mit tiefen Geothermieanlagen nach eigenen Recherchen noch nicht eingesetzt.
- Kalte Nahwärmenetze (Quellennetze für Wärmepumpennutzung) sind momentan in der Pilotphase. Es gibt erste Projekte in diesem Sektor.
- Phasenwechselmaterialien (Latentwärmespeicher) mit Schmelzpunkten auf allen möglichen Temperaturniveaus können heute hergestellt werden.
- Hochtemperaturwärmepumpen für Quellentemperaturen bis zu 60 °C sind in Form von projektspezifischen Einzelanfertigungen im Bereich von Forschungs- und Pilotprojekten bereits im Einsatz und erste Produkte verfügbar (Übergang zu Wissenschaft & Markt).
- Sekundäre Niedertemperatur-Stromerzeugungsprozesse sind Gegenstand aktueller Forschungen und stehen insbesondere im Hinblick auf größere Leistungen und niedrige Antriebstemperaturen noch am Anfang der Entwicklung.

2.6.4 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Im Zuge der Recherchen wurden FuE-Vorhaben bekannt, die sich mit verbesserten geothermischen Kraftwerksprozessen bzw. der effizienteren obertätigen Wärmenutzung sowie der Reduzierung des Eigenverbrauchs der Anlagen befassen (siehe Abschnitt „Zusammenarbeit mit anderen Stellen“). Die Zielrichtungen dieser Vorhaben und die darin bislang gewonnenen Erkenntnisse fließen in die vorliegende Studie ein. Eine vergleichbare Systemstudie wie hier bearbeitet wurde jedoch nicht bekannt.

2.6.5 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Ablauf des Vorhabens verlief planungsgemäß. Die Bearbeitung erfolgte in folgenden Schritten:

- Analyse der Energieflüsse in tiefen Geothermiekraft- und -heizwerken.
- Definition von Ansatzpunkten zur verbesserten Wärmeausnutzung: Kraftwerksprozessoptimierung, erweiterte Wärmenutzung durch weitere Auskühlung des Thermalwassers sowie Nutzung der Rückkühlwärme.
- Literaturrecherche zur Optimierung der Kraftwerksprozesse Organic-Ranking-Cycle sowie des Kalina-Cycle.
- Erstellen von Konzepten zur erweiterten Wärmenutzung.
- Erstellen von Konzepten zur Nutzung der Niedertemperaturwärme.
- Exergetische Bewertung der Wärmenutzung tiefer Geothermie.
- Aufzeigen des aktuellen Stands der Technik bezüglich Niedertemperatur-Stromerzeugungsprozessen.

2.6.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Mit folgenden Stellen erfolgte ein direkter fachlicher Austausch, dessen Ergebnisse in die vorliegende Studie einfließen:

- Dr.-Ing. Dietmar Kuhn, Arbeitsgruppe Energie- und Verfahrenstechnik des Instituts für Kern- und Energietechnik des KIT (Forschungsschwerpunkte im Bereich der Kraftwerkstechnik: Simulation von Prozessen und Komponenten; Aufbau des modularen Niedertemperaturkreises Karlsruhe (MoNiKa); Untersuchung von Schaltungsvarianten der Kreisprozesse; Standortspezifische Auswahl optimierter Arbeitsfluide im Kraftwerkskreislauf; Untersuchungen an überkritischen Fluiden; Aufbau und Validierung von Simulationstools)

- Dr. Thomas Köbel et al., Abteilung Forschung und Innovation der EnBW Energie Baden-Württemberg AG (Konzernforschung der EnBW zu Geothermiekraftwerken)
- Prof. Werner Schenk und Mitarbeiter, Fakultät 05, Bereich Versorgungs- und Gebäudetechnik der Hochschule München (Verbundprojekt: Ökonomische und ökologische Effizienz tiefegeothermischer Anlagen in Süddeutschland – Untersuchungen zu Betriebserfahrung und Optimierungsansätze. Teilvorhaben Hochschule München: Obertägiger Bereich. Ziele: Herausarbeitung von Optimierungspotenzialen zur kostengünstigen Gewinnung und Nutzung von Wärme und Strom aus geothermischen Reservoiren; Entwicklung eines Simulationsverfahrens zur Beschreibung von Geothermieanlagen)

2.6.7 Erzielte Ergebnisse (Daten und Resultate)

Während bei modernen Kohle- sowie Gas- und Dampfkraftwerken heutzutage exergetische Gütegrade bei der Stromerzeugung von über 70 % des maximal möglichen Carnot-Wirkungsgrades erreicht werden, liegen diese bei aktuell existierenden Geothermiekraftwerken unter 50 % des maximal möglichen Wirkungsgrades, der bei vollständiger Nutzung des Exergiestroms bei Abkühlung des Thermalwassers auf 60 °C möglich ist (Abb. 18). Der höhere, für eine konstante Wärmequellentemperatur geltende Carnot-Wirkungsgrad kann bei geothermischen Kraftwerken - aufgrund der bei Wärmeabgabe an den Prozess sinkenden Quellentemperatur (Abkühlung des Thermalwassers) - nicht als Vergleichsprozess angesetzt werden. Doch selbst bei korrektem Vergleich mit dem Exergieangebot eines auskühlenden Stoffstroms (Thermalwasser) wird deutlich, dass im Bereich der Optimierung der geothermischen Kraftwerksprozesse (Kalina-Cycle sowie Organic-Ranking-Cycle) noch Potentiale vorhanden sind, die es durch weitere Forschungen zu erschließen gilt. Hier sind neben einer exakten Anlagenplanung und -auslegung überkritische Prozessfahrweisen, die richtige Wahl des Arbeitsmittels bzw. dessen Mischungsverhältnisse sowie mehrstufige Prozesse als besonders Erfolg versprechend zu nennen. Hinzu kommt, dass die im Betrieb befindlichen Geothermieanlagen neben den moderaten Gütegraden noch hohe Eigenenergieverbräuche aufweisen, die im angegebenen Stromerzeugungswirkungsgrad in der Regel noch nicht berücksichtigt sind. Diese zu senken, sollte ein vorrangiges Ziel künftiger Planungen, Betriebsstrategien sowie von Forschung und Entwicklung sein. Sowohl auf Komponenten- als auch auf System- und Planungsebene ist noch ein signifikantes Entwicklungspotenzial vorhanden.

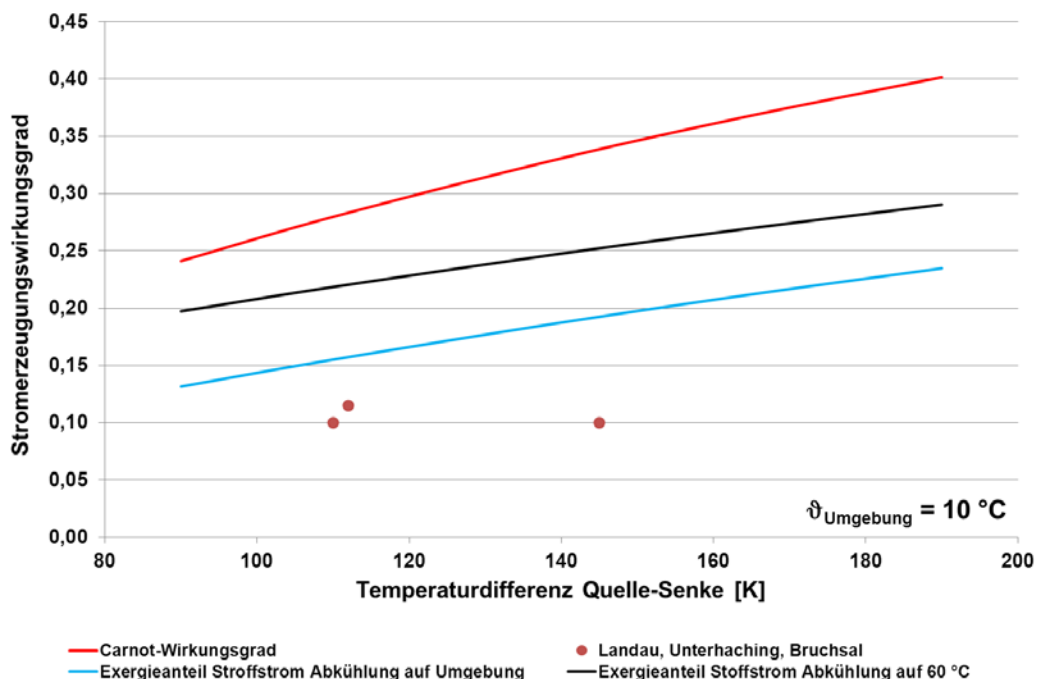


Abb. 18: Vergleich theoretisch möglicher Wirkungsgrade mit denen realer Geothermie-Kraftwerke

Bei Recherchen zu Daten von im Betrieb befindlichen tiefen Geothermieprojekten hat sich herausgestellt, dass die Angaben zu Förderraten und Temperaturen des Thermalwassers (Förder- sowie Injektionstemperatur) Leistungen, und jährliche Betriebszeiten oft lückenhaft sind und mitunter nicht miteinander korrelieren. Auf Anfrage verweisen die Betreiber der Anlagen oftmals auf betriebsinterne Geheimnisse sowie Gegenstand von aktuell geschützten Forschungsprojekten, sodass eine umfassende und vollständige Darstellung der Betriebsdaten aktueller Geothermieanlagen nicht möglich ist.

Bei der Nutzung tiefer Geothermie sind grundsätzlich Stromerzeugung und Wärmenutzung gegeneinander abzuwägen bzw. aufeinander abzustimmen, um eine optimale energetische und exergetische Ausnutzung zu erreichen. In Fällen mit entsprechenden Randbedingungen, hoher Wärmenutzungstemperatur (nahe der Thermalwassertemperatur) sowie langer jährlicher Wärmenutzungsdauer kann die reine Wärmenutzung ohne Stromerzeugung der reinen oder auch gekoppelten Stromerzeugung vorzuziehen sein. Dies ist in Abb. 19 exemplarisch für eine Thermalwasser-Fördertemperatur von 120 °C bei einer Förderrate von 24 l/s dargestellt. Wird das Thermalwasser nur einem Kraftwerksprozess unterzogen und mit 60 °C zurück ins Erdreich reinjiziert so beträgt die Bruttostromleistung bei einem angenommenen Stromerzeugungswirkungsgrad von 10 % ca. 0,55 MW. Der Exergiestrom beträgt somit ebenfalls 0,55 MW. Bei einer jährlichen Laufzeit des Kraftwerkes von 7500 h werden 4125 MWh Energie, die im Falle von Strom gleich Exergie ist, erzeugt. Bei reiner Wärmenutzung mit denselben Randbedingungen wird eine thermische Leistung von ca. 5,5 MW übertragen, was bei einer Wärmenutzungsdauer von 3635 h im Jahr einer thermischen Energiemenge von rund 20.000 MWh entspricht. Der Exergiestrom beträgt dabei 1,14 MW (Abb. 19 unten). Aufgrund der geringeren Wertigkeit der thermischen Energie entspricht die exergetische Ausbeute mit 4125 MWh der des Kraftwerksprozesses. Bei höherer Wärmenutzungsdauer ist demnach die exergetische Ausnutzung der im Thermalwasser enthaltenen Energie durch Wärmenutzung entsprechender Hochtemperaturverbraucher vor Ort der Stromerzeugung überlegen.

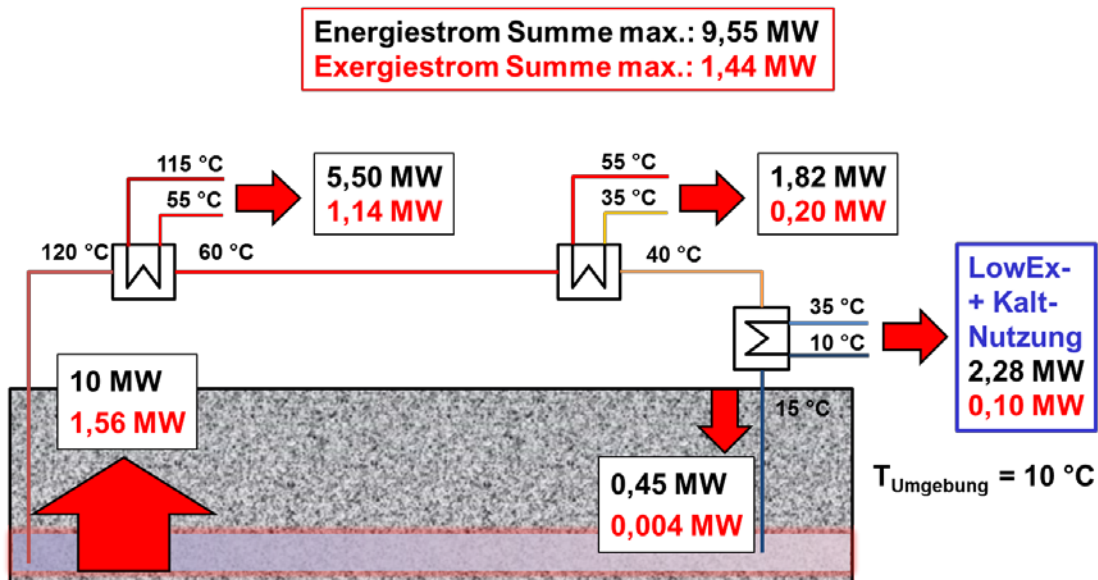
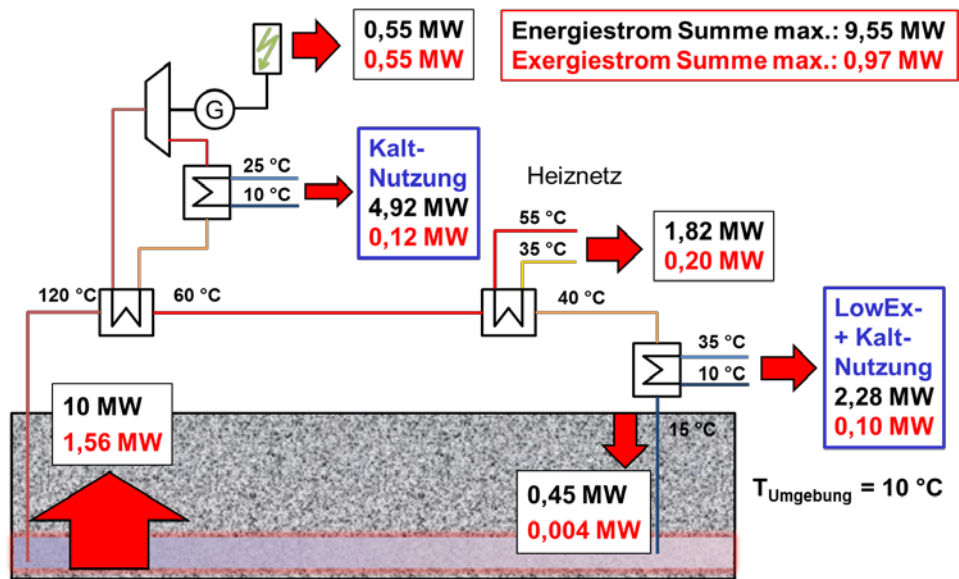


Abb. 19: Analyse des Energie- und Exergieflusses beim tiefen geothermischen Heiz-Kraftwerk (oben) und Heizwerk (unten) jeweils mit LowEx- und Kalt-Wärmenutzung.

In Verbindung mit Nutzungskonzepten für Niedertemperatur- & Kaltnetze (LowEx-Netze für Niedertemperaturanwendung bzw. als Wärmequellennetze für verbraucherseitige Wärmepumpen) lässt sich die exergetische Ausnutzung der Wärme aus tiefer Geothermie über konventionelle Lösungen hinaus maximieren. Bereits bei der Projektierung geothermischer Anlagen sollte mittels Temperaturkaskaden die Möglichkeit der Wärmeauskopplung auf verschiedenen Temperaturniveaus in Erwägung gezogen werden. In Abb. 20 ist eine solche Temperaturkaskade beispielhaft, ausgehend von einer Thermalwasserfördertemperatur von 120 °C, bis zu einer Injektionstemperatur von 10 °C abgebildet. Die Wärmeauskopplung erfolgt dabei auf den verschiedenen Nutztemperatur-Niveaus Hochtemperatur-, Niedertemperatur-, LowEx- und Kalt-Nutzung.

Für die vorliegenden vier Temperaturniveaus-Nutzungen sind die im Folgenden aufgezählten Verbraucher/Nutzungen denkbar.

2.6.7.1 Hochtemperatur-Nutzung:

- Stromerzeugung im Kraftwerksprozess mit der Option auf Auskopplung der Rückkühlwärme (Anwend. siehe Kalt-Nutzung).
- Versorgung von Hochtemperaturverbrauchern z. B. Industrieprozesse oder Fernwärmenetze für Gebäudeversorgung (Heizung und Trinkwasser) mit überwiegend Altbauten.

2.6.7.2 Niedertemperatur-Nutzung:

- Versorgung von Niedertemperaturverbrauchern, z. B. Fernwärmenetze für Gebäudeversorgung (Heizung und Trinkwasser) mit sanierten Altbauten und Neubauten ohne Flächenheizung.
- Zu Spitzenlastzeiten kann mittels Hochtemperaturwärmepumpen der notwendige Temperaturhub auf die maximalen Auslegungstemperaturen erfolgen.
- Im Sommer nicht benötigte Wärme kann mittels saisonaler Speicher zwischengelagert werden um im Winter den erhöhten Bedarf zu decken.
- Mittels zukünftiger Niedertemperatur-Stromerzeugungsprozesse kann evtl. eine sekundäre Stromerzeugung erfolgen.

2.6.7.3 LowEx-Nutzung:

- Versorgung von LowEx-Verbrauchern, z. B. Fernwärmenetze für Gebäudebeheizung mit Niedrigenergiehäusern mit Flächenheizung und Betonkernaktivierung, Hallen- und Freibäder.
- Zu Spitzenlastzeiten und für einzelne Spitzenverbraucher bzw. zur Trinkwassererwärmung kann mittels Hochtemperaturwärmepumpen das Temperaturniveau beispielsweise dezentral beim Verbraucher angepasst werden.
- Im Sommer nicht benötigte Wärme kann mittels saisonaler Speicher zwischengelagert werden um im Winter den erhöhten Bedarf zu decken.

2.6.7.4 Kalt-Nutzung:

- Regeneration und Beladung von erdgekoppelten Quellensystemen für Erdwärmepumpen.
- Einspeisung in Quellennetze für Wärmepumpen.
- Innovative Nutzungen, z.B. Verbraucher in der Forst-, Land- oder Viehwirtschaft: Gewächshäuser, anheben des Temperaturniveaus von Äckern (exotischer Ackerbau, Ertragssteigerung), Fischzucht, Regeneration von Agrothermie.
- Eisfreihaltung im Winter.
- Nutzung von aus dem geothermischen Kraftwerksprozess ausgekoppelter Rückkühlwärme.

Um die maximale exergetische Ausnutzung der Wärme im Thermalwasser durch Temperaturkaskaden wirtschaftlich gestalten zu können, muss eine genügend hohe Wärmeabnahme auf den genannten Temperaturniveaus bei hinreichender Dichte, d. h. nahe genug am Standort der geothermischen Anlage vorhanden sein. Die Auswahl des Geothermiestandortes sollte daher nicht nur auf die Produktivität der Bohrung sondern auch auf entsprechende Wärmeabnehmer vor Ort abzielen. Möglicherweise lassen sich am Standort entsprechende Abnehmer generieren, falls diese nicht im Vorfeld vorhanden sein sollten. Gegebenenfalls sind vorhandene Verbraucher auf die Nutzung von niedrigeren Temperaturniveaus umzurüsten bzw. auszustatten.

Zusätzlich oder alternativ zur Einspeisung der Wärme in heiße, warme oder kalte Nah- und Fernwärmenetze sollte auch eine mobile Wärmebelieferung von potentiellen Verbrauchern in Betracht gezogen werden. In besonderen Situationen, wie z. B. der Überbrückung der Bauzeit eines Wärmenetzes oder bei Vorliegen geeigneter einzelner Verbraucher abseits des

Wärmenetzes, kann der Wärmetransport mit „mobiler Wärme“, d. h. mittels auf LKW oder auf Schienen transportierten Latentwärmespeichern, eine interessante Option sein, deren Wirtschaftlichkeit allerdings im Einzelfall zu prüfen ist.

Zur sekundären Stromerzeugung über Niedertemperatur-Wärmeerkraftprozesse stehen momentan noch keine relevanten Technologien marktreif zur Verfügung, sind aber aktuell Gegenstand der Forschung. Hier könnten zukünftig insbesondere die Thermoelektrik, Thermotunnelung und neuartige Stirling-Motoren vielversprechend sein.

Die weitere Thermalwasserauskuhlung kann nicht ohne weitere Aufwendungen bzw. geeignete Maßnahmen erfolgen. Als problematisch ist hier unter anderem die Ausfällung der im Thermalwasser enthaltenen Minerale, Salze und Gase zu nennen. Diese führt neben Korrosion an Anlagenkomponenten und Rohrleitungen zu Ablagerungen der Salze in den Armaturen und Rohren. Damit erhöht sich der Druckverlust, wodurch der Aufwand zur Umwälzung des Wassers stark ansteigt. Dies führt zur Erhöhung der ohnehin hohen Anteile des Eigenstromverbrauchs bei geothermischen Kraft- bzw. Heizwerken. Um Ausfällung und Korrosion zu verhindern, sind Kenntnisse der genauen chemischen Zusammensetzungen der salinen Thermalwässer erforderlich. Das Thema chemische Zusammensetzung, Ausfällung und deren Vermeidung ist Gegenstand aktueller Forschungen und bedarf noch weiteren Kenntniserwartungen um geothermische Anlagen störungs- und wartungsärmer betreiben zu können.

2.6.8 Nutzen, insbesondere praktische Verwertbarkeit der Ergebnisse und Erfahrungen

Die Ergebnisse dieser Potentialstudie können zur Steigerung der energetischen und exergetischen Effizienz der Wärmeausnutzung in bestehenden Geothermieanlagen zum Einsatz kommen sowie in die Planung zukünftiger geothermischer Versorgungskonzepte einfließen. Somit wird ein Beitrag zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit geothermischer Anlagen geleistet.

2.6.9 Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer auch in projektfremde Anwendungen und Branchen

Der Ergebnis- und Forschungstransfer erfolgt auf vier Wegen:

- 1 Allgemeiner Ergebnistransfer in die Fachöffentlichkeit: Kongress- bzw. Tagungsvorträge und Fachveröffentlichungen (siehe folgender Abschnitt „Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse“).
- 2 Wissenstransfer an Studierende in der Hochschule Biberach: Die Projektergebnisse fließen ein in Vorlesungen (Bachelor-Studiengang Energiesysteme: Pflichtfach „Grundlagen der Geothermie“, Master-Studiengang Gebäudeklimatik: Wahlfach „Geothermische Systeme“) sowie in studentische Arbeiten (Projekt- und Abschlussarbeiten), wobei in letzteren auch eine Weiterentwicklung der Projektergebnisse erfolgt.
- 3 Die Ergebnisse dieser Studie sollen als Grundlage und Impulsgeber für die weitere Entwicklung der Nutzung tiefer geothermischer Energie dienen, z. B. in geplanten Gesprächen und Workshops mit Behörden, Ministerien. Weiterhin stellen die Projektergebnisse eine Ausgangsbasis für auf erweiterte bzw. neue Anwendungen zielende Folgeprojekte dar, z. B. FuE- bzw. Pilotprojekte zu neuen Systemkombinationen (z. B. Kombination von geothermischen Heizkraftwerken mit Hochtemperatur-Wärmepumpen).
- 4 Der Teil der Projektergebnisse, der Wärmenutzungskonzepte und -technologien betrifft, kann in projektfremde Anwendung übertragen werden (z. B. Niedrigexergie-Wärmenutzung für Nah- und Fernwärmekonzepte mit anderen Wärmeerzeugern als Geothermie; mobile Wärmelieferung, deren Einsatz grundsätzlich für sämtliche Wärmeprozesse in Frage kommt, bei denen ansonsten ungenutzte Abwärme auf einem Temperaturniveau ≥ 60 °C anfällt).

2.6.10 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

- Vortrag auf dem Kongress GeoTHERM am 21.02.2014 in Offenburg; Titel „Studie zur energetisch und exergetisch verbesserten Nutzung von Wärme aus tiefer Geothermie in Baden-Württemberg“.
- Die Präsentation und Veröffentlichung der Projektergebnisse auf dem nächsten Biberacher Geothermietag ist geplant (voraussichtlich Oktober 2014).
- Die Veröffentlichung eines Aufsatzes in einer Fachzeitschrift ist noch in 2014 vorgesehen.

2.6.11 Literatur

Drescher, U.: Optimierungspotential des Organic Rankine Cycle für biomasse-befeuerte und geothermische Wärmequellen. Band 14 von Thermodynamik – Energie, Umwelt, Technik. Logos Verlag Berlin GmbH, 2008, ISBN 978-3-8325-1912-4.

- Baumgärtner et al.: Betriebserfahrungen mit den Geothermiekraftwerken Landau, Insheim und Bruchsal. bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, Ausgabe 05/2013, wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn, ISSN 1611-1478, S. 48-57.
- Köhler, S.: Geothermisch angetriebene Dampfkraftprozesse – Analyse und Prozessvergleich. Scientific Technical Report STR06/02, GeoForschungsZentrum Potsdam, 2005, ISSN 1610-0956.
- Vetter, C.: Parameterstudie zur Simulation von Niedertemperatur-Kreisprozessen. KIT Scientific Reports 7585, KIT Scientific Publishing 2011, Karlsruhe, ISSN 1869-9669.
- Mergner, H.; Schlagermann, P.: Betriebsoptimierung durch aktuelle Forschungsergebnisse im Geothermiekraftwerk Bruchsal. GeoTHERM, 2013, Offenburg.
- Münch et al.: Geothermische Stromerzeugung: Bruchsal und Soultz-sous-Forêts. 20. Symposium Feslmechanik und Tunnelbau. mining+geo (2012) Nr. 4.
- Mergner, H., Kölbl, T., Schlagermann, P.: Geothermal Power Generation – First Operation Experiences and Performance Analysis of the Kalina Plant in Bruchsal. Renewable Energy World Europe, Vienna 2013.
- Valdimarsson, P.: Factors influencing the economics of the Kalina power cycle and situations of superior performance. International Geothermal Conference, 2003, Reykjavik.
- Rohloff, K.; Kather, A.: Kraftwerkstechnologie zur geothermischen Stromerzeugung aus Vorkommen mit geringer Enthalpie. Chemie Ingenieur Technik 2011, 83, No. 11, S. 1820-1833, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, ISSN 1522-2640.
- Rohloff, K.; Kather, A.: Geothermische Stromerzeugung – Kraftwerkstechnologien und Technologie zur gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 2011, Berlin.
- Heberle et al.: Konzept zur effizienteren geothermischen Stromerzeugung auf Basis des Organic-Rankine-Cycle. Der Geothermiekongress, 2009, Bochum.
- Heberle et al.: Kosteneffiziente ORC-Hybridkraftwerke. Der Geothermiekongress, 2010, Karlsruhe.
- DiPippo, R.: Geothermal Power Plants – Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact. Second Edition, Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2008.
- Ibrahim, O.; Klein, S.: Absorption power cycle. Energy, Volume 21, Issue 1, S. 21-27, Elsevier, 1996, ISSN 0360-5442.
- Kalina, A.: Power cycle and systems for utilizing moderate and low temperature heat sources. US-Patent 6910334 B2, 28.06.2005.
- Kalina, A.: Method and apparatus for converting heat from geothermal fluid to electric power. US-Patent 4982568, 08.01.1991.
- Kalina, A.: Kalex – Kalina Cycle Power Systems For Geothermal Applications. Kalex LCC, 2010. <http://www.kalexsystems.com/Kalex%20Geothermal%20Brochure%2010-10.pdf>
- Renz, M.; Engelhard, M.: The new generation Kalina cycle. Conference Electricity Generation from Enhanced Geothermal Systems, 2006, Strasbourg.
- Kabus et al.: Studie zu den Möglichkeiten der Stromerzeugung aus hydrothermalen Quellen in Mecklenburg-Vorpommern. Projektbericht, Wirtschaftsministerium Land Mecklenburg-Vorpommern, 2003, Neubrandenburg.
- Frick et al.: Life cycle assessment of geothermal binary power plants using enhanced low-temperature reservoirs. Energy, Volume 35, Issue 5, S. 2281-2294, Elsevier, 2010, ISSN 0360-5442.
- Kaufmann, S.: Wärmebelieferung mit Latentwärmespeichern – Chancen und Grenzen am Beispiel eines Pilotprojektes. Solarzeitalter 4|2012.
- Hofmann et al.: Latentwärmespeicher für trassenlose Wärmeerzeugung – Innovative Nutzung von Industrieabwärme und Aufbau einer Logistik für Wärmelieferung im Container. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 23/2008. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien.
- Peitzsch, U.: Grünes Licht für neue Projekte rund um nachhaltige Energien. Horizonte 41/März 2013.
- Pietruschka, D., Kluge, J.: Kalte Nahwärme: agrothermische Wärmeversorgung einer Plusenergiesiedlung. bbr 03-2013.
- Kloas, W., Graupner, J.: ASTAF-PRO: The „Tomatofish“ Fact Sheet. Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB). <http://www.tomatenfisch.igb-berlin.de/downloads.html>, 31.03.2014.
- Klein, S.: Hochtemperaturwärmepumpen – Aktuelle Situation und Perspektiven. Kälte Klima Aktuell, Sonderdr. Großkälte 2009.
- Ochsner Wärmepumpen GmbH: Wärmepumpen für große Leistungen und hohe Temperaturen für Großbauten, Industrie, Kraftwerke und Prozesstechnik. Produktkatalog Ochsner, 2013.
- Thermalforce.de: Wie sinnvoll ist der Einsatz von Thermogeneratoren? http://thermalforce.de/download/wie_sinnvoll_ist_der_einsatz_von_thermogeneratoren.pdf, 31.03.2013.
- Jägle, M.: Thermoelektrik nach Mass – moderne Messtechnik für effiziente Materialien. Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM, 2011.
- Batholomé, K.: Sensorik autark + vernetzt – Sensoren versorgen sich selbst mit Strom. Fraunhofer-Inst. für Phys. Messtechnik IPM.
- LaTherm: Das LaTherm Wärmetransportsystem. Dürr Planertag 15.05.2013. LaTherm GmbH. <http://www.latherm.de/index.php?id=29>, 31.03.2014.
- TransHeat: Mobile und dezentrale Energieversorgung. Transheat GmbH. <http://www.a-b-o-umweltservice.com/Waermetransport.htm>, 31.03.2014.

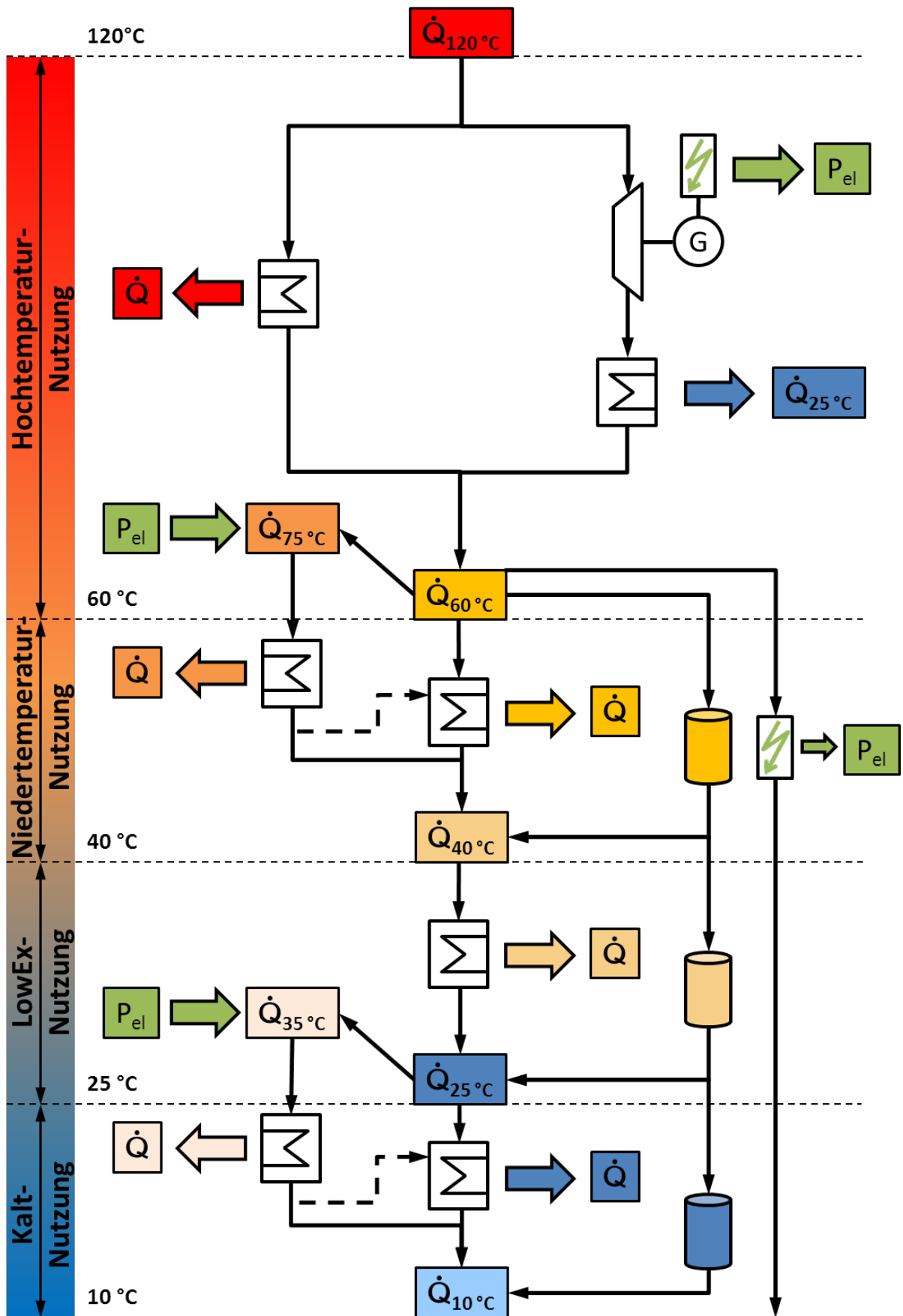


Abb. 20: Temperaturkaskade zur maximalen Ausnutzung der im Thermalwasser enthaltenen Energie und Exergie für tiefe Geothermieanlagen.

2.7 3-D Geomechanikmodell zur Nutzung des Untergrunds - Forschungsprojekt mit Service-Funktion (KIT/LFZG, Prof. Schilling, Dr. Müller)

2.7.1 Kurzbericht der Forschungsergebnisse (hier Zwischenstand)

Ziel des Projekts ist die Bereitstellung von Information über Spannung und Deformation im Untergrund, die mittels eines detaillierten 3D Modells abgeschätzt werden. Frühere Modelle sind entweder aufgrund der Rechnerleistung räumlich nicht genügend fein aufgelöst (Schwarz & Henk, 2005), umfassen regional nur Teile von Baden-Württemberg (Buchmann, 2008; Schwarz & Henk, 2005) oder sind schlichtweg nicht mehr verfügbar. Spannungs-, Verschiebungs- und Deformationsdaten sind nur an vereinzelt Messlokationen gegeben. Es ist unzulässig, diese Werte über große Strecken mit wechselnden rheologischen Eigenschaften, ggfs. sogar über Störungszonen hinweg zu interpolieren bzw. zu extrapolieren. Hier setzen numerische Modellierungen an. Bei der Umsetzung des Modells konnten wesentliche Meilensteine bereits erzielt werden. So wurden für Baden-Württemberg die Schichten des geologischen Landesmodells bereitgestellt, diese werden derzeit technisch so bearbeitet, dass sie Eingang in ein geomechanisches Finite Element Modell finden können. Da bei Modellierungen immer ein Trade-off zwischen der Anzahl der Elemente und der Rechnerleistung einerseits, der Detailtreue andererseits existiert, war es von großer Wichtigkeit, diejenigen Strukturelemente, die unbedingt in das Modell implementiert werden müssen, zu identifizieren. Das ist sowohl, was die Störungszonen als auch die Schichten betrifft, gelungen. Die möglichen Vergleichsdaten (Hebungen/Senkungen, Spannungsfeld in Betrag und Richtung) wurden mit den verantwortlichen Stellen besprochen.

2.7.2 Motivation und Hintergründe des Vorhabens

Ziel des Projekts ist die Bereitstellung von Information über Spannung und Deformation im Untergrund, die mittels eines detaillierten 3D Modells abgeschätzt werden. Damit kann der Einfluss rheologischer Parameter, der Topographie und die regionale Verteilung der lithologischen Einheiten und der im Modell implementierten Störungszonen auf das Spannungs- und Deformationsfeld in BW getestet werden. Das Modell dient als Basis für weitere Detailmodellierungen (z.B. Rheingraben, Molasseregion, etc.). Es liefert Randbedingungen für hochauflösendere Submodelle an Standorten zukünftiger Geothermieprojekte und dient somit als Grundlage für Forschungsarbeiten, Gutachten und zur Unterstützung von Genehmigungsbehörden.

Ausgehend von den bisher nur punktuell vorliegenden Daten soll mithilfe des Modells eine dreidimensionale Darstellung des Spannungsfeldes im Raum erfolgen. Extrapolationen und Interpolationen des Spannungsfelds haben ihre Limitationen, da an lithologische Grenzen und z.B. Störungszonen Umlagerungen des Spannungsfelds stattfinden (z.B. das Spannungsfeld in Norddeutschland unterscheidet sich oberhalb und unterhalb der Zechstein-Evaporite) und in solchen Fällen Glättungen oder Interpolationen etc. zu einem falschen Ergebnis führen. Das geomechanische Modell simuliert den absoluten Spannungszustand und die Kinematik der Region unter Berücksichtigung der gesteinsphysikalischen Eigenschaften sowie des Einflusses der aktiven Haupt-Störungen im Untersuchungsgebiet. Im Vergleich zu früheren Modellierungen kann -bedingt durch die zwischenzeitlich verbesserte Rechnerleistung- mit diesem Modell der Einfluss der Geologie Baden-Württembergs auf das Spannungsfeld lateral und vertikal systematisch und quantitativ untersucht werden. Aufbauend auf diesem Modell wird es möglich sein, weitere Parameter-Studien zu unterschiedlichen Themenbereichen anzuschließen. Da die Datenfreigabe z.T. erst 2014 erfolgt(e) wird dieser Projektteil kostenneutral 2014 weiterbearbeitet.

2.7.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Aktuell gibt es Studien von Buchmann (2008) und Schwarz & Henk (2005) für das Spannungsfeld bzw. die Evolution des Oberrheingrabens (Abb. 21), die häufig angefragt werden, aber von denen nur noch teilweise Informationen vorliegen. Es gibt allerdings kein geodynamisches Modell zum Spannungs- und Deformationsfeld für Baden-Württemberg.

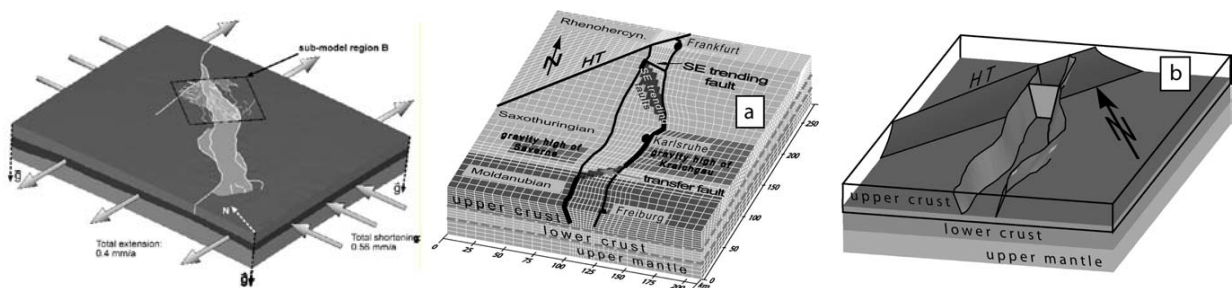


Abb. 21: 3D numerische Modelle in Baden-Württemberg: links Buchmann (2008), Mitte und rechts Schwarz & Henk (2005). Beide Modellierungen konzentrieren sich auf den Oberrheingraben.

2.7.4 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Es sind uns keine weiteren 3D geodynamischen Modellierungen für die Region Baden-Württemberg bekannt.

2.7.5 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben ist auf die Unterstützung des geologischen Landesamtes in Freiburg und von Fachkollegen angewiesen. Daher wurde versucht, diese frühzeitig einzubinden. Der Vorhabenablauf gliedert sich in vorbereitende Maßnahmen, die technische Umsetzung des Modells und die Modellierung des Spannungsfelds als Funktion der Randbedingungen und Materialkontraste.

2.7.5.1 Vorbereitende Maßnahmen:

1. Vorstellung und Erläuterung des Projekts beim geologischen Landesamt, bei den Kollegen im AGW, Dr. Schwarz und bei den Vertretern des GeORG-Projekts.
2. Test der Randbedingungen für die Modellierung durch 2D und 3D Modellierungen mit einfacher Modellstruktur.
3. Erarbeitung der Strukturdaten für die Modellfortsetzungen bis zum Modellrand außerhalb von BW.
4. Aufbau der Mohorovicic-Diskontinuität (ca. 25-40 km Tiefe, Untergrenze der kontinentalen Kruste) als erste rheologische Grenze zwischen der Modellunterseite und der Unterkruste.
5. Identifikation der signifikantesten Störungszonen in Baden-Württemberg (Rücksprache mit Dr. Schwarz, Dr. Grimmer, Dr. Röckel)
6. Erstellung der Störungsflächen aus dem Verlauf der Störungen an der Erdoberfläche oder anhand seismischer Profile

2.7.5.2 Technische Umsetzung: Einarbeitung der Shape Files des geologischen Landesmodells:

Als Eingabedaten werden Informationen über die Struktur des Untergrunds sowie gesteinsphysikalische Eigenschaften der auftretenden Materialien benötigt. Für die Geologie und Strukturdaten werden verwendet:

- Am LGRB wird seit 2005 ein digitales, geometrisches Übersichtsmodell des geologischen Untergrundes von Baden-Württemberg erstellt. Dieses umfasst die sedimentären Schichten in BW (Abb. 22).
- Im Rahmen des EU-Projekts GeORG (Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben) wurde ein geologisches 3D-Modell zur Darstellung des dreidimensionalen Aufbaus des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben (mit Störungen, wichtigen lithostratigraphischen Horizonten und Salzstrukturen) bis in sieben Kilometer Tiefe erstellt. Seit Beginn 2014 steht der technische Abschlussbericht zur Verfügung.

Erfreulicherweise kann unter großer Mithilfe des LGRB eine Nutzung des Shape-File Datensatzes der Geometrie-Daten von GeORG für den Oberrheingraben und eine Nutzung des GoCAD-Datensatzes der Landesmodell-Daten für den LFZG-Verbandantrag erfolgen.

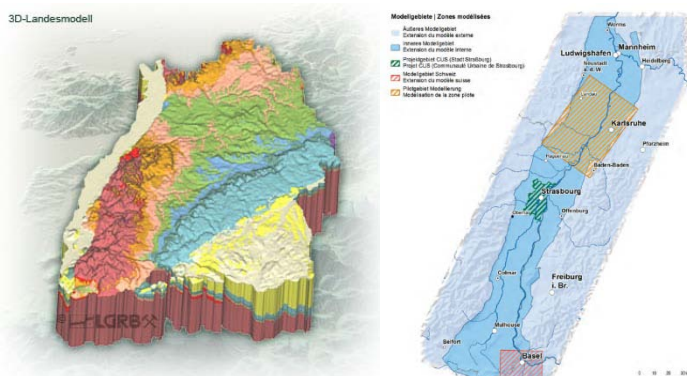


Abb. 22: Links: Geologisches Landesmodell von Baden-Württemberg. Es umfasst neben den lithostratigraphischen Haupteinheiten auch überregionale Bruchstrukturen und Impaktkrater (Quelle: LGRB). Rechts: Ausdehnung des Modellgebiets von GeORG (www.geopotenziale.eu).

Für die Einarbeitung der Landesmodell Daten und Kombination mit der Moho- und Conrad-Topographie sind folgende Schritte erforderlich.

1. Zusammenfassung der Schichten mit ähnlichen rheologischen Eigenschaften (Reduzierung der Elementzahl auf insges. maximal 3 Mill. Elemente).

2. Lithologische Grenzhorizonte und Störungen werden als Flächen im IGES Format erstellt aus den shapefile Datenpunkten. Diese werden in HyperMesh importiert.
3. Verschneiden der lithologischen Flächen mit den Störungsflächen in Hypermesh.
4. Meshing → Erstellung der Finiten Elemente

2.7.5.3 Modellierung und Interpretation

5. Zuordnung der rheologischen Eigenschaften
6. Definition und Erstellung eines initialen Spannungszustandes
7. Parameterstudien
8. Interpretation und Validierung des Modells. Zur Validierung der Modellergebnisse werden modell-unabhängige Daten und Beobachtungen als Vergleich herangezogen
9. Für das Spannungsfeld werden Daten aus der World Stress Map (Abb. 23) genutzt sowie Daten aus Tiefbohrungen. Auch hier besteht eine intensive Zusammenarbeit mit dem LGRB. Die Geometrie-Daten und die Daten zum Spannungsfeld wurden ursprünglich zum überwiegenden Teil von der Erdöl-Erdgasindustrie erfasst. Daher wurde bzgl. Datenfreigabe der Wirtschaftsverband Erdöl- und Erdgasgewinnung e.V. (WEG) angefragt.
10. Information zum horizontalen und vertikalen Verschiebungsfeld

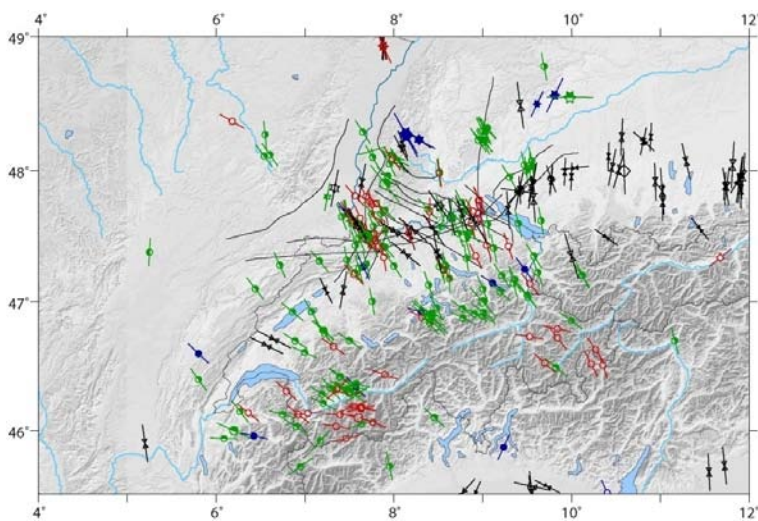


Abb. 23: Spannungsdaten aus der World Stress Map (Heidbach et al. 2008). Orientierung der maximalen horizontalen Spannung und tektonisches Regime (rot Abschiebung, grün Blattverschiebung, blau Überschiebung).

2.7.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Projekts werden die Kontakte zu den GeORG-Verantwortlichen gepflegt, insbesondere besteht eine Zusammenarbeit mit dem geologischen Landesamt in Freiburg (Herr Sokol, Frau Rupf, Herr Prof. Watzel), die es ermöglicht, die Shape-Files des Baden-Württembergischen Landesmodells für diese Forschungsarbeit zu nutzen.

Dr. Jens Grimmer (AGW) und Dr. Michael Schwarz (360Plus Consult) und Dr. Thomas Röckel (Piewak & Partner) sind aufgrund ihrer geologischen und Modellierungserfahrung in das Projekt eingebunden. Alle Beteiligten sind aufgrund ihres Interesses an dem Modell bereit, ihre Erfahrung einzubringen und erhalten keine Mittel.

Für die Daten zum horizontalen und vertikalen Verschiebungsfeld nutzen wir die Nähe zum Geodätischen Institut des KIT (Herr Dr. Zippelt, Herr Fuhrmann, Herr Dr. Westerhaus).

Bei der Vernetzung und den einzelnen Modellschritten arbeiten wir eng mit Dr. Oliver Heidbach und Karsten Reiter vom Deutschen GeoForschungsZentrum in Potsdam zusammen, die analog zum BW-Modell eine bundesweite Modellierung aufsetzen. Herr Dr. Heidbach ist auch unser Ansprechpartner bzgl. der Weltkarte der tektonischen Spannungen.

2.7.7 Erzielte Ergebnisse (Daten und Resultate)

Seit Einreichung des Statusreports fand ein Transfer der Basisgeometriedaten des geologischen Landesmodells von Baden-Württemberg im Shape-File Format statt. Die bisher abgeschlossenen Arbeiten konzentrierten sich auf die Punkte 1-7. Bei der Festlegung der Modellgrenzen wurden unterschiedliche Konzepte getestet, um den Einfluss der Grenzen auf die Modellregion sinnvoll zu gestalten. Hier dargestellt sind als Beispiel 2 Varianten.

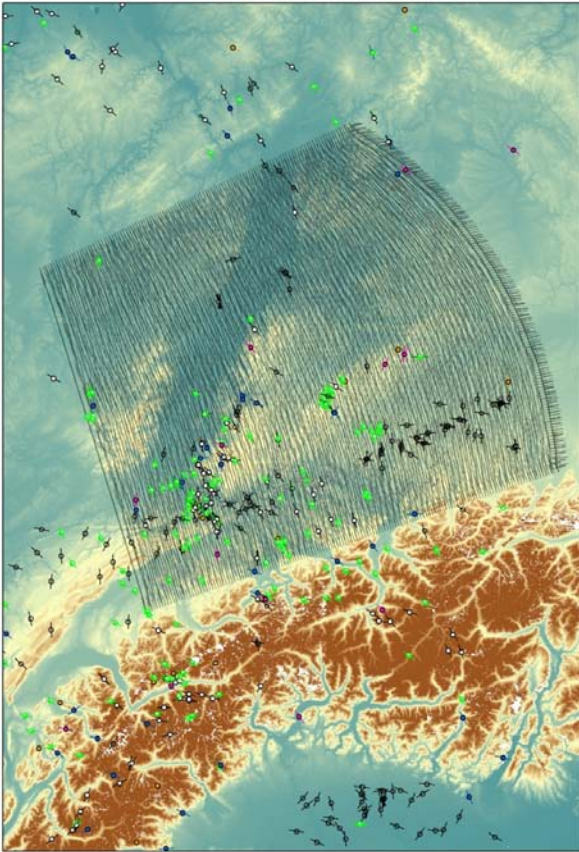


Abb. 24: Testmodell für Modellgrenzen (Variante A), dargestellt über einer topographischen Karte mit den Richtungen der größten horizontalen Hauptspannungen (bunte Symbole sind gemessene Daten aus der World Stress Map (www.world-stress-map.org), schwarze Striche sind modellierte Spannungen). Für die Voruntersuchung der Modellgrenzen wurde ein 2D Modell aus einheitlichem Material verwendet. In diesem Modell wurde der westliche Rand so gewählt, dass Bewegungen parallel zum Rand erfolgen können, aber nicht senkrecht dazu. Im Süden wird senkrecht zum Modellrand nach NNW geschoben. Im Norden sind Bewegungen parallel zum Rand möglich, aber nicht senkrecht dazu. Der gekrümmte Bereich im Osten zusammen mit den nicht ganz parallelen Rändern im Norden und Süden bedingt eine großräumige Rotation des Spannungsfeldes von Alpennormaler Richtung auf NW-SE im nördlichen Modellteil.

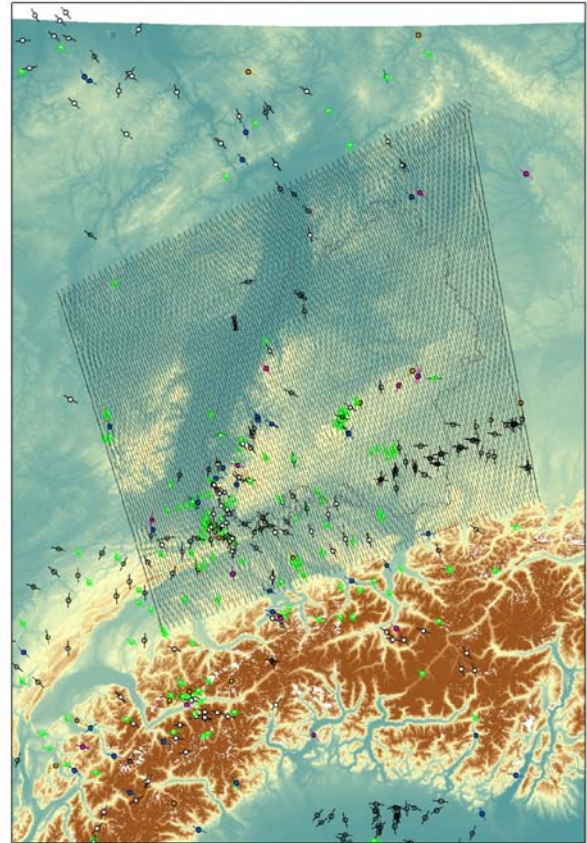


Abb. 25: Testmodell für Modellgrenzen (Variante B). Die Orientierung der N-, W-, und Südgrenzen des Modells entspricht den Orientierungen von Variante A. Im Gegensatz dazu wurde ein gerader Modellrand im O verwendet, was z.B. eine größere Ausdehnung des Modells nach NO zur Folge hat. Hiervariieren die Spannungsorientierungen von West nach Ost weniger.

Dabei hat sich herausgestellt, dass Variante A für die Modellierung günstiger ist als Variante B, um die großräumigen lateralen Variationen des Feldes der größten horizontalen Hauptspannungen nachzubilden (Abb. 24 und 25).

Da die Modellregion über die Grenzen von Baden-Württemberg hinausgeht und damit auch über den Bereich, der durch das geologische Landesmodell abgedeckt ist, musste herausgearbeitet werden, wie der Verlauf der Stratigraphie in die angrenzenden Bundesländer erfolgt (Abb. 26). Dazu wurde Literatur eingebunden und u.a. Experten befragt, die aufgrund ihrer Tätigkeit Einblick in aktuelle und regionale Seismik haben. Teilweise werden die Schichten horizontal extrapoliert, aber für die Vogesen und den Odenwald wurde z.B. der Grundgebirgslayer der Topographie angeglichen. Dies erfordert das Kombinieren unterschiedlicher Datensätze und ist äußerst zeitaufwändig- selbst dann, wenn alle Daten schon vorliegen würden, was nicht gegeben war. Daraus entstehen dann im GoCAD-Format Modell-Schichten für die einzelnen Stratigraphien. Abb. 26 zeigt das TOP Grundgebirge für den Modellraum.

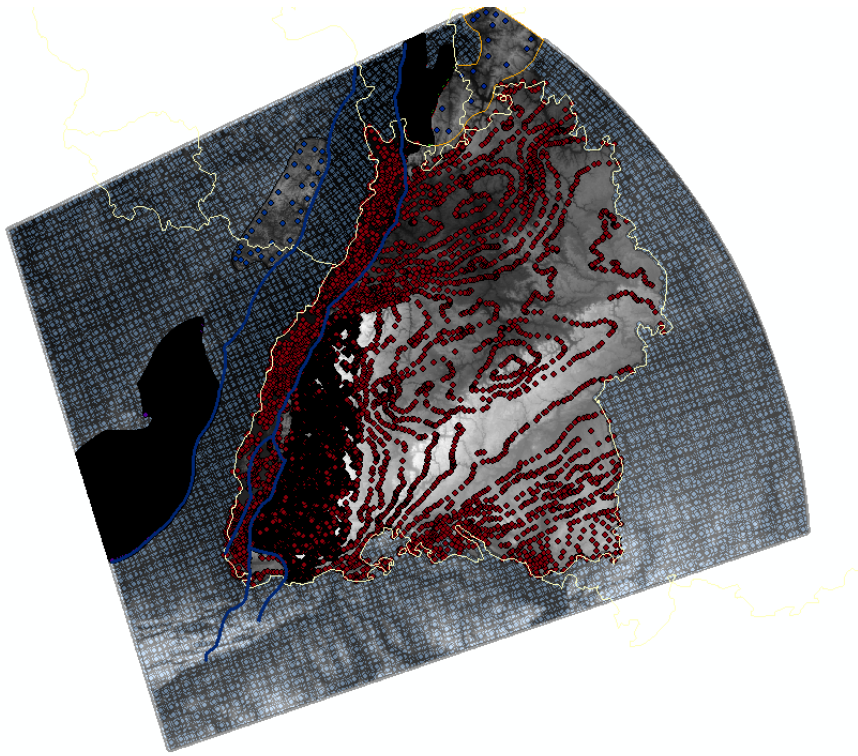


Abb. 26: Die Abb. zeigt die Tiefenlinien des kristallinen Grundgebirges aus dem geologischen Landesmodell und gibt gleichzeitig eine Übersicht über die Modellbereiche, von denen keine Eingangsdaten, wie z.B. das geologische Landesmodell, existieren. Diese Flächen müssen anhand anderer Datenquellen ergänzt werden. Obwohl sie außerhalb des Fokus Baden-Württemberg liegen, haben sie doch Einfluss auf Baden-Württemberg. Würde man z.B. die Vogesen als flache Ebene modellieren, so würden sich die Fehler zumindest im südwestlichen Baden-Württemberg bemerkbar machen.

Die Interpolation der shapefile Punkte zu IGES-Flächen, die in Hypermesh überführt werden können, erfolgt derzeit schrittweise. In Abb. 27 ist als Beispiel das Grundgebirge aufgezeigt. Deutlich sieht man, dass im Schwarzwald das Grundgebirge an der Oberfläche liegt und nach Osten in der Tiefenlage zunimmt. So wie für das Grundgebirge werden weitere Flächen in IGES umgesetzt, um sie dann mit den Störungen zu verschneiden.

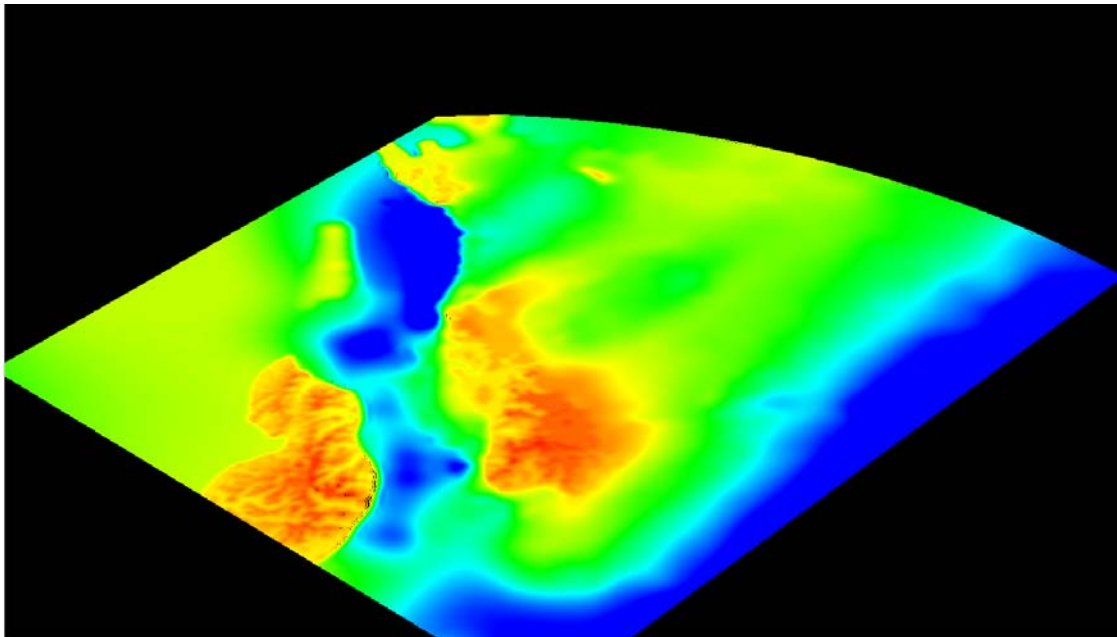


Abb. 27 GoCAD Modell des Kristallinen Grundgebirges

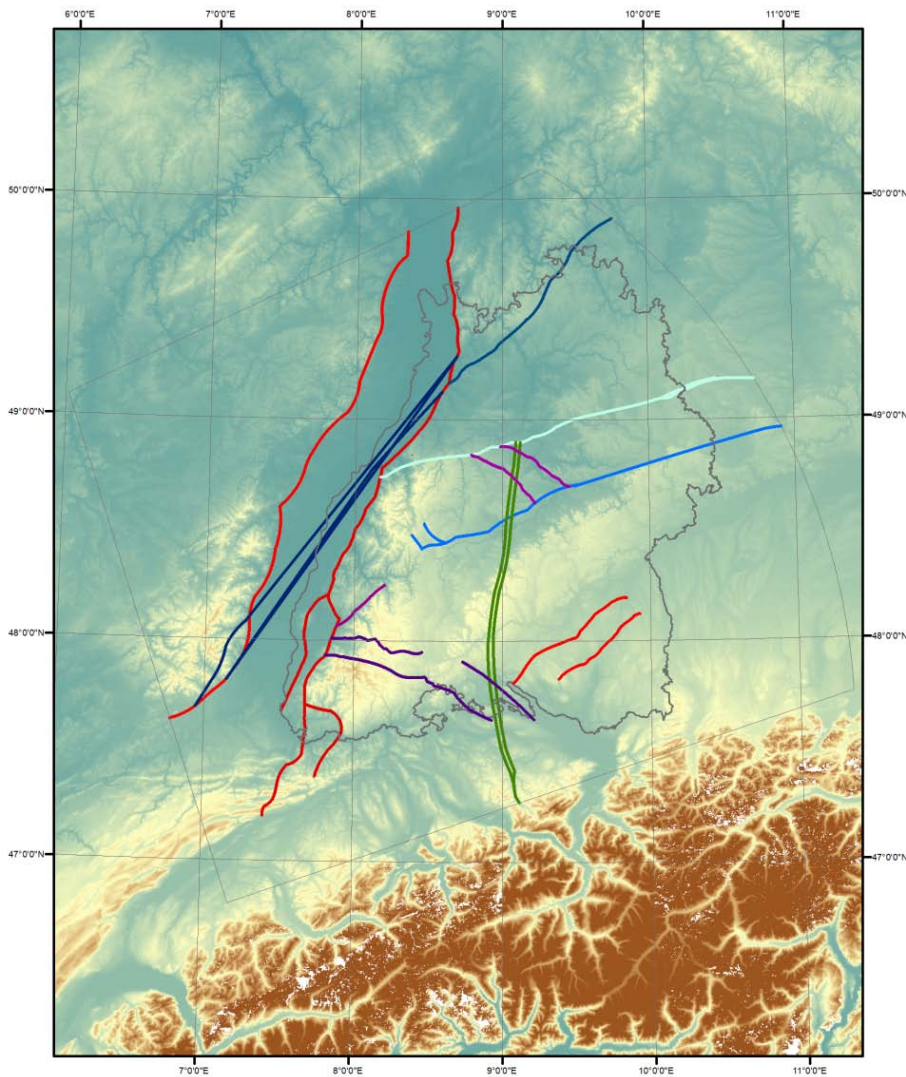


Abb. 28: Störungszonen in Baden-Württemberg, die in das 3D Geodynamik Modell übernommen werden.

Für die Festlegung der Störungen, die ins Modell übernommen werden, muss deren Relevanz beurteilt werden. Dies ist in Kooperation mit Dr. Schwarz, Dr. Röckel und Dr. Grimmer erfolgt. Damit konnte eine Auswahl an Störungen, die in dieses Modell übernommen werden, getroffen werden (Abb. 28.)

Auch wenn die heutige Computertechnik eine wesentlich größere Elementzahl als noch vor 5 Jahren zulässt, müssen bei der Modellbildung gewisse Abstriche in Kauf genommen werden und für dieses Basis-Modell wurden folgende Störungen zur Implementation ins Modell ausgewählt:

1. Oberrheingraben Hauptverwerfungen
2. Albstadt-Scherzone
3. Fildergraben
4. Neckar-Jagst-Furche
5. Schwäbisches Lineament
6. Wiesloch-Buchen-Transferzone
7. Randstörungen des Bonndorf- und Hegau-Bodensee-Grabens
8. Randstörungen des Dinkelberg-Blocks (Wehr-Zeiningen Störung, Kandern-Hausen Störung)
9. Störungen in Oberschwaben (Fronhofen-Aulendorf-Bad-Waldsee)

2.7.8 Nutzung und praktische Verwertbarkeit

Analog zum BW-Modell ist auch bundesweit eine Spannungs-Modellierung geplant (s. extended Abstract Reiter et al., 2014), in die sukzessive geologische und neotektonische Strukturen eingebaut werden können. Auch dieses wird mit den Spannungsbeobachtungen kalibriert werden. Dieses Modell muss aber für die einzelnen Bundesländer durch Detailmodellierungen (wie unser BW-Modell) ergänzt werden.

Auch am KIT und LFZG ist vorgesehen, weitere Forschungsarbeiten auf diesem Modell aufzusetzen. Teile des Modells können z.B. neu vernetzt werden, wenn weitere Strukturen eingebaut werden sollen bzw. wenn eine spezielle Stratigraphie untersucht werden soll. Dies könnte auch im Hinblick auf die Lagerung von Abfällen im Untergrund oder für die Einrichtung von Gasspeichern benötigt werden.

Die Modellergebnisse werden insbesondere auch mit den Nivellement–Untersuchungen (Fuhrmann 2012, Fuhrmann 2014, in press) verglichen, z.B. um herauszufinden, wie groß die tektonische Komponente in den beobachteten Hebungen bzw. Senkungen ist. Die Spannungsmodellierung kann helfen, zu einem besseren Verständnis der Seismizität in Baden-Württemberg zu gelangen, insbesondere in Regionen, in denen potenziell reaktivierbare Störungen im Modell enthalten sind. Auch hier bieten sich weitere lokalere Studien e.g. für Slip Tendency Untersuchungen an.

2.7.9 Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer auch in projektfremde Anwendungen und Branchen

Die Modellstruktur soll über das LGRB in Freiburg auch anderen Gruppen zugänglich gemacht werden, damit weitergehende Modellierungen zu anderen Aspekten erfolgen können (z.B. Porendruckverteilungen oder noch kleinräumigere Modellierungen auf der Basis der im Modell erzielten Randbedingungen z.B. im Hinblick auf die Lagerung radioaktiven Abfalls, analog zu den Modellierungen der NAGRA in der Schweiz).

2.7.10 Veröffentlichung des Ergebnisses

Für die Veröffentlichung der Ergebnisse sind gemeinsame Veröffentlichungen insbesondere mit dem Institut für Geodäsie und dem Geophysikalischen Institut des KIT geplant.

2.7.11 Literatur

- Buchmann, T., Connolly, P., 2007. Contemporary kinematics of the Upper Rhine Graben: A 3D finite element approach, *Global and Planetary Change* 58, 287–309.
- Buchmann, T., 2008. 3D multi-scale finite element analysis of the present-day crustal state of stress and the recent kinematic behaviour of the northern and central Upper Rhine Graben. Ph.D., Faculty of Earth and Life Sciences, Vrije Universiteit Amsterdam, the Netherlands.
- Fuhrmann, T. Heck, B., Knöpfler, A., Masson, F., Mayer, M., Ulrich, P., Westerhaus, M., Zippelt K. 2012. Recent surface displacements in the Upper Rhine Graben - Preliminary results from geodetic networks, *Tectonophysics*, doi: 10.1016/j.tecto.2012.10.012.
- Fuhrmann, T. 2014 in press, personal communication
- GeORG-Projektteam 2013. Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben, Fachlich-Technischer Abschlussbericht des INTERREG-Projekts GeORG, Teil 1. – LGRB-Informationen, 28: 103 S.; Freiburg i. Br.
- Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., Reinecker, J., Kurfeß, D., and Müller, B., 2008. The World Stress Map database release 2008 doi:10.1594/GFZ.WSM.Rel2008
- Reiter, K. Heidbach O. Müller, B. Reinecker, J. und T. Röckel, Germany's next Stress Map, DGMK-ÖGEW Frühjahrstagung 2014, Fachbereich Aufsuchung und Gewinnung, Celle, 24./25. April 2014
- Schwarz, M., Henk, A. 2005. Evolution and structure of the Upper Rhine Graben: insights from three-dimensional thermomechanical modelling, *Int. J. Earth Sci. (Geol Rundschau)*, 94, 732-750.

3 Quantitative Analyse der Vollständigkeit des instrumentellen Erdbebenkatalogs von Baden-Württemberg - ausführlicher Bericht

Dipl. Geologe Gregor Mokele und Prof. Dr. Manfred Joswig, Institut für Geophysik der Universität Stuttgart

3.1 Vorwort

Der deutsche Kraftwerkspark beruht vor allem auf konventionellen Energieträgern (Stein- und Braunkohlen, Erdgas, Mineralöl, Kernkraft etc.). In den kommenden Jahren wird es zu einer Neuausrichtung des gesamten Kraftwerkspark hin zu einer überwiegend auf erneuerbaren Energiequellen basierenden Energieversorgung kommen (Umweltbundesamt, UBA).

Deutschland und die Europäische Union haben zum Ausbau der erneuerbaren Energieträger konkrete Ziele festgelegt. Der EU-Ministerrat hat im März 2007 beschlossen, den Anteil aller erneuerbarer Energien (Strom, Wärme und Kraftstoffe) am Brutto-Endenergieverbrauch in der Staatengemeinschaft bis zum Jahr 2020 auf 20 Prozent anzuheben. Mit der 2009 in Kraft getretenen EU-Richtlinie 2009/28/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen wurde dieses europäische Gesamtziel in nationale Ausbauziele überführt. Der Anteil aller erneuerbaren Energien am Brutto-Endenergieverbrauch in Deutschland soll demnach bis 2020 auf 18 % steigen (UBA).

Tiefengeothermische Anlagen tragen bisher nur zu einem geringen Teil zur Energieversorgung Deutschlands bei. Im süddeutschen Raum sind die Kraftwerke bei Unterhaching in Bayern, in Bruchsal, in Landau und Insheim in der Pfalz zu nennen. Obgleich bereits im Jahr 2003 in einer Studie des TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) auf die großen Potentiale der Tiefengeothermie hingewiesen wurde (TAB, 2003), ist eine deutliche Nutzungssteigerung bisher ausgeblieben. Während in der Studie beispielsweise technische Probleme und die Bereitstellungsfrage von Nah- und Fernwärmenetzen als Hemmnisse aufgezeigt werden, bietet sich heute, nach den Vorfällen in Basel ein gänzlich anderes Bild der Lage. Die Sensibilität der Menschen vor Ort ist hinsichtlich der Vorhaben von Energieerzeugern (wie in Basel) gewachsen. Die Folgen der Stimulation des tieferen Untergrunds sind spürbar geworden.

In der vorliegenden Arbeit soll und wird keine Stellung pro oder contra der Tiefengeothermie bezogen werden. Es bleibt jedoch festzuhalten, dass sich der süddeutsche Raum, speziell der Oberrheingraben und das den Alpen vorgelagerte Molassebecken wie kaum ein zweites Gebiet in Europa für die Nutzung von geothermischer Energie eignet. Die vorhandene thermische Energie ist jedoch, wie etwa im Oberrheingraben, an das Auftreten von Erdbeben gekoppelt. Durch die Ausdünnung des lithosphärischen Mantels entlang der Nord-Süd gerichteten Linie von Rhône und Rhein erhöht sich der Wärmefluss und aufgrund des Vorwärtsdrucks des Alpenkörpers kommt es zwangsläufig zu tektonischer Einspannung im gesamten süddeutschen Raum.

Das unvermittelte Auftreten des „neuen“ Erdbebenherds der Zollernalb – bis 1911 kaum in Erscheinung getreten - zu Beginn des vorigen Jahrhunderts und der Erdbebenschwarm von Groß-Gerau im 19. Jahrhundert zeigen, dass eine Prognose über kommende Erdbebenaktivitäten schwierig ist. In der hier vorliegenden Arbeit soll versucht werden, ein Bild der Vollständigkeit der Erdbeben detektionen zu zeichnen.

3.2 Einleitung

Unter speziellen Bedingungen können die Installation und der Betrieb tiefer geothermischer Anlagen die lokale Seismizität beeinflussen. Für einen Großteil der ortsansässigen Bevölkerung entsteht dabei der Eindruck, diese Erdbeben seien von der Geothermie verursacht und treten in Gebieten auf, die vorher und ohne Geothermie auch in Zukunft aseismisch wären. Dieser Eindruck scheint selbst durch Erdbebenkataloge bestätigt zu werden, denn sie enthalten etwa bei Landau viele Beben nach Beginn der geothermischen Aktivitäten, aber keine Ereignisse davor (Abschlussbericht der Expertengruppe „Seismisches Risiko bei hydrothermalen Geothermie“, 2009). Die Expertengruppe kommt zu dem Schluss, dass ein kausaler Zusammenhang „sehr wahrscheinlich“ ist.

Bei der Überwachung geothermischer Kraftwerke und der Auswirkungen deren Betriebs kommen häufig Bohrlochseismometer zum Einsatz. Diese haben gegenüber den Oberflächenstationen von „regulären“ Erdbeben diensten in der Regel den Vorteil eines größeren Signal-Rausch-Verhältnis. Zudem ist die Nähe zum Herd minimal. Dies wirkt sich erheblich auf die Detektion und Lokalisierung kleinster Mikrobeben aus. In der Folge enthalten die publizierten Ergebnisse der Betreiber eine Vielzahl von Beben, die vorher, mit den Mitteln des regionalen Erdbeben diensts (zum Beispiel der Landeserdbeben dienst - LED), nicht haben detektiert werden können.

Als Ergebnis dieser Forschungsarbeit wird man unterscheiden können, ob an einzelnen Stellen Baden-Württembergs Erdbeben in der Vergangenheit auftraten, nicht auftraten, oder vielleicht auftraten, aber nicht gemessen werden konnten. Dieser letzte, kritische Fall bedeutet, dass wir bei dann aktuell auftretenden Erdbeben nicht mehr klar unterscheiden können, ob es sich um natürliche, bisher übersehene Seismizität handelt oder um „getriggerte“ beziehungsweise induzierte Erdbeben - mit entsprechend weitreichenden Implikationen für die politische Diskussion um Erdbeben, die durch Geothermie verursacht wären.

Datengrundlage dieser Arbeit sind Bulletin-Daten, die der LED auf seiner Webseite zur Verfügung stellt. Für die Jahre vor 2010 sind sie komplett über die Webseite des LED abrufbar, für 2010 und 2011 wurden sie uns freundlicherweise auf Anfrage zur Verfügung gestellt.

Eine der größten Herausforderungen bei diesem Projekt stellte die geringe Zahl an registrierten Beben dar. Dies mag angesichts von über 2200 Ereignissen in den Jahren 1996-2011 oder auch für langjährige Bewohner des südlichen Oberrheingrabens oder der westlichen Schwäbischen Alb seltsam anmuten, doch für weite Gebiete von Baden-Württemberg ist eine sehr niedrige Erdbebenzahl zu verzeichnen. Aufgrund dieser Einschränkung haben wir neben dem Katalogbezogenen Ansatz die Probabilistische Methode als sehr effektives Werkzeug zur Bestimmung der Vollständigkeitsmagnitude eingesetzt.

3.3 Grundlagen

3.3.1 Die Vollständigkeitsmagnitude M_c

Die Fähigkeit seismischer Netze zur Ereigniserfassung wird durch eine in Raum und Zeit veränderliche Detektionsschwelle beschrieben. Stehen genügend Katalogdaten seismischer Ereignisse zur Verfügung, kann mit Ableitung einer ebenfalls raumzeit-abhängigen Magnitude M_c als Vollständigkeitschwelle beschrieben werden, bis zu welcher Empfindlichkeit alle statistisch erwartbaren Erdbeben erfasst wurden, d.h. der Katalog vollständig ist.

Die Magnituden-Häufigkeitsbeziehung nach Gutenberg-Richter (G-R) beschreibt das empirisch gefundene Verhältnis zwischen der logarithmierten Anzahl der Ereignisse und derer Magnituden. Diese Gerade knickt im Bereich kleiner Magnituden zu weniger Ereignissen hin ab – nicht wegen fehlender Beben, sondern wegen des Nichterfassens dieser Beben im Rauschen der seismischen Bodenunruhe. Der Knickpunkt wird als Vollständigkeitsmagnitude M_c bezeichnet. Alle Ereignisse, die mindestens die Stärke M_c besitzen, werden im Überwachungsraum des Netzwerkes detektiert. Die Gleichung

$$\log_{10} N = a - bm$$

beschreibt das Verhalten der Gerade die sich aus der G-R-Beziehung ergibt, wobei N die Zahl von Erdbeben der Stärke m , a der y-Achsenabschnitt und b die Steigung der Geraden im logarithmischen Maßstab ist. Abbildung 29 verdeutlicht diesen Zusammenhang zwischen Häufigkeit und Stärke von Erdbeben.

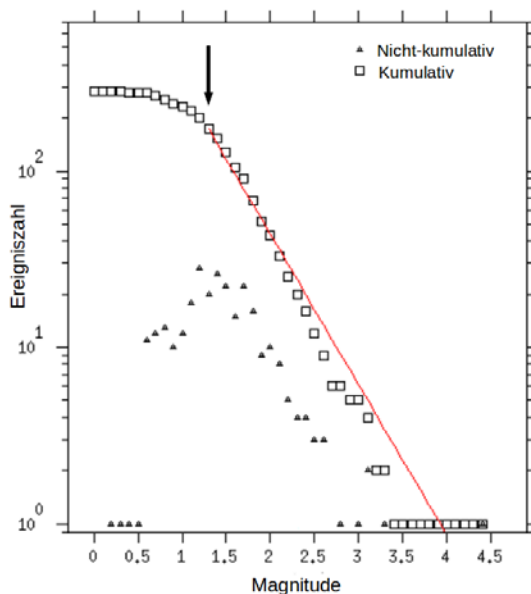


Abb. 29: Die Magnituden-Häufigkeitsbeziehung nach Gutenberg-Richter. Die Steigung der roten Linie entspricht dem b -Wert. Der Pfeil weist auf eine mögliche Vollständigkeitsmagnitude hin. Erstellt mit der Software ZMAP (Wiemer, 2001); leicht verändert.

Um ein genaues Bild von M_c zu erhalten, ist die Kenntnis von b von fundamentaler Bedeutung. In einer gesonderten Untersuchung wird das Institut für Geophysik der Universität Stuttgart testen, ob es möglich ist, den b -Wert an einzelnen Lokalitäten durch Kurzzeit-Messungen einzugrenzen und somit die G-R-Beziehung bis in den negativen Magnituden-Bereich hin zu erweitern.

Grundsätzlich werden als Magnitudenangabe die sogenannten Lokalmagnituden (ML) verwendet, die für die in Baden-Württemberg auftretenden Erdbebenstärken den Werten auf der Richter-Skala entsprechen. Arbeiten zum Thema Vollständigkeitsmagnitude verschiedener Länder gibt es unter anderem von Sagar & Leonard (2007), Schorlemmer et al. (2010) und Mignan et al. (2010).

3.3.2 Seismisches Rauschen

Ein wesentlicher Faktor, der die Detektionsfähigkeit einer Station bestimmt, ist das Signal/Noise-Ratio, also das Amplitudenverhältnis zwischen Signal und Hintergrundrauschen. Liegt die Signalstärke bei oder unterhalb eines an der Station vorherrschenden Hintergrundrauschens, ist eine Detektion nicht mehr möglich (siehe Abb. 30). Die Stärke und Art des Hintergrundrauschens wird durch verschiedene Faktoren gesteuert. Es sollte zwischen natürlicher und anthropogener Quelle unterschieden werden. Natürliche Quellen sind beispielsweise die Brandungen an den Meeresküsten, Bodenbewegungen durch Bäume, die starkem Wind ausgesetzt sind oder Fließgewässer. Anthropogene Quellen sind beispielsweise der Straßen-, Flug- oder Eisenbahnverkehr, Industriegebiete, Kraftwerke, Baustellen und Landwirtschaft. Die Stärke des anthropogenen seismischen Rauschens ist tageszeitlichen, wöchentlichen und jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen. Die Varianz im Tagesverlauf wurde in einer Arbeit von Rydelek & Sacks (1989) bereits zur Ermittlung der Vollständigkeitsmagnitude herangezogen.

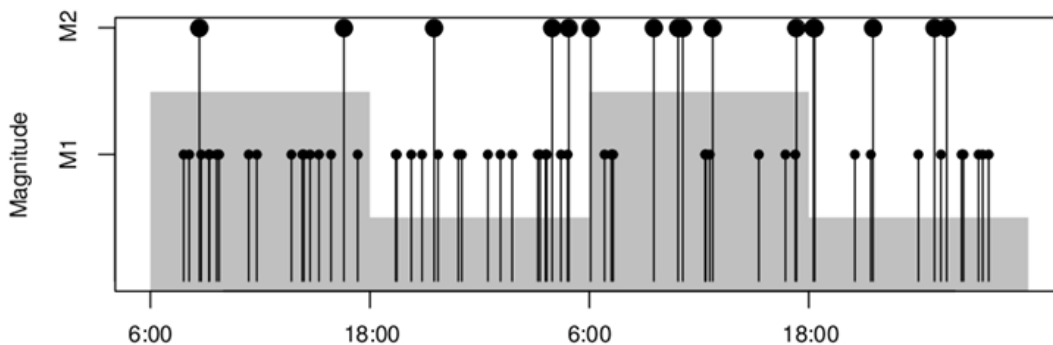


Abb. 30: Detektionsgrenzen in Abhängigkeit von der Tageszeit. Die eingegrauten Bereiche stehen für das Niveau des Hintergrundrauschens. Ein schwaches Beben der Stärke M1 entgeht tagsüber der Detektion. Aus: Mignan & Woessner, 2012. (Originalbild aus Rydelek & Sacks, 1989)

In einer kürzlich veröffentlichten Studie zeigen Jose et al. (2013), dass der Schluss, die Detektionsfähigkeit ist unmittelbar an das Ausmaß des Hintergrundrauschens gekoppelt, nicht immer zutreffend ist. Durch Wellenleitereffekte und Dämpfungsprozesse aufgrund der vorherrschenden Geologie kann eine Seismometerstation trotz günstiger Rauschverhältnisse schlechte Detektionseigenschaften besitzen und umgekehrt. Dies impliziert eine Beurteilung der Detektionsfähigkeit einer Station nicht nur anhand des Hintergrundrauschens, sondern auch anhand der statistischen Häufigkeit von Detektionen und der Art des Untergrunds.

3.3.3 Geologie und Erdbebengebiete von Baden-Württemberg

Die prägende Kraft hinter dem geologischen Erscheinungsbild Baden-Württembergs stellt die Alpen-Orogenese dar. Die seit mesozoischer Zeit nach Norden gerichteten Deckenüberschiebungen und die dadurch resultierende Deckenauflast führten zum Verkippen der Süddeutschen Scholle nach Südost. Die Folge ist die Herausbildung der Schichtstufenlandschaft im mittleren Teil Baden-Württembergs und der Ausbildung eines Beckens im Alpenvorfeld. Dadurch werden einerseits triassische und jurassische Gesteine freigelegt und erodiert (Schwäbische Alb, Keuperbergland), andererseits aber auch Raum für weitreichende Sedimentation von Erosionsschutt aus den Alpen geschaffen (Molassebecken).

Im Westen Baden-Württembergs bildete sich der Oberrheingraben seit dem späten Paläogen. Er ist Teil einer überregionalen Bruchzone, die vom Mittelmeer bis zur Nordsee reicht. Einer extensiven Phase zur Frühzeit der Grabenbildung schloss sich eine sinistrale Seitenverschiebungsphase an, die bis in die heutige Zeit andauert, wie die Auswertung seismischer Daten belegt. Die herausgehobenen Grabenschultern wurden teilweise bis zum Grundgebirge erodiert (Granite und Metamorphite des Schwarzwaldes), während sich im Graben mehrere Kilometer Sediment akkumulierte. Die Vulkangebiete Hegau, Nordwest-Alb und Kaiserstuhl sind nicht mehr aktiv und stellen daher keine Quelle für seismische Aktivität dar.

Betrachtet man die Verteilung von Erdbebenereignissen weltweit, so dominieren die konvergenten und divergenten Plattenränder das Bild. Intraplattenseismizität ist seltener, aber nicht ungewöhnlich. Lediglich alte Kratone, also Gebiete wie der skandinavische Schild, weisen so gut wie keine Seismizität auf. Die Gründe für die Seismizität im Gebiet von Baden-Württemberg liegen im hier SSO-NNW-gerichteten Spannungsfeld der Alpen. Die unterschiedliche nordwärts gerichtete Relativbewegung zwischen den westlichen und den östlichen Gebieten Baden-Württembergs sorgt für Scherspannungen, die sich in Erbeben entladen. Exemplarisch sei hier auf das Erdbebengebiet der westlichen Schwäbischen Alb verwiesen, deren Herdflächen und Epizentren diesem Spannungsfeld folgen (Schneider, 1971).

Die Erdbebenaktivität in Baden-Württemberg konzentriert sich rezent auf folgende Regionen: den Oberrheingraben, die deutsch-schweizerische Grenze, die westliche Schwäbische Alb und die Region Oberschwaben/Sigmaringen. Die stärksten Beben der letzten 50 Jahre wurden 1978 bei Albstadt (ML=5.7) und 2004 bei Waldkirch (ML=5.4) registriert. In Abbildung 31 sind die Erdbeben im Südwesten Deutschlands für die Zeiträume 1996-2005 und 2006-2011 dargestellt. Die sehr auffällige Häufung von Erdbeben im Saarbrücker Raum ist bergbauinduziert und tritt in den Jahren 2006-2011 stark zurück.

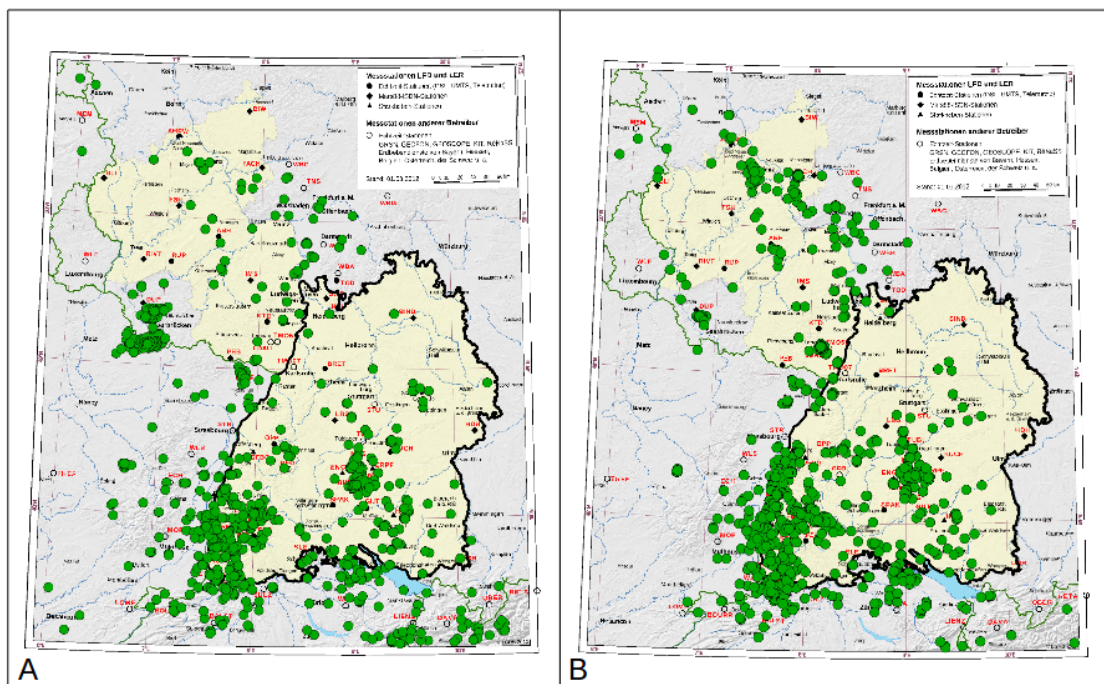


Abb. 31 Vergleich der Seismizität für die Jahre 1996-2005 (A) und 2006-2011 (B). Daten und Kartenhintergrund vom Landeserdbebendienst (LED, Homepage).

3.3.4 Historische Erdbeben-Aufzeichnungen

Die ersten Berichte über Erdbeben auf dem Gebiet des heutigen Baden-Württembergs stammen aus dem Mittelalter. Im Jahre 1356 verwüstete ein überaus heftiges Erdbeben die Stadt Basel am oberen Oberrheingraben. Die Aufzeichnungen sind natürlich nicht vollständig, aber es zeichnet sich für die rein makroseismisch, also nicht-instrumentell, erfassten Erdbeben eine klare Zonierung ab. Die besonders betroffenen Gebiete sind und waren (wie bereits im vorigen Abschnitt dargelegt) der Oberrheingraben, die deutsch-schweizerische Grenze sowie die westliche Schwäbische Alb (seit 1911) und die Region Sigmaringen/Oberschwaben. In dem Erdbebenkatalog für Deutschland (Leydecker, 2011) sind zahlreiche Daten der vergangenen Jahrhunderte zusammengefasst.

In der vorliegenden Arbeit wird nur auf die instrumentell belegten Beben eingegangen, da makroseismisch verspürte Beben in der Regel nicht genau lokalisiert wurden und bezüglich der Magnitudeneinstufung mit Fehlern behaftet sind. In der Arbeit von Schweitzer & Lee (2003) wird auf die Anfänge und Entwicklung von Seismometeraufzeichnungen eingegangen.

3.3.5 Das Stationsnetz in Südwestdeutschland

Bei der Betrachtung des Stationsnetzwerks in Südwestdeutschland (siehe Abb. 32) muss zwischen den sogenannten Echtzeit-Stationen, MARS88-ISDN-Stationen und Starkbeben-Stationen unterschieden werden. Letztere sind im Zusammenhang mit dieser Arbeit weitgehend unbedeutend, da es sich um Geräte zur Aufzeichnung von Bodenbeschleunigungen im Zusammenhang mit schweren Erdbeben mit Schadenswirkung handelt. Eine Ausnahme bildet die Station Brauhartsberg (BHB), welche wegen einer hohen Zahl an Detektionen in die Liste der in dieser Arbeit bearbeiteten Stationen aufgenommen wurde.

Die Echtzeit-Stationen (auch Online-Stationen genannt) sind über unterschiedliche DFÜ-Kanäle (UMTS, DSL, Telemetrie) direkt und jederzeit mit der Rechenzentrale des LED in Freiburg/Breisgau verbunden. Die MARS-Stationen können ihre Daten auf „telefonische Anfrage“ an den LED übermitteln. Dies erfolgt, nachdem ein Ereignis durch mindestens drei Online-Stationen registriert wurde, und Daten für die Lokalisierung und Bewertung benötigt werden. Das MARS-Netz selbst verhält sich somit passiv. Die Arbeit des LED erfolgt in enger Kooperation mit den Erdbebendiensten Frankreichs (RéNaSS), der Schweiz (SED), Hessens, Rheinland-Pfalz, Bayern sowie auch Institutionen wie dem KIT, der Universität Frankfurt und Stuttgart und auch der Firma Lennartz in Tübingen. All diesen Kooperationspartnern gebührt ein großer Dank. Ausführliche Informationen zur Arbeit des LED und der technischen Ausstattung finden sich im Jahresbericht 2000 (Brüstle & Stange, 2002) sowie im Informationsheft 11 des Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB, 1999). An dieser Stelle möchten wir uns bei den Mitarbeitern des LED für Beratung und die Weitergabe von Informationen bedanken.

Die Entwicklung des Stationsnetzes erfolgte kontinuierlich über die vergangenen Jahrzehnte. Zudem wurde das Überwachungsgebiet nach Nordwesten hin erweitert. Die wesentlichen Änderungen, die maßgeblich zu einer Änderung der Vollständigkeitsmagnitude geführt haben, sind laut LED:

- a) Stetige Erweiterung des Echtzeitnetzes durch Aufrüstung (Beispielsweise Umstellung von MARS/ISDN auf DSL)
- b) Neueinrichtung von Stationen
- c) Einbindung von Onlinestationen anderer Betreiber (siehe oben)
- d) Aufrüstung bestehender Onlinestationen bezüglich Erfassungs- und Übertragungstechnik (von 12 bit auf 24 bit-Systeme; 1- auf 3-Komponenten-Seismometer)
- e) Verbesserungen durch Standort-Verlegungen

Die Auswirkungen der verbesserten Detektionsfähigkeit lassen sich aus Tabelle 3 entnehmen. Sie zeigt die Zahl der erfassten Erdbeben für zwei verschiedene Zeiträume, die im Zusammenhang mit dieser Arbeit von Bedeutung sind. In Abb. 33 ist für die Zeiträume 1996-2005 und 2006-2011 die kumulative Zahl der Ereignisse aufgetragen. Auch hier zeigt sich die deutliche Veränderung ab 2010.

Tabelle 3: Übersicht über die Zahl schwacher Erdbeben im Zeitraum 1996-2005 und 2006-2011.

1996-2005		2006-2011	
Magnitude	Ereigniszahl	Magnitude	Ereigniszahl
0,1	0	0,1	1
0,2	1	0,2	1
0,3	1	0,3	3
0,4	1	0,4	3
0,5	2	0,5	25
0,6	2	0,6	36
0,7	4	0,7	57
0,8	5	0,8	57
0,9	9	0,9	55
1	7	1	59
Summe	32	Summe	297

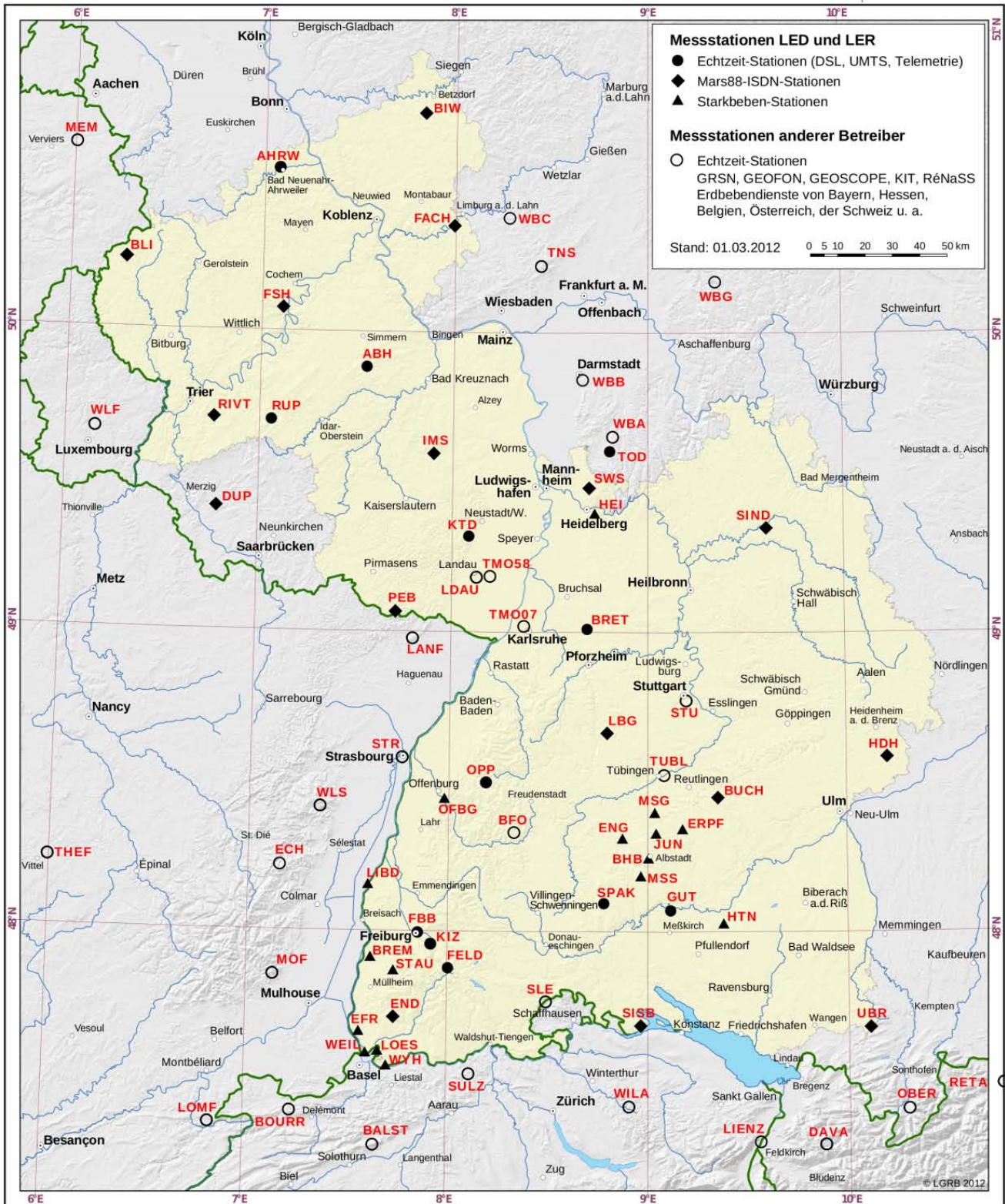


Abb. 32: Das Stationsnetz des Landeserdbebendienstes und angrenzender, kooperierender Länder im Jahr 2012. Daten und Kartenhintergrund vom Landeserdbebendienst (LED, Homepage)

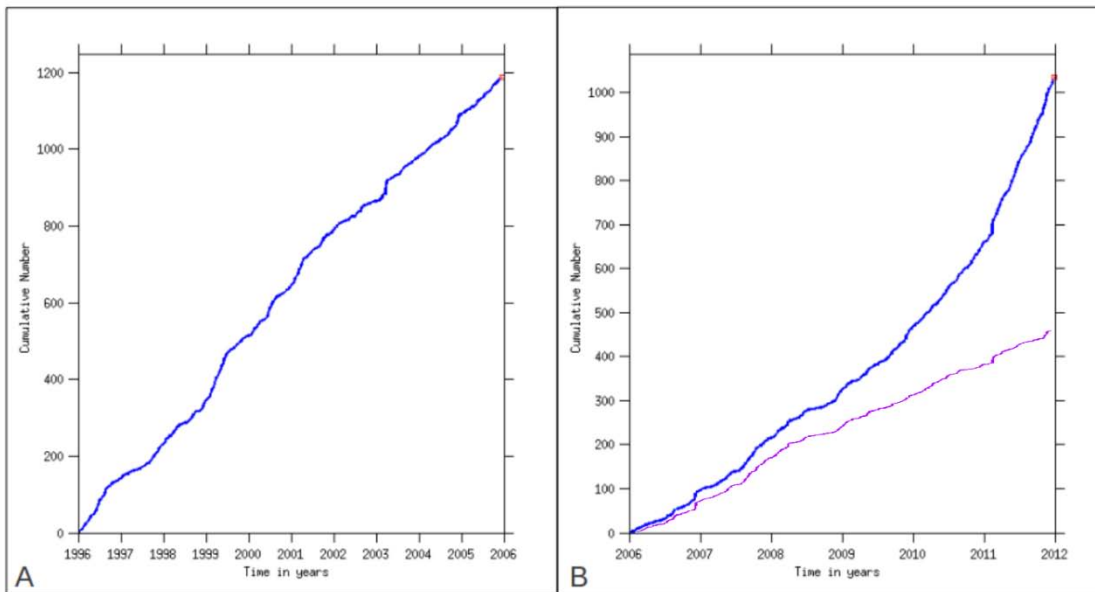


Abb. 33: Kumulative Ereigniszahlen (blaue Kurven) des Erdbebenkatalogs für 1996-2005 (A) und 2006-2011 (B). Der ansteigende Verlauf in B ist Ausdruck der gesteigerten Empfindlichkeit des Netzwerkes hinsichtlich kleiner Erdbeben. Betrachtet man nur Erdbeben mit einer Stärke ab 1.5 für 2006-2011 (in Magenta), so entfällt der Anstieg. Erstellt mit der Software ZMAP der ETH Zürich.

3.4 Datengrundlagen

Als Datengrundlage dienen die Katalogbestände des Landeserdbebendienstes von Baden-Württemberg. Es werden die Katalogdaten von 1996 bis 2011 verwendet (2225 Einträge). Die Daten von 2012 waren zur Zeit der Projektbearbeitung noch in Revision und wurden nicht verwendet.

Die Katalogdaten - Bulletins - liegen ab 1996 in digitaler Form vor (siehe Homepage des LED: <http://www.lgrb.uni-freiburg.de/lgrb/Fachbereiche/erdbebendienst>), müssen aber zum Einsatz in den weiter unten erläuterten Auswerteverfahren modifiziert und aufbereitet werden. Es sind viele Informationen - beispielsweise über Gebäudeschäden – vorhanden, welche bei der maschinellen Auswertung störend sind.

Ein Beispiel für einen Eintrag in den Bulletins sei hier gezeigt:

0019 20030211 01:13:02.1 48.02N 8.07E 14km ML=1.7 MA*LED St. Maergen SWBW

0019 Epizentrum liegt am Kapfenberg bei St. Peter/Hochschwarzwald.

0019 Der Herd ist wahrscheinlich nicht identisch mit dem des

0019 Bebens am 9.2.2003.

Nach der Konvertierung erscheint derselbe Eintrag folgendermaßen:

08.07 48.02 2003 02 11 1.7 14 01 13 0019

In der Reihenfolge ihres Auftretens liest sich der Eintrag nun: Koordinaten (Breite/Länge), Jahr, Monat, Tag, Magnitude, Tiefe, Stunde, Minute, Ereignis-Nummer (diese wird vom LED vergeben). In diesem Format sind die wesentlichen Erdbeben-Parameter vorhanden, die für die weitere Auswertung von Bedeutung ist.

Die Software ZMAP der ETH Zürich, ein umfangreiches Auswertetool für die Analyse von Erdbeben-katalogen, welches auch beim Erstellen dieser Arbeit verwendet wurde, verlangt nach einem derart aufgetrennten Format. Von besonderer Bedeutung für die vorliegende Arbeit sind die Lokalisierungsfiles, in denen zusätzlich zur Herdinformation auch die an der Detektion

beteiligten Stationen des LED angegeben werden. Aus dieser Information lassen sich stationsspezifische Kataloge für den Probabilistischen Ansatz extrahieren. (Aktuelle) Lokalisierungsfiles können von der Homepage des LED abgerufen werden. Das zu obigem Beispiel analoge Lokalisierungsfile wird hier (auf zwei Stationen gekürzt) aufgelistet:

0019 20030211 01:13:02.1 48.02N 8.07E 14km ML=1.7 MA*LED St. Maergen SWBW

0019 Epizentrum liegt am Kapfenberg bei St. Peter/Hochschwarzwald.

0019 Der Herd ist wahrscheinlich nicht identisch mit dem des

0019 Bebens am 9.2.2003.

0019

0019 MA: epi-moho next stat 25.0 km DW: from 80 to 150 km

Relocation file: 0302111d

manually created on 28.11.2003 by Geol. Survey Baden-Wuerttemberg,

LED, Freiburg, Germany at 9:45:51 UTC

LED_Network L>> Furtwangen/Black Forest/Germany, E Q=A Manual mode

DATE ORIGIN-TIME LATITUDE LONGITUDE DEPTH ML RMS NL/NM GAP

030211 1:13: 2.10 48.020N 8.070E 14.0 1.7 0.24s 32/ 8 106

ERRORS: (68%) 0.10s 1.0km 1.0km 1.0km 0.2 IT12 MA 5 3

ERROR ELLIPSE: MajAx/2= 2.0km MinAx/2= 1.0km MajAxAz=317 PS1.72 bw1

STATION	DEL	AZM	EMG	INT	ARRIVAL_TIME	WAVE	O-C	WT	StMag
1 KIZ	13	240	136	0 1	1:13: 5.68	UIP0	0.07	1.00	1.90
2	13	240	136	0 1	1:13: 8.13	IS0	0.03	0.50	0.65
3 FELD	16	199	131	0 1	1:13: 6.14	UIP0	0.10	1.00	0.80
4	16	199	131	0 1	1:13: 8.87	ES1	0.02	0.30	0.41

Diese Daten werden ebenfalls in das weiter oben gezeigte, bündige Kurz-Format übertragen. Für jede Station, die an einer Lokalisierung beteiligt war, entsteht ein eigener Datensatz. Bei einer Lokalisierung sind immer mindestens drei Stationen beteiligt, dies ist die Untergrenze zum „triggern“ der Aufzeichnung und der nachfolgenden Bewertung. In der Regel muss diese Zahl jedoch überschritten werden, um eine Lokalisierung zu beginnen. Die Genauigkeit der Magnitudenbestimmung wird vom LED (LED; pers.comm) mit +/- 0.1 bis (häufiger) 0.2 angegeben.

Durch das Auslesen aller Protokolldaten konnten 304 stationsspezifische Kataloge zusammengestellt werden. Ein Großteil dieser Stationen (sofern es sich nicht um sehr kurzzeitig aufgestellte Seismometer handelt; in diesem Fall ist der Begriff Station irreführend) taucht nur mit einem oder sehr wenigen Lokalisierung/en in den Daten auf. So haben 59 Stationen etwa nur an einem Ereignis „teilgenommen“. 162 Stationen tragen mit 30 oder weniger Lokalisierungen zum Katalogbestand bei. In der

vorliegenden Arbeit wurden nur Stationsdaten der Stationen verwendet, die über mehrere Jahre hinweg Daten geliefert haben. Den geringsten Umfang der in dieser Arbeit herangezogenen Stationen besitzt die Station BOUR in der Nordwest-Schweiz mit 185 Einträgen. Die Station KIZ bei Freiburg weist mit 1892 Lokalisierungsbeteiligungen den größten Datensatz auf. Stationen mit weniger Daten als BOUR wurden testweise aufgenommen, aber wieder ausgesondert, da sie in keiner Weise zu einer Verbesserung der Ergebnisse beitragen konnten. Insgesamt werden in dieser Arbeit 36 Stationen berücksichtigt. In einer Karte (Abb. 34) sind die in der Arbeit verwendeten Stationen markiert (Anmerkung: da die Station Basel-Blauen (BBS), 10 km SW von Basel, 2011 abgebaut wurde, fehlt sie in der Kartendarstellung des LED. Ebenso die Station Beuren (BEU), 30 km SE von Stuttgart, die bereits 2002 außer Betrieb ging).

Wichtig für die Bewertung der "Performance" der Stationen des LED und der grenznahen Stationen der assoziierten Messnetzbetreiber ist es, genaue Kenntnisse über die Betriebs- und Ausfallzeiten der Stationen zu besitzen. Die Qualität einer Station wird künstlich herab gesenkt, wenn die betreffenden Zeiten nicht aus dem stationsspezifischen Katalog gestrichen werden. Zu den betreffenden Zeiten war diese Station nicht in der Lage an Lokalisierungen mitzuwirken. Die Betriebszeiten, welche vom LED angegeben wurden, sind in nachstehender Tabelle 4 aufgeführt. Im Anhang A befindet sich die vollständige Tabelle mit den Daten der 36 Stationen, welche in dieser Arbeit von Bedeutung sind.

Tabelle 4: Betriebsbeginn der Stationen, die in dieser Arbeit von Bedeutung sind (unvollständig; siehe Text). Die Daten beziehen sich auf den aktuellen Stand. Aufgrund von Namensänderungen (zum Beispiel durch Standortverlagerungen) ist es möglich, dass einzelne Stationen bereits vorher, unter anderem Namen, in Betrieb waren. Abkürzungen der Betreiber, bei den Namen: S=SED, R=RéNaSS/GEOSCOPE, E=Erdbebendienst Rheinland-Pfalz, K=Kooperation KIT/Uni Stuttgart.

Nummer	Kürzel	Name	Länge	Breite	Höhenlage in m	Betrieb seit Jahr	Monat	Tag
1	ABH	ALTEBURG (E)	49,8817	7,5475	620	1975	1	1
2	BBS	BASEL-BLAUEN(S)	47,4644	7,5092	700	1974	6	1
3	BEU	BEUREN	48,5838	9,4153	446	1973	1	1
4	BFO	BLACK FOREST OBSERVATORY (K)	48,3301	8,3296	751	1972	1	1
5	BHB	BRAUNHARTSBERG	48,2474	9,0042	935	1982	1	1
6	ECH	ECHERY (R)	48,2158	7,1583		1985	1	1
7	END	ENDENBURG	47,715	7,7379	640	1984	12	1
8	FELD	FELDBERG IM SCHWARZWALD	47,8763	8,004	1470	1996	4	18
9	GUT	GUTENSTEIN	48,0709	9,1153	650	1997	10	14
10	HDH	HEIDENHEIM-CHARLOTTENHOEHLE	48,5843	10,207	514	1996	10	30
11	KIZ	KIRCHZARTEN	47,9562	7,9182	499	1996	6	16
12	KTD	KALMIT (E)	49,3202	8,0837	670	1971	1	1
13	LANF	LANGENBERG (R)	48,9805	7,8053		1985	1	1
14	LBG	LERCHENBERG	48,6639	8,7945	598	1995	1	11
15	LIBD	LIMBURG	48,1505	7,603	210	1985	1	1
16	LOMF	LOMONT DU CHAMESOL (R)	47,3508	6,8275		1985	1	1
17	MOF	MOLKENRAIN (R)	47,8517	7,133		1985	1	1
18	RUP	RUPPELSTEIN (E)	49,7017	7,0593	752	1976	1	1
19	SIND	SINDELDOF	49,3488	9,6057	335	1998	6	23
20	SLE	SCHLEITHEIM (S)	47,7658	8,4934		1993	1	1
21	SPAK	SPAICHINGEN-KOCHELSBERG	48,1023	8,7858	990	1997	8	12
22	SWS	SCHRIESHEIM-WILHELMSTOLLEN	49,4843	8,7008	277	2000	7	13
23	TOD	TROMM	49,6059	8,8038	570	1974	1	1
24	UBR	UEBERRUH	47,6807	10,108	895	1994	5	31
25	WLS	WELSCHBRUCH (R)	48,4128	7,3537		1985	1	1

Die fehlenden Stationsbetriebszeiten wurden anhand der Detektionsprotokolle ermittelt. Der Tag der ersten Detektion wird als Beginn des Betriebs angenommen. Ähnlich verhält es sich mit den Betriebsschlusszeiten. Das Datum der letzten Detektion in den Protokollen wird als Ende des Betriebs angesehen. Es ist zu beachten, dass es einzelne Stationen gibt, die bereits in Betrieb waren, jedoch erst nach oder im Verlauf des Jahres 1996 in die Gesamtheit der LED-Stationen aufgenommen wurde (zum Beispiel TNS / Taunus).

Um die Ausfallzeiten der Stationen zu ermitteln, wurden unveröffentlichte Ereignis-Listen, welche beispielsweise auch Sprengungen beinhalten, für die MARS-Stationen, sowie Seismogramplots teleseismischer Ereignisse (für die Online-Stationen) verwendet. Die Einträge in den Listen enthalten Informationen über MARS-Stationen, welche nicht bei einer Lokalisierung teilnehmen konnten. Die Seismogramme der teleseismischen Ereignisse bieten eine Möglichkeit, Ausfälle von Telemetrie(=Online)-Stationen zu dokumentieren. In der Regel wird jedes teleseismische Ereignis von allen Telemetrie-

Stationen empfangen. Daher können aus den Seismogrammen der teleseismischen Ereignisse auf Lücken in der Aufzeichnungsgeschichte einzelner Stationen geschlossen werden. Für das Jahr 2011 sind ab dem 4. März aufgrund von Umstellungen in den Ereignislisten keine Daten für das MARS-Netz verfügbar gewesen. Für das Telemetrienetz standen keine Seismogramme von Oktober bis Dezember 2005, Januar bis Mai 2008 sowie ab Juli 2009 zur Verfügung. Darüber hinaus wurden die stationsspezifischen Kataloge manuell nach Lücken durchsucht. Sobald in der Reihe der Ereignisse Datums-lücken größer/gleich einem Monat erschienen, wurden diese Bereiche als Ausfallzeiten eingestuft.

Als Ergebnis der Betriebs- und Ausfallzeitenanalyse konnten aus dem Gesamtkatalog des LED jeweils die Zeiträume herausgestrichen werden, welche die Qualität einer Station künstlich herabgesetzt hätten. Zu jeder der betrachteten Stationen existieren somit zwei Datensätze: Die Liste der jeweiligen Station und die Gesamtliste aller erfassten Ereignisse des LED abzüglich derer, die in Betriebsausfallszeiten der jeweiligen Station fallen. Die in schwarz gezogenen Balken repräsentieren Zeiträume, die als vollständig angesehen werden. Die grauen Bereiche repräsentieren Zeiträume, die als zu lückenhaft hinsichtlich der Erfassten Ereignisse angesehen wurden, um in dieser Arbeit verwendet zu werden. Die weißen Abschnitte innerhalb der schwarzen Balken markieren Ausfallzeiten länger als ein Monat (Siehe Abb. 35). In Einzelfällen kam es zu sehr vereinzelt Lokalisierungs-beteiligungen vor dem eigentlichen Betriebsbeginn. Wir zählen dies als Testphasen und haben diese Ereignisse nicht in die Gesamtbetrachtung aufgenommen.

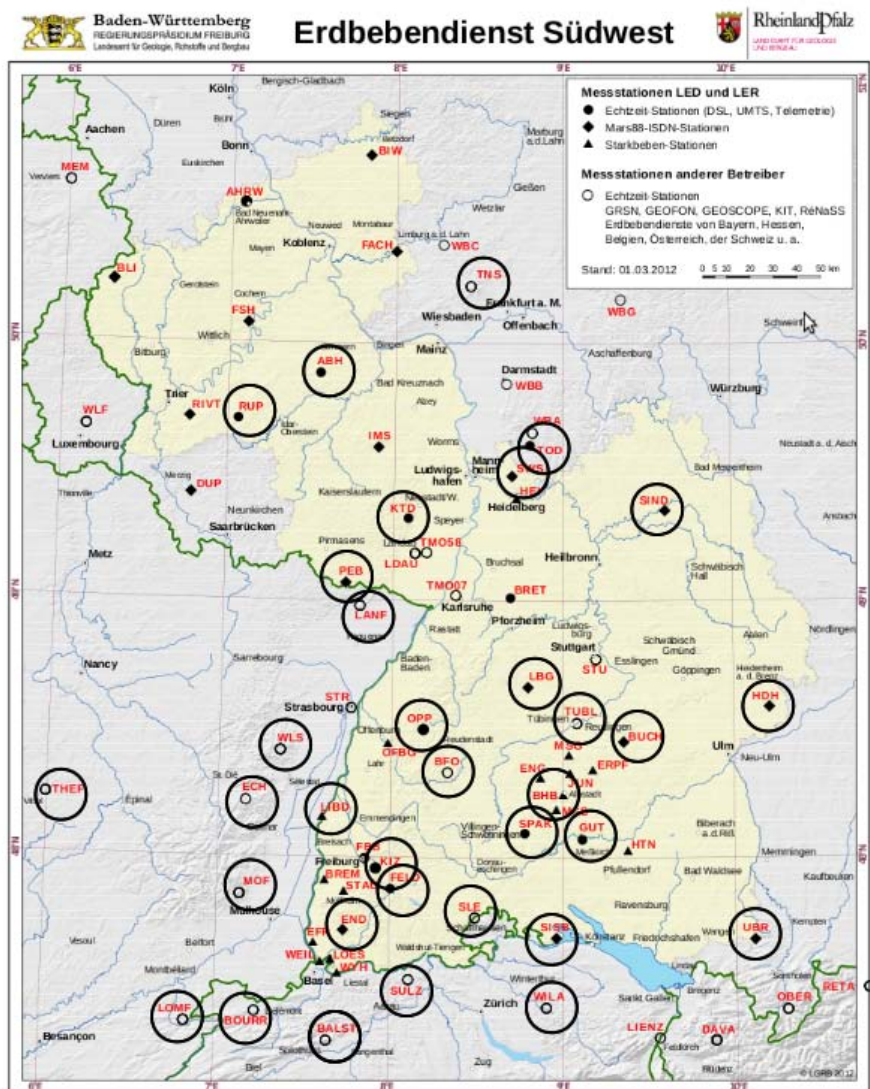


Abb. 34: Übersicht über die Seismometerstationen (schwarz eingekreist), die in dieser Arbeit von Bedeutung sind.

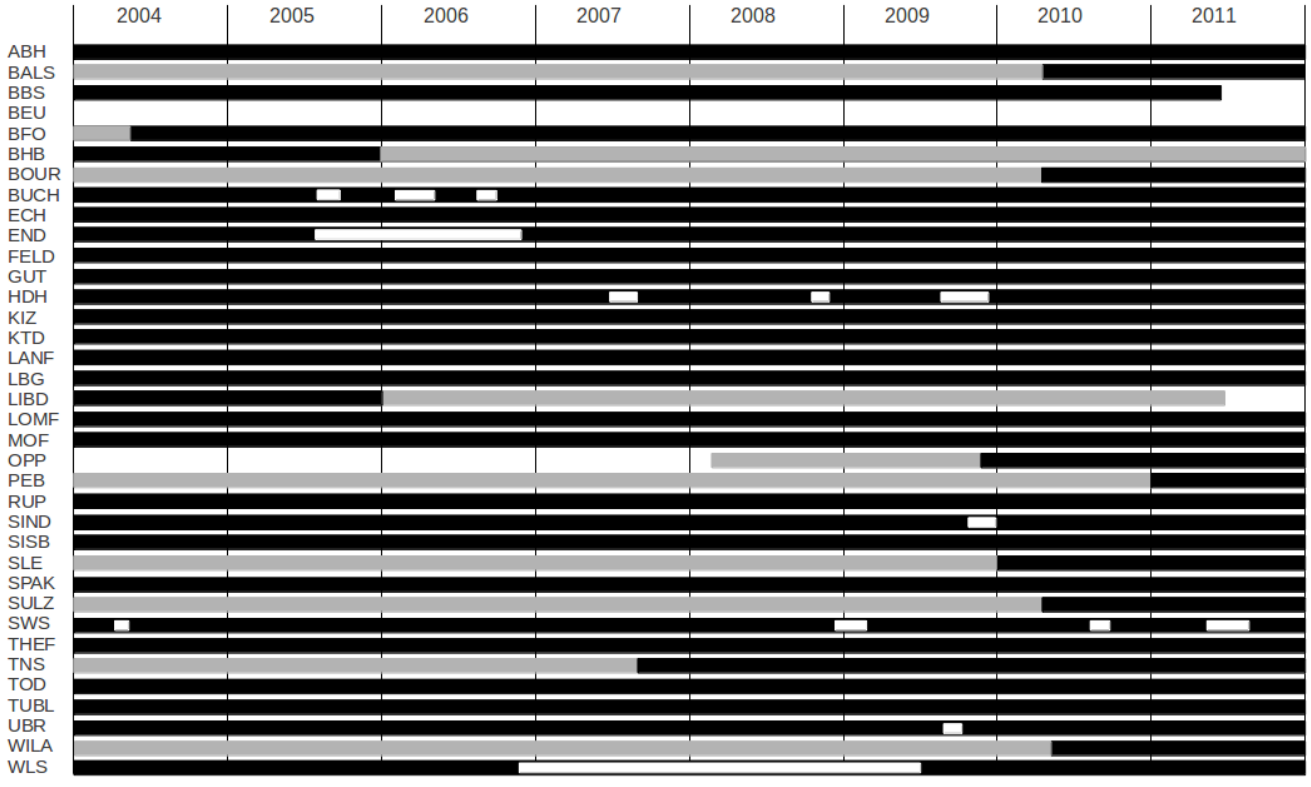
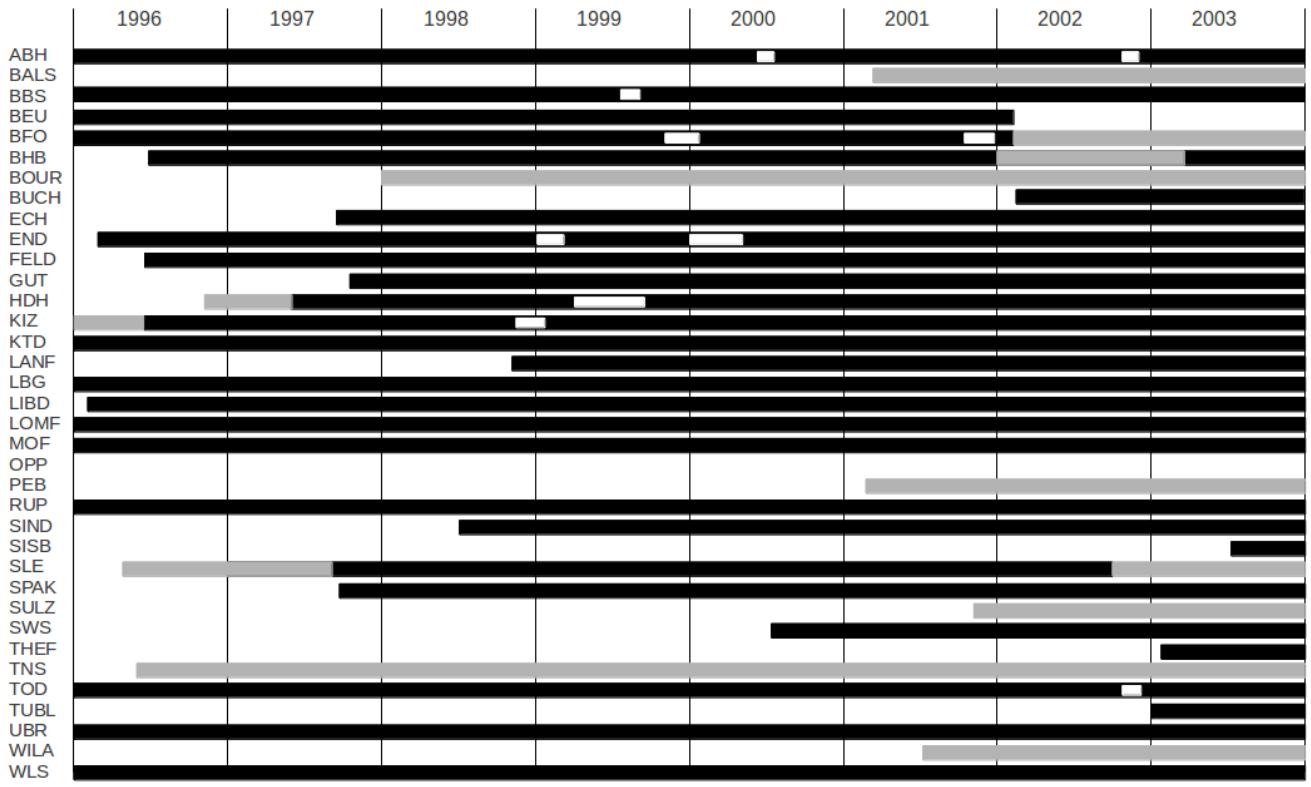


Abbildung 35: Übersicht über die Betriebszeiten der in dieser Arbeit wichtigen Stationen. Erläuterungen siehe Text.

3.5 Räumliche und zeitliche Abgrenzung

In der vorliegenden Arbeit beschränken wir uns, wie bereits im Kapitel 3.4 Datengrundlagen beschrieben, auf den Zeitraum von 1996 bis 2011. Um ein Bild der Veränderungen der Vollständigkeitsmagnitude zu erhalten, betrachten wir den Katalog in zwei zeitlich aufeinander folgenden Abschnitten, die jeweils über eine vergleichbar große Ereigniszahl verfügen. Zum einen die Jahre 1996 bis 2005 (Zeitabschnitt A), zum anderen die Jahre 2006 bis 2011 (Zeitabschnitt B). Die Zahl der Ereignisse liegt je bei 1189 beziehungsweise 1036. Um ein genaues Bild der Änderungen (Verbesserungen) für die Jahre 2010 und 2011 im Vergleich zu den vorherigen Zeiträumen zu erhalten, verwenden wir in einigen Teilen dieses Berichts zusätzlich die aus Zeitabschnitt B separierten Daten der Jahre 2010 und 2011 (Zeitabschnitt C). Es handelt sich hierbei um 571 Ereignisse. Angesichts der kurzen Zeitspanne von 2 Jahren wird, wie schon in der Beschreibung des Stationsnetzwerks angesprochen, deutlich, dass sich die Netzwerkqualität im Zeitraum C erheblich verbessert hat.

Der räumliche Rahmen der Arbeit liegt auf dem Gebiet von Baden-Württemberg. Wir haben als äußeren Rahmen der Kartendarstellungen 7° E bis 11° E und 47° N bis 50° N gewählt. Damit ist das Landesgebiet großzügig abgedeckt. Die verwendeten Daten sind nicht auf dieses Gebiet beschränkt. Stationspezifische Daten wurden auch von Stationen verwendet, die weit außerhalb liegen. Als Beispiel sei hier die Station THEF in Frankreich genannt, die auf 6° E liegt. Katalogdaten, die mit der Software ZMAP ausgewertet wurden, wurden aus einem Gebiet zwischen 6° E bis $11,5^{\circ}$ E und $46,5^{\circ}$ N bis $50,5^{\circ}$ N herangezogen. In diesem Gebiet fanden über 99 % aller Ereignisse statt. Weiter entfernt liegende Ereignisse sind in ihrer Zahl verschwindend gering und somit für eine Analyse der Vollständigkeit ungeeignet.

3.6 Die Vollständigkeitsmagnitude in Baden-Württemberg

Der LED gibt für das Landesgebiet einen Wert für M_c von rund 2.0 an. Dies ist eine vorsichtige Abschätzung für das Gesamtgebiet (Dr. Brüstle, pers. comm). In dieser Studie zeigen wir auf, dass es große regionale Unterschiede gibt. Zudem hat sich durch die verbesserte Vernetzung der Stationen seit dem Jahr 2010 eine erhebliche Steigerung der Empfindlichkeit ergeben.

Es wurden drei verschiedene Methoden verwandt, um ein umfassendes Bild der Entwicklung der Vollständigkeitsmagnitude zu zeichnen. Es sind dies der Vergleich der Detektionszahlen bei Tag und Nacht, der Probabilistische Ansatz sowie der Katalogbezogene Ansatz. Alle drei Methoden sind in der Vergangenheit in verschiedenen Studien zur Bestimmung der Vollständigkeitsmagnitude M_c verwendet worden. Der Vergleich der erfassten Erdbeben bei Tag und Nacht beispielsweise von Rydelek&Sacks(1989), der Probabilistische Ansatz von Mignan & Woessner (2012) und der Katalogbezogene Ansatz von Woessner & Wiemer (2005). Schließlich wird versucht, einen qualitativen und quantitativen Vergleich der Methoden anzustellen.

3.6.1 Variationen von M_c beim Vergleich Tag-Nacht

Da die Detektionsmöglichkeit von Erdbeben direkt an das Signal-Rausch-Verhältnis gebunden ist, lassen sich über das Vorhandensein beziehungsweise Nicht-Vorhandensein von Tag-Nacht-Unterschieden der Zahl der erfassten Ereignissen Rückschlüsse auf die Netzwerkqualität ziehen. In der Abb. 36 sind für die Zeiträume 1996-2005, 2006-2011 und 2010-2011 die gestapelten Magnitudenbereiche gegen die Tageszeit aufgetragen. Es handelt sich um die Lokalzeit (MEZ beziehungsweise MESZ), welche aus den Zeitangaben der Erdbebenkataloge (UTC-Zeit) hergeleitet wurde.

Ein deutlicher Abfall der registrierten Ereignisse zeigt sich um sechs Uhr morgens. Zur Nacht hin steigt die Empfindlichkeit deutlich an. Die Ausprägung der Unterschiede sinkt erwartungsgemäß bei größeren Magnituden. Als Merkmal der gesteigerten Empfindlichkeit des Netzwerks lässt sich eine deutliche Zunahme der Zahl kleiner Ereignisse (Magnitudenbereich 0.0 – 0.9) im Zeitraum 2006-2011 sowie 2010-2011, vor allem in den Nachtstunden (22 – 6 Uhr), erkennen.

In Abb. 37 werden die Ereigniszahlen für den gesamten Zeitraum von 1996-2011 dargestellt. Die rote Kurve stellt den sogenannten Lastverlauf im Stromnetz der E.ON Netz GmbH in Deutschland an einem beliebig ausgewählten Tag im Jahr 2011 dar (hier: 15. Juni 2011). Der Lastverlauf entspricht der Summe aller Entnahmen durch Letztverbraucher, Weiterverteiler und nachgelagerte Netz- und Umspannebenen. Eine Stichprobenartige Überprüfung zeigte, dass die Lastverläufe für alle Tage eines Jahres sehr ähnlich sind. Eine Überprüfung der Lastverläufe im Netz der Transnet ENBW ergab ein übereinstimmendes Bild. Die Lastverlaufskurve wurde an der horizontalen Achse gespiegelt und ohne Veränderung der Skalierung über den Magnitudenplot gelegt. Es zeigt sich ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Stromverbrauch und Detektionsfähigkeit des LED-Netzwerks. Der

Stromverbrauch kann, so postulieren wir, als direkter Indikator für die Detektionsfähigkeit eines Netzwerks, zumindest in industrialisiertem Gebiet, betrachtet werden.

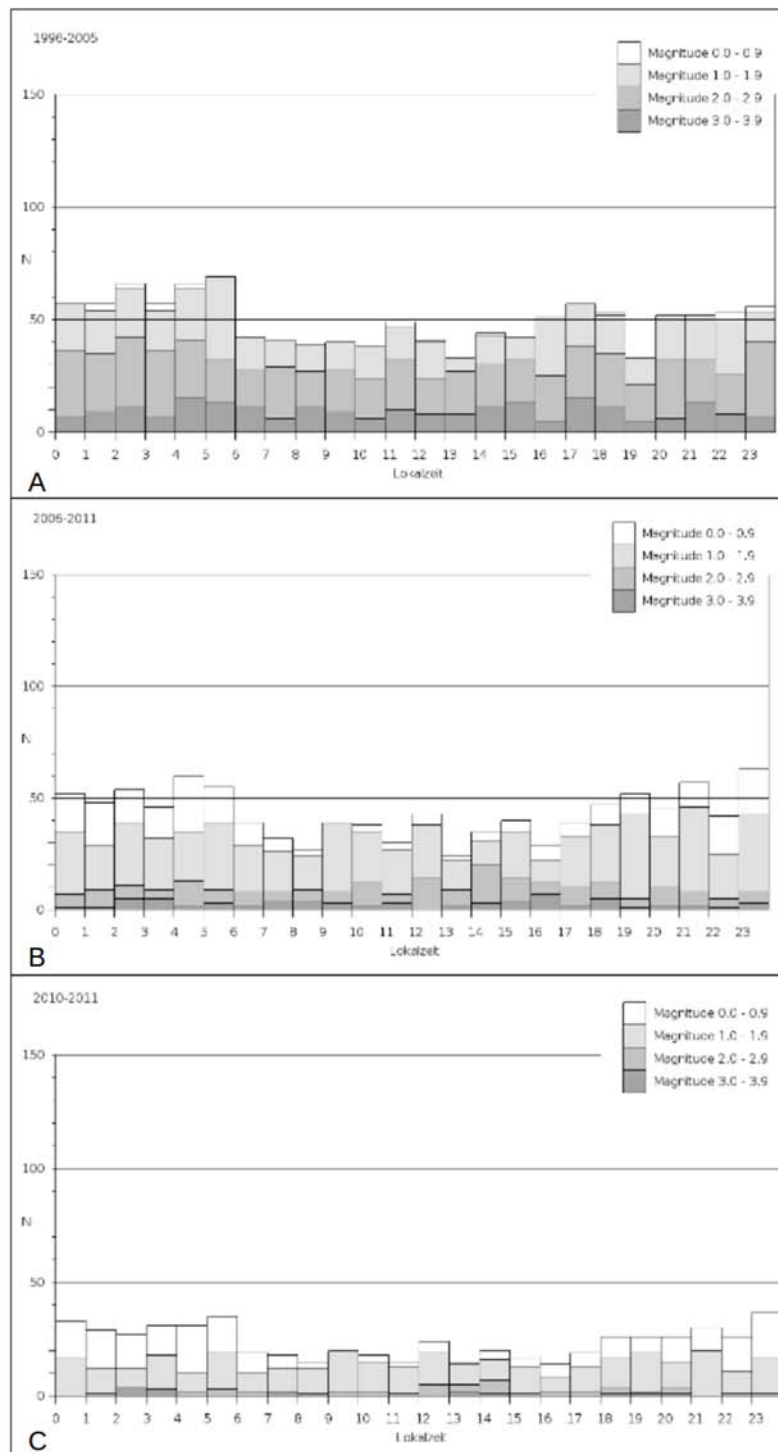


Abb. 36: Detektionszahlen aufgetragen gegen die Uhrzeit. Der Grauton der Balken zeigt die gestapelten Magnitudenbereiche an

In den Abendstunden, im Bereich um 18 Uhr, weichen die Verläufe voneinander ab. Es liegt nahe, zu vermuten, dass hier zwar erhöhte Strommengen (ein zweiter Tagespeak) bezogen werden, dies jedoch nicht in direktem Zusammenhang mit Arbeitsaktivität (zum Beispiel auf Baustellen) und der damit verbundenen Emission von seismischem Rauschen verbunden ist.

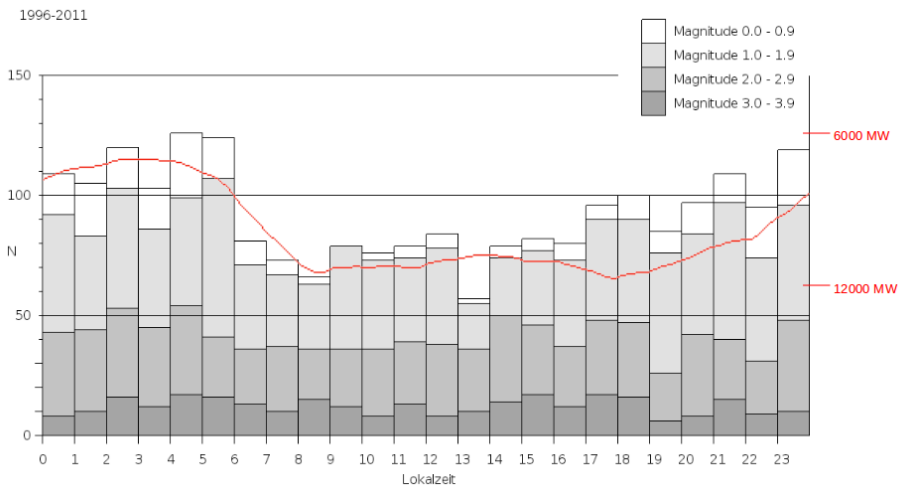


Abb. 37: Tag-Nacht-Vergleich für den Gesamtkatalog und den Gesamtzeitraum 1996-2011, In rot ist die (gespiegelte) Lastkurve von E.On eingezeichnet.

Um ein Bild der Veränderung der Fähigkeiten der Stationen und der Vollständigkeit des Gesamtkatalogs zu erhalten, wurden Graphen erstellt, die das Verhältnis V zwischen Nacht- und Tag-Ereigniszahl in Abhängigkeit von der Magnitude wiedergeben. Dazu wurde die Zahl der Ereignisse in den Nachtstunden von 22 - 6 Uhr ins Verhältnis zu den Ereignissen der Tagstunden gesetzt. Bei einer Vollständigkeit des Katalogs sollte ein Wert von $V \sim 1$ erreicht werden.

$$V = \frac{\text{Det}_{\text{Tag}}}{\text{Det}_{\text{Nacht}}}$$

Als untere Grenze für die Zahl der Ereignisse wurde 50 für Tag- und Nachtzeit angesetzt. Bei niedrigeren Werten zeigte sich, dass die Kurve einen zunehmend chaotischen Verlauf nimmt. Vorher war zudem häufig ein Abknicken hin zu niedrigen Verhältniswerten zu beobachten, sich also bei höheren Magnituden (ab $\sim 2.5-3.0$) wieder das Schema der Werte bei niedrigen Magnituden, also niedrige V -Werte, einstellt.

Um eine breitere und verlässlichere Datengrundlage zu haben, wurden drei verschiedene Tag-Zeitbereiche zu je acht Stunden herangezogen (6 -14 Uhr, von 8 - 16 Uhr und von 10 - 18 Uhr) und der Mittelwert der Verhältniswerte V gebildet. Abb. 38 zeigt die Verteilung der drei Tag-Zeitbereiche.

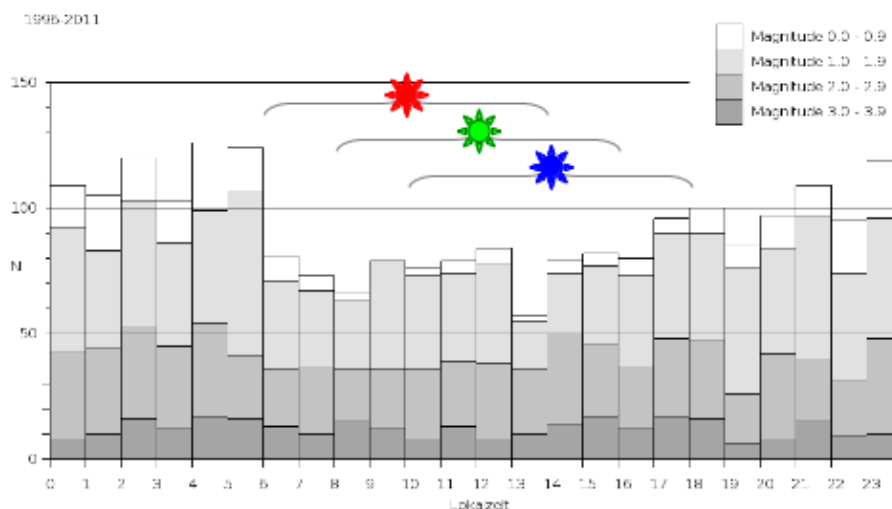


Abb. 38: Übersicht über die drei verwendeten Tageszeit-bereiche. Die Farbgebung der Sonnensymbole entspricht der der Linienverläufe in den weiteren Graphen.

Die Abbildungen 39-A/B/C/D zeigen beispielhaft das Ergebnis dieser Verhältniswert-Kalkulation für die Zeiträume 1996-2005, 2006-2011 und 2010-2011 sowie eine Überlagerung der Mittelwertkurven dieser drei Zeiträume für die Station Feldberg (FELD). Nach rechts hin sind jeweils Magnitudenwerte aufgetragen, nach oben hin der zugehörige Verhältniswert V .

Der Verhältniswert V wurde aus der Gesamtheit der erfassten Erdbeben ab dem jeweiligen Magnitudenwert auf der x-Achse gebildet. Die Graphen sind also so zu lesen, dass beispielsweise für die Magnitude 1.0 der Verhältnis-Wert aus allen erfassten Beben mit $M \geq 1.0$ aufgetragen wurde. Für die Magnitude 1.1 der Verhältnis-Wert für $M \geq 1.1$ etc.

In Anhang B finden sich die Graphen von Stationen, die über eine genügend hohe Ereigniszahl verfügen, um für mindestens zwei Jahresbereiche (1996-2005, 2006-2011 und/oder 2010-2011) eine Verhältniswert-Magnituden-Kurve zu bilden. Zusätzlich sind dort zum Vergleich die y-Achsenabschnitte der Regressionsgeraden-Parameter aus dem Probabilistischen Ansatz eingezeichnet. Auf die Unterschiede und Gemeinsamkeiten der zwei Ansätze wird eingegangen.

Es zeigt sich an dieser Station exemplarisch, dass:

- a) Tagsüber im Zeitbereich 1996-2005 nur $\sim 70\%$ der auftretenden Beben mit niedrigen Magnituden ($M < 1.5$) registriert wurden.
- b) Das Verhältnis zwischen Tag- und Nacht für 2010-2011 stark absinkt (hier von rund $V \sim 0.7$ auf $V \sim 0.53$). Dies lässt sich auf die gesteigerte Empfindlichkeit des Seismometer-Netzwerks zurückführen.
- c) Der Tageszeitbereich 6-14 Uhr die am stärksten ausgeprägte Tag-Nacht-Diskrepanz besitzt, der Tageszeitbereich 10-18 Uhr die am schwächsten. Dies ist für die überwiegende Zahl der betrachteten Stationen der Fall. Eine deutliche Ausnahme bildet etwa die Station SLE (siehe Anhang), Dort ist für den Jahresbereich 2010-2011 eine Umkehrung der Verhältnisse zu beobachten.
- d) Im Zeitraum 1996-2005 die Mittelwertkurve nicht den Wert 1 erreicht, während im Zeitraum 2006-2011 dieser deutlich überschritten wird. Eine Annäherung an die Vollständigkeit ist somit nicht durch das Erreichen des Verhältniswertes $V \sim 1$ erreicht, sondern zeichnet sich durch eine Abflachung der Steigung ab. Bei der Bearbeitung der einzelnen Stationen zeigte sich, dass für den Zeitraum 1996-2005 in der Regel keine Werte von $V \sim 1$ erreicht werden, in dem Zeitraum von 2006-2011 jedoch in der Regel überschritten werden (siehe Anhang B), die Zahl der Detektionen am Tag also die der Nacht übertreffen. Wesentlicher Grund für den Trend zu Mehr-Detektionen bei Tag ist eine - aufgrund des sprengungsfreien Charakters der Bulletin - als zufällig anzusehende Häufung von Ereignissen im Magnitudenbereich 2.0 - 2.9. Diese Häufung tritt zwischen 14 und 16 Uhr auf und verschiebt daher den Verlauf der blauen und grünen Verhältniswert-Kurven nach oben.
- e) Sich ein Plateau im Zeitraum 2006-2011 für den Magnitudenbereich 0.9 bis 1.6 ausbildet. Dies ist durch den starken statistischen Einfluss der hohen Zahl an Detektionen mit niedrigen Magnituden im Zeitraum 2010-2011 bedingt.
- f) Die Vollständigkeitsmagnitude im Zeitraum 2010-2011 ($M_c \sim 0.9$) sich deutlich von der Vollständigkeitsmagnitude im Zeitraum 1996-2005 ($M_c \sim 2.3$) unterscheidet. Hierbei wird zugrunde gelegt, dass Vollständigkeit beim Übergang des Wertes V von einem steilen Anstieg zu einem sehr geringen Anstieg oder einer Umkehrung des Trends (negative Steigung) erreicht wird. In Abb. 39-D sind diese Werte als blaue Linien unterschiedlicher Abstufung eingezeichnet.

In Tabelle 5 sind die Vollständigkeitsmagnituden für die 36 betrachteten Stationen angegeben. Die Festlegung der Werte erfolgte durch Begutachtung und Bewertung der Detektionszahlen tagsüber und nachts. Die Detektionsempfindlichkeit ist tagsüber aufgrund des anthropogenen "Lärms" herabgesetzt. Da es sich bei den so ermittelten Werten für M_c um keine raumbezogenen Daten handelt, sondern um angenäherte statistische Werte der Detektionsfähigkeit einer Station hinsichtlich der Tageszeit, wurden keine Karten der Vollständigkeit erstellt. Die Werte sind vielmehr in ihrer Gesamtheit als Qualitätsproxy für die Güte des Stationsnetzes anzusehen. In der Zeile „Gesamtkatalog“ ganz unten in Tabelle 5 ist das Ergebnis der Verhältniswert-Magnituden-Betrachtung für den Gesamtkatalog mit allen 2225 Einträgen angegeben. Es wird ersichtlich, dass sich die Detektionsvollständigkeit des Gesamtnetzwerks ganz generell zwischen dem Zeitraum 1996-2005 und 2010-2011 um 0.9 Magnituden verbessert hat.

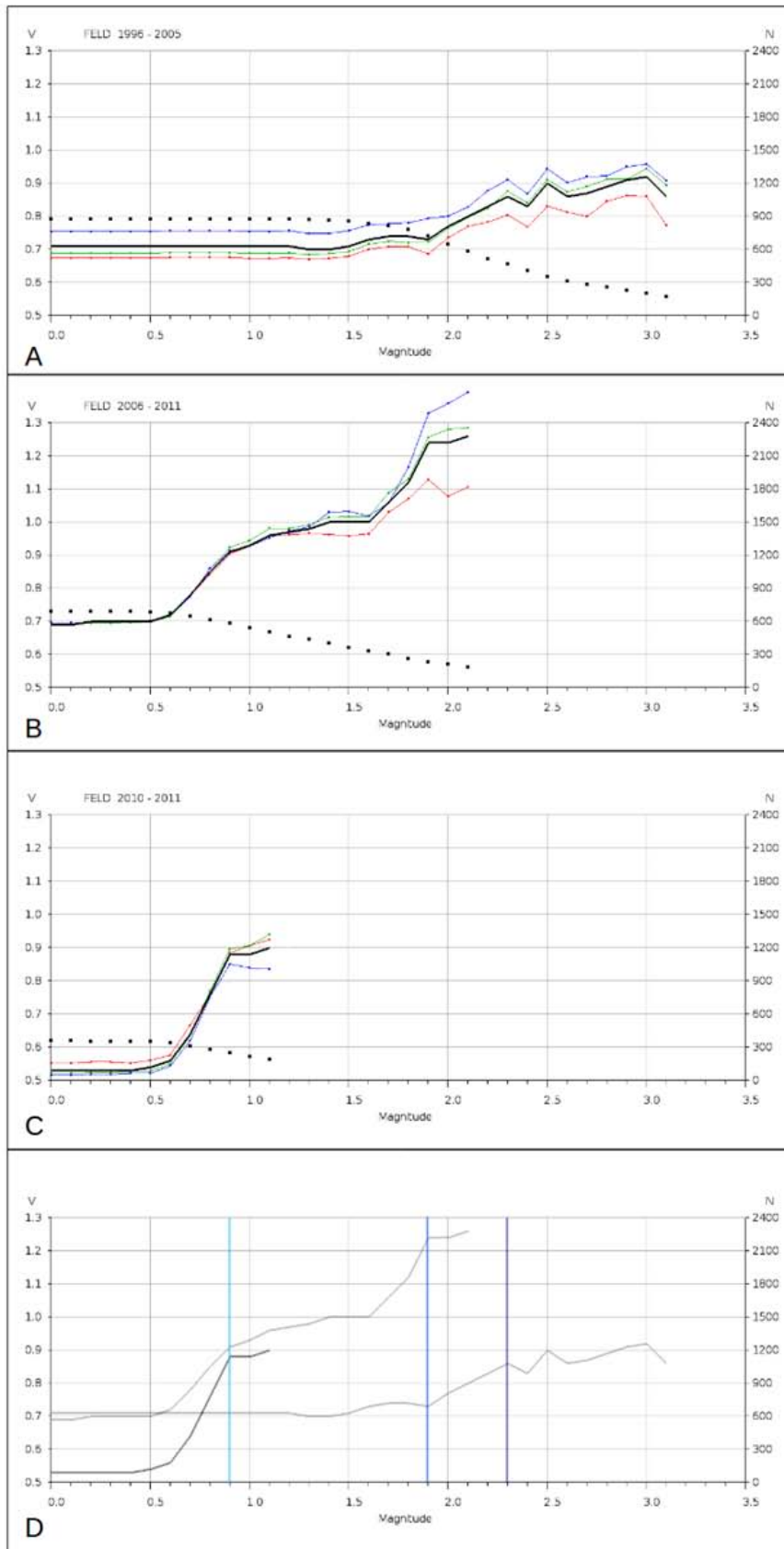


Abb. 39: Darstellung der Verhältniswert-Magnituden-Kurven für die Station FELD für die Zeiträume 1996-2005, 2006-2011 und 2010-2011. In D sind die (schwarzen) Mittelwertkurven übereinandergelagert. Die blauen vertikalen Linien markieren die Vollständigkeitsmagnituden, wenn man eine Plateaubildung als Kriterium ansetzt (siehe Text). Die schwarz gepunktete Linie zeigt die kumulative Zahl N der erfassten Ereignisse.

Es lässt sich ein Vergleich zwischen der Performance-Änderung einzelner Stationen ziehen. Die Stationen HDH, SIND und SWS zeigen beispielsweise eine geringe Ausprägung der Detektionsverbesserung (siehe auch Anhang B) – und dies nur als Folge der Gesamtverbesserung des Netzes. Einige Stationen, wie etwa SLE, SULZ oder OPP weisen bereits für den Zeitraum 2006-2011 niedrige Werte für Mc auf, was sich aus einer dominierenden Überprägung durch die niedrigen Detektionsschwellenwerten für den Zeitraum 2010-2011 erklären lässt. Es ist zu bemerken dass das BFO erst spät (2009) in das Online-Netzwerk eingebunden wurde. Daher vermindern die geringen Datenmengen der vorangegangenen Jahre durch ihren Einfluss die „Qualität“, sofern man nur den Zeitraum 2006-2011 betrachtet.

Tabelle 5 Vollständigkeitsmagnituden für die drei betrachteten Zeiträume. Aufgrund der teilweise sehr kleinen Datenmenge ist eine Auswertung nicht immer möglich gewesen.

Station	Mc 1996-2005	Mc 2006-2011	Mc 2010-2011
ABH	2.3	1.4	-
BALS	-	-	-
BBS	2.9	-	-
BEU	2.7	-	-
BFO	-	2	1.1
BHB	-	-	-
BOUR	-	-	-
BUCH	-	2	-
ECH	2.3	2	1.1
END	2.1	0.9	-
FELD	2.3	1.9	0.9
GUT	2.3	2	1
HDH	-	-	-
KIZ	2.3	1.9	0.9
KTD	-	-	-
LANF	2.3	-	-
LBG	2.3	2	-
LIBD	2.9	-	-
LOMF	2.3	1.2	-
MOF	2.3	1.3	-
OPP	-	1	-
PEB	-	-	-
RUP	2.3	-	-
SIND	2.3	-	-
SISB	-	2	-
SLE	2.3	0.9	0.9
SPAK	2.5	-	-
SULZ	-	0.9	-
SWS	-	-	-
THEF	-	-	-
TNS	-	1.4	-
TOD	2.3	-	-
TUBL	-	-	-
UBR	2.5	-	-
WILA	-	-	-
WLS	-	-	-
Mittelwert	2.39	1.55	0.98
Std.-Abw.	0.21	0.45	0.09
Gesamter Katalog	2.3	2	1.4

3.6.2 Probabilistischer Ansatz

Der Probabilistische Ansatz beruht auf der Erfassung, Bewertung und Anwendung der Detektionsfähigkeit einzelner Stationen innerhalb eines Netzwerks (Schorlemmer & Woessner, 2008). Den Kern der Auswertung bildet somit nicht der raumbezogene (Gesamt-)Katalog, sondern ein eigens zu erstellender stationspezifischer Katalog – hergeleitet aus den Bulletins. Es sei darauf hingewiesen, dass eine Station durchaus ein Ereignis detektieren kann, diese jedoch zu keinerlei Lokalisierung führt, da zu wenig weitere Stationen das Ereignis abbilden oder die Qualität des Signals ungenügend ist. Die Lokalisierungsfähigkeit bildet also den Kern dieses Ansatzes. Abb. 40 veranschaulicht das Prinzip des stationspezifischen Katalogs. Die Lokalisierungen mit Beteiligungen der Station ABH (Alteburg) in Rheinland-Pfalz und der Station UBR (Überruh) im äußersten Südosten Baden-Württembergs sind mit roten Quadraten beziehungsweise grünen Dreiecken in die Karte eingezeichnet. Die deutlich erkennbare Provenanz der Detektionen ist Grundlage des Probabilistischen Ansatzes.

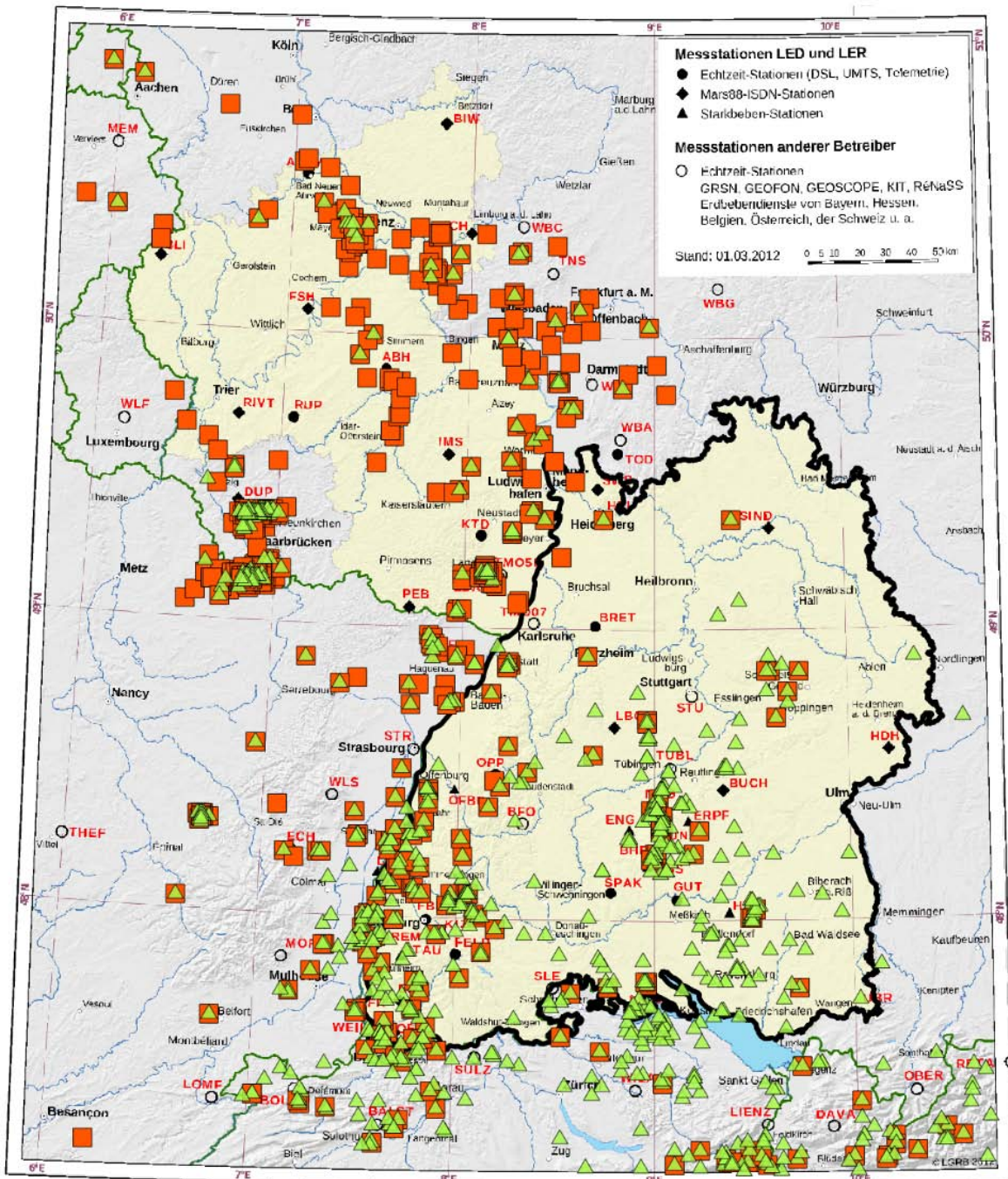


Abb. 40: Lokalisierungsbeteiligungen der Station ABH (rote Quadrate) und UBR (grüne Dreiecke) in den Jahren 1996-2011.

Der Probabilistische Ansatz bietet gegenüber dem Katalogbezogenen Ansatz (siehe Kapitel 3.6.3) die Möglichkeit, in Gebieten mit geringer Zahl an Erdbeben und somit dünnen Datenbeständen eine Aussage über eine mögliche Vollständigkeitsmagnitude zu machen. Es ist daher möglich, das Landesgebiet Baden-Württembergs vollständig und zugleich mit großer Genauigkeit zu überdecken. Zudem können sehr konkrete Angaben über die Detektions- und Lokalisierungsfähigkeit eines Netzwerks im Fall vom Zu- oder Abschalten (beziehungsweise Ausfallen) einzelner Stationen gemacht werden. Am Ende dieses Kapitels wird kurz auf die Möglichkeit eingegangen, anhand dieses Ansatzes Vorschläge zur Optimierung eines Netzwerks zu generieren.

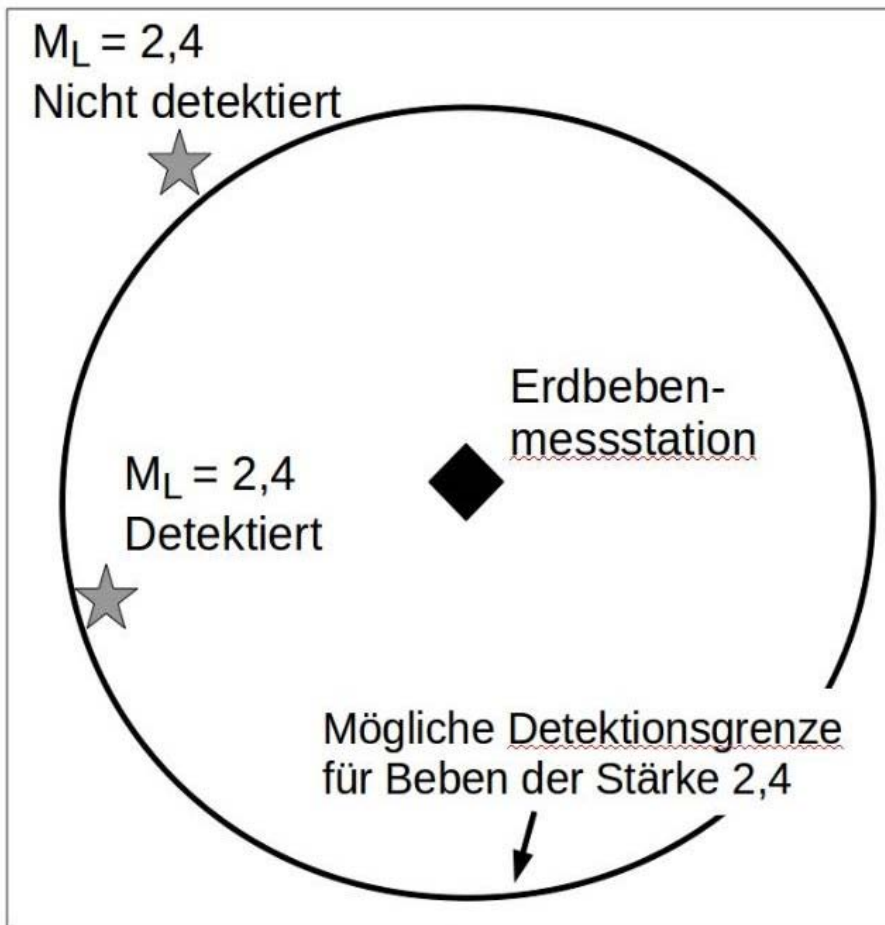


Abbildung 41: Schematische Darstellung der Detektionsempfindlichkeit einer Seismometerstation.

Auf die Grundlagen der Datenaufbereitung zum Zweck der Erstellung stationsbezogener Daten wurde bereits im Kapitel 3.4 (Datengrundlagen) eingegangen. In Abb. 41 wird das Prinzip der Auswertung der so ermittelten Stations-Kataloge schematisch veranschaulicht. Jede Seismometerstation besitzt eine charakteristische Detektionsschwelle, ab der ein Beben in einer gegebenen Entfernung detektiert wird. Die Lokalisierung ist dann, sofern weitere Stationen ebenfalls ein brauchbares Nutzsignal liefern, möglich.

Auf Anisotropieeffekte des Untergrund kann und wird aufgrund der niedrigen Datendichte im Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen, doch es erscheint plausibel, dass diese Anisotropieeffekte existieren. Auch der LED weist auf Anisotropieeffekte hin (LED, pers. comm), eine Quantifizierung ist bisher aber nicht erfolgt. Angesichts der großen Zahl an beteiligten Stationen und deren räumlichen Abdeckungsgrad sollte dieser Effekt jedoch weitestgehend zurücktreten.

Die Auswertung der stationsspezifischen Daten erfolgte durch Auftragen der Magnituden der erfassten Ereignisse einer Station gegen die Entfernung von der Station. In Abb. 42 wird dies anhand der Station SPAK (Spaichingen-Kochelsberg) für den Zeitraum 1996-2005 dargelegt. Die blauen Punkte zeigen die detektierten Ereignisse der Station, die roten Punkte die Ereignisse im LED-Katalog. Es zeigt sich ein genereller Trend hin zu größeren Magnituden. Im Nahbereich bis 50 km finden sich die Beben der Schwäbischen Alb, der Donauregion sowie des Bodenseeraums. Danach folgen die Erdbeben des Schwarzwalds und des Oberrheingraben und schließlich, als zwei vertikal ausgebildete Punktwolken erkennbar, die bergbaubedingten Beben im Saarbrücker Raum.

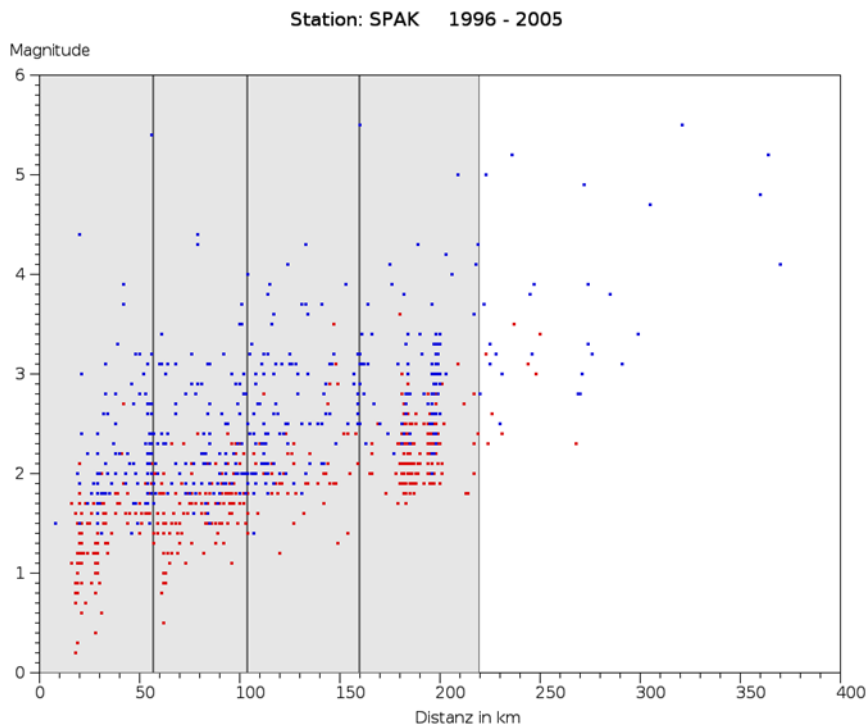


Abb. 42: Lokalisierungen mit Beteiligung der Station Spaichingen-Kochelsberg (blaue Punkte) sowie die Ereignisse, die nur im Gesamtkatalog auftauchen (rote Punkte) gegen die Entfernung zur Station aufgetragen. Mit zunehmender Entfernung steigen sowohl die Magnituden der Stationsbezogenen Lokalisierungen als auch die des Gesamtkatalogs an (ein „Rand“-Effekt: die Gebietsgrenze Baden-Württembergs beziehungsweise des Netzwerks wird erreicht). Der Anteil der Daten der Station an der Gesamtheit der Ereignisse gibt Aufschluss über die Stations-performance. Erläuterungen siehe Text.

Es wurden, beginnend bei 0 km, Gruppen von je mindestens 100 Stations-Ereignissen gebildet, um eine statistische Sicherheit beim weiteren Vorgehen zu erhalten. Die Gruppen, in Abb. 42 als grau markierte Bereiche erkennbar, wurden dahingehend untersucht, ab welcher Magnitude die Zahl der von der Station detektierten Ereignisse von der Gesamtzahl, also der „Katalogbeben“, abweicht. Diese Grenzmagnituden ergeben, gegen die Entfernung aufgetragen, eine Regressionsgerade.

Dazu wurden die Ereignisse jeder Gruppe in Magnituden-Häufigkeits-Graphen (Abb. 43) aufgetragen. Die schwarzen, vertikalen Balken geben die absolute Differenz zwischen den Katalog- und Stationsdaten an. Mit zunehmender Entfernung „wandern“ die Differenz-Balken nach rechts, also in höhere Magnitudenbereiche. Die Performance einer Station spiegelt sich in der Ausprägung der Differenzen wider. Es wurde auf eine getrennte Betrachtung von Tag- und Nachtzeiten im Kontext des Probabilistischen Ansatzes verzichtet. Hintergrund ist die geringe Datenmenge, die bei einer Unterteilung in Tag- und Nachtzeiten zusätzlich „gedrittelt“ werden würde. Für die Zukunft ist eine ausreichend breite Datenlage zu erwarten, daher kann eine solche Betrachtung in zukünftigen Studien einbezogen werden.

Die Auswertung geschah visuell, wobei das Hauptkriterium, nach dem die Vollständigkeitsgrenze gesetzt wurde, eine durchgehende oder ansteigende Reihe von Nicht-Beteiligungen an Lokalisierungen ist. Nebenkriterium ist die deutliche Häufung von Nicht-Beteiligungen noch vor dem regulären Anstieg der Nicht-Beteiligungen. Vereinzelt Nicht-Beteiligungen vor dem eigentlichen Auseinanderdriften der Daten wurden nicht als mögliche Grenzwerte angesehen. Sie dürften in der Regel durch nicht dokumentierte Ausfallzeiten verursacht worden sein. Die Beurteilungskriterien sind aus diesem Grund als weich anzusehen. Es ist in Einzelfällen nötig, durch Abschätzungen die Relevanz der fehlenden Beteiligungen kritisch zu hinterfragen und die Grenzwerte gegebenenfalls zu modifizieren.

Es ist möglich, dass die Grenzwerte unter die Vollständigkeitsmagnitude einer Gruppe fallen. Dies ist bei Stationen der Fall, die eine besonders gute Performance besitzen (Beispielsweise FELD, BUCH, GUT, KIZ). In diesem Fall fällt der Grenzwert der einzelnen Station mit der des Gesamtkatalogs zusammen. Es ist davon auszugehen, dass die betreffende Station maßgeblich zur Detektionszahl in diesem Entfernungsbereich beigetragen hat. In Abb. 44 wird hierfür ein Beispiel gezeigt. Die Vollständigkeit des Stationsbezogenen Katalogs fällt hier mit den Gesamtkatalogdaten zusammen.

Station: SPAK 1996 - 2005

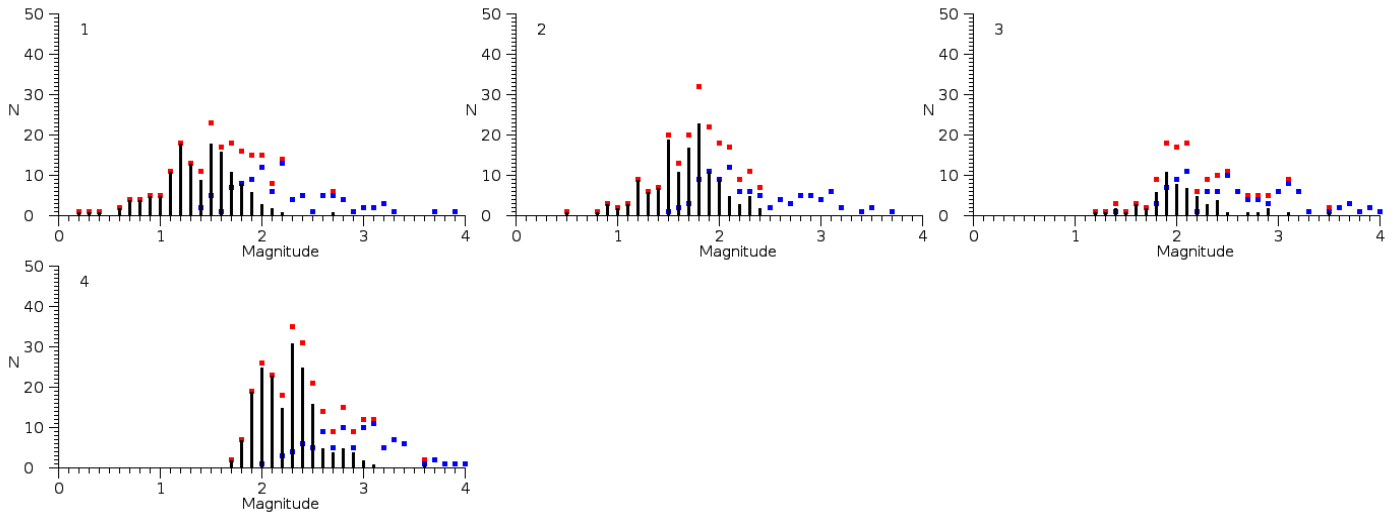


Abb. 43: Magnituden-Häufigkeits-Graphen für die Station SPAK (Spaichingen-Kochelsberg). Die Nummer in der linken oberen Ecke jedes Graphen bezeichnet die Gruppe, aufsteigend von Stationsnah zu Stationsfern.

Station: BUCH 1996 - 2005

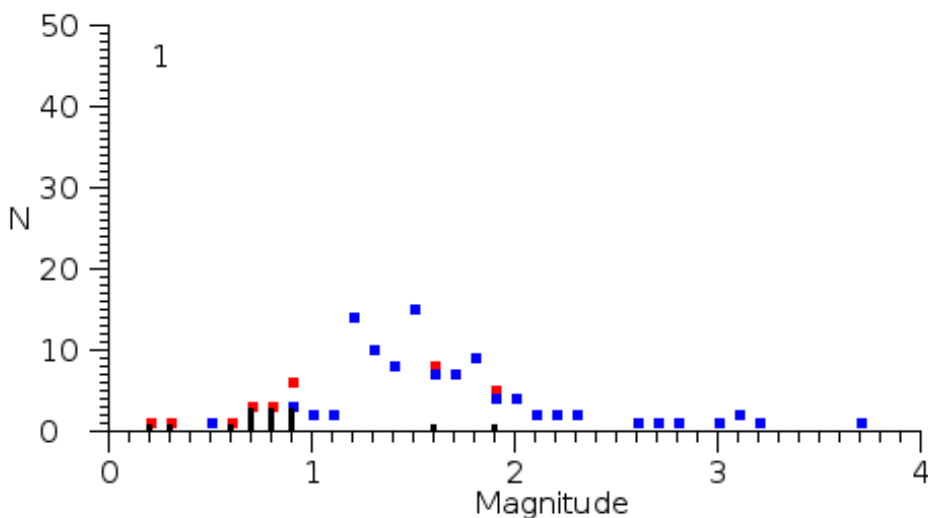


Abb. 44: Darstellung der Magnituden-Häufigkeitsverteilung der Station BUCH im Nahbereich (Gruppennummer 1). Der Grenzwert der fehlenden Lokalisierungs-Beteiligungen liegt bei Magnitude 1.0, und somit unterhalb der Vollständigkeitsmagnitude in diesem Bereich.

Um den Wert für die dann vorliegende, „gemeinsame“ Vollständigkeitsmagnitude zu ermitteln, wird der Ansatz der „Maximum Curvature“ (MAXC) verwendet, die von Woessner & Wiemer (2005) beschrieben wird. Ein Wert von $Mc-MAXC$ kann auch mit einer sehr geringen Datenmenge bestimmt werden. Es handelt sich um den Magnitudenwert, bei dem die Magnituden-Häufigkeitskurve das absolute Maximum erreicht.

Im Beispiel BUCH in Abb. 44 wäre dies der Wert 1.5. Woessner & Wiemer (2005) zeigen anhand von synthetischen Katalogen, dass dieser Wert in der Regel durchschnittlich 0.1 bis 0.2 Magnituden unterhalb der tatsächlichen Vollständigkeitsmagnitude liegt, diese also „zu gut“ darstellt. Wir konnten diesen Befund durch Vergleiche der MAXC-Werte mit denen der sogenannten EMR (Entire Magnitude Range)-Methode (siehe Kapitel 3.6.3) bestätigen. Dazu wurden die Datensätze von Stationen mit einer großen Zahl an Detektionen in den beiden Zeiträumen 1996-2005 und 2006-2011 herangezogen (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6: Vergleich von Vollständigkeitsmagnituden-Berechnungen. Die Unterschiede beim Mittelwert (0.13 und 0.2) ergeben die Korrekturfaktoren 0.1 und 0.2 für den Probabilistischen Ansatz in den Zeiträumen 1996-2005 und 2006-2011

	Mc MAXC	Mc EMR	Mc MAXC	Mc EMR
Station	1996-2005		2006-2011	
BFO	2.1	2.3	1.4	1.6
ECH	2.3	2.4	1.4	1.6
FELD	1.9	2.1	1.4	1.8
GUT	2	2.1	1.4	1.7
KIZ	2	2.3	1.4	1.3
LBG	2	1.8	1.4	1.3
LOMF	2.8	3	1.7	2
SIND	2	2.3	1.7	1.8
SLE	2	2.3	0.7	0.8
UBR	2.1	2.1	1.7	2.1
WLS	2.1	2.1	1.3	1.7
Mittelwert	2.12	2.25	1.41	1.61
Std.-Abw.	0.26	0.30	0.27	0.34

Für die Jahre 1996-2005 wird ein Korrekturfaktor von 0.1, für die Jahre 2006-2011 ein Korrekturfaktor von 0.2 verwendet. Auf die beiden Methoden und ihre Vor- und Nachteile wird in Kapitel 3.6.3 eingegangen.

Aus der Gesamtheit der für jeden Entfernungsbereich festgelegten Vollständigkeitsmagnituden lässt sich eine Regressionsgerade der Form

$$y = ax + b$$

ermitteln, die die entfernungsabhängige Performance der jeweiligen Station wiedergibt. Es wird hiermit ausdrücklich darauf hingewiesen, dass kein Zusammenhang zwischen dem Geradenparameter b und dem sogenannten b-Wert der G-R-Beziehung besteht. Tabelle 7 zeigt beispielhaft die anhand der Einzelbereichs-Daten festgelegten Vollständigkeitsmagnituden und die daraus folgenden Parameter der Regressionsgeraden für die Station SPAK. In Anhang C-4 sind die Parameter-Tabellen aller 36 relevanten Stationen aufgelistet. Die zugehörigen Graphen sind in Anhang C-1 und C-2 einzusehen. Die y-Achsenabschnitte (Wert b) sind zur vergleichenden Betrachtung im Anhang B in die Graphen des Tag-Nacht-Vergleichs eingezeichnet.

Ein Zusammenhang mit Magnituden-Distanz-Korrekturkurven (beispielsweise für Baden-Württemberg in Stange, 2006, zu finden) lässt sich nicht herleiten. Der Charakter der Daten – eine Station wirkt bei Lokalisierungen mit, sie ist nicht allein wirksam – lässt solche Vergleiche nicht zu.

Tabelle 7: Beispiel für die Bewertung der Magnituden-Häufigkeitsgraphen, hier die Station SPAK (1996-2005).

SPAK

Nr.	von	bis	Magnitude
1	0	56	2.3
2	57	103	2.5
3	104	159	3.0
4	160	219	3.2

Wert a: 0,00595
 Wert b: 2,111

In Abb. 45 sind die auf diese Weise ermittelten Regressionsgeraden für die Zeiträume 1996-2005 und 2006-2011 wiedergegeben. Es konnten für 1996-2005 29 Stationen und für 2006-2011 31 Stationen verwendet werden. Dabei ergaben sich zwei Arten problematischer Datensätze:

a) Datensätze von Stationen, die über zu wenig Lokalisierungs-Beteiligungen verfügen, um mehr als eine Gruppe von N=100 zu bilden (TUBL und THEF für 1996-2005 sowie BOUR, KTD, PEB, WILA und WLS für 2006-2011). Hierfür musste eine Ausnahme eingeführt werden. Es wurde für die spätere Generierung einer Karte die Vollständigkeitsmagnitude der ersten (einzigen)

Gruppe verwendet. Dies allerdings nur in einem Entfernungsbereich bis 30 km, was der Größenordnung des halben durchschnittlichen Stationsabstands von MARS- und Telemetrienetz im Jahr 2000 entspricht (Brüstle & Stange, 2002). Die Stationsdichte selbst hat sich bis heute nicht signifikant verändert.

b) Datensätze von Stationen, die einen leicht negativen Wert für a liefern (negative Steigung !). Dies betrifft die Stationen SISB, SLE und SWS für den Zeitraum 2006-2011. Um diese Stationen dennoch an der Kartengenerierung teilhaben zu lassen (die Station SLE verfügt beispielsweise über eine interessant hohe Performance), wurde die Annahme gemacht, dass die Steigung der Regressionsgeraden dem Durchschnitt von 0.00721 aller anderen Stationen im Zeitraum 2006-2011 entspricht. Für den y-Achsenabschnitt wurde der Durchschnittswert der Vollständigkeitsmagnitudenwerte aller Gruppen (der Station) angenommen. Die Möglichkeit, die Steigung auf Null zu setzen und gegebenenfalls in der Entfernung zu beschränken, wurde zugunsten dieses konservativen, aber auch realistischeren Ansatzes verworfen.

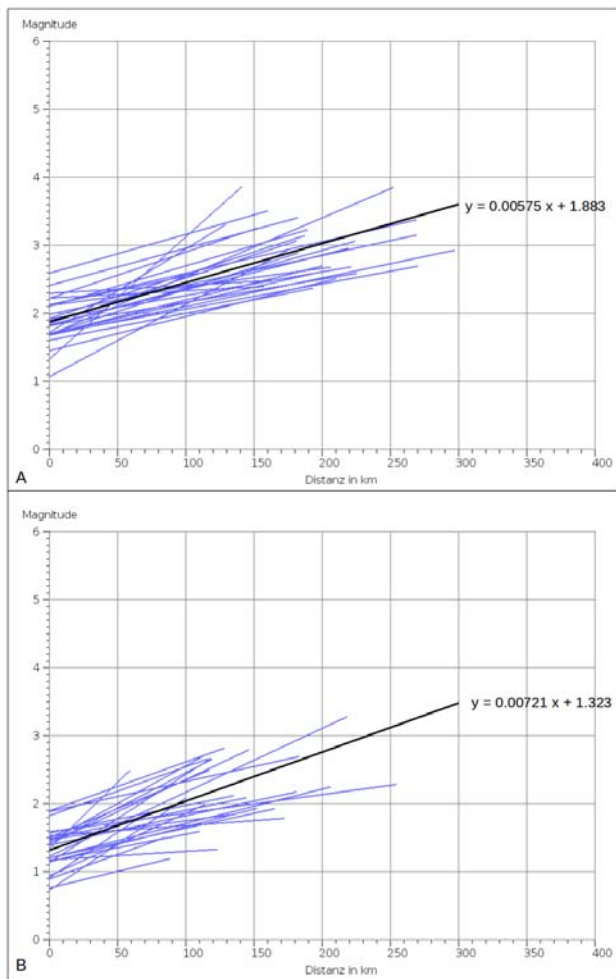


Abb. 45: Darstellung der Geradenschar für 1996-2005 (A) und 2006-2011 (B). Anhand der Geraden und der Stationskoordinaten lässt sich für jeden Ort in Baden-Württembergs eine Vollständigkeitsmagnitude ermitteln.

Aus Abb. 45 wird ersichtlich, dass sich die durchschnittliche Steigung von 0.00575 (Std.-Abw. 0.00337) auf 0.00721 (Std.-Abw. 0.00457) erhöht hat, während der y-Achsenabschnitt von 1.883 (Std.-Abw. 0.328) auf 1.323 (Std.-Abw. 0.310) abfiel. Zudem ist die Variabilität der Geradensteigungen gestiegen. Die größten Steigungen besitzen für 1996-2005 die Station BHB (Braunhartsberg) und für 2006-2011 die Station END (Endenburg). Die geringsten Steigungen besitzen für 1996-2005 die Station SWS (Schriesheim-Wilhemstollen) und für 2006-2011 das BFO (Black Forest Observatory).

Anhand der Regressionsgeraden wurden Karten der Vollständigkeitsmagnitude für die Zeiträume 1996-2005 und 2006-2011 erstellt. Zu jedem Punkt innerhalb des betrachteten Kartenbereichs lassen sich anhand der Entfernung und der Geradengleichungen Vollständigkeitsmagnituden berechnen. Da für jedes Erdbeben mindestens drei Stationen „triggern“ müssen, und hierbei die Stationen mit den schlechtesten Eigenschaften der limitierende Faktor sind, kann der dritt-niedrigste

Wert aus der Gesamtheit der Vollständigkeitsmagnituden für die Kartenerstellung herangezogen werden. Dieser Wert repräsentiert ein absolutes Optimum, da in der Regel mehr als drei Stationen für eine Lokalisierung herangezogen werden. In Abb. 46 und 47 werden die Karten der Vollständigkeitsmagnitude für die Zeiträume 1996-2005 und 2006-2011 gezeigt. In Abb. 48 werden die relativen Änderungen der Vollständigkeitsmagnitude für die zwei Zeiträume gezeigt. In Anhang C-3 sind Karten für verschiedene diskrete Vollständigkeitsmagnituden-Werte (1.2, 1.3, 1.4 etc.) für den Zeitraum 2006-2011 einzusehen.

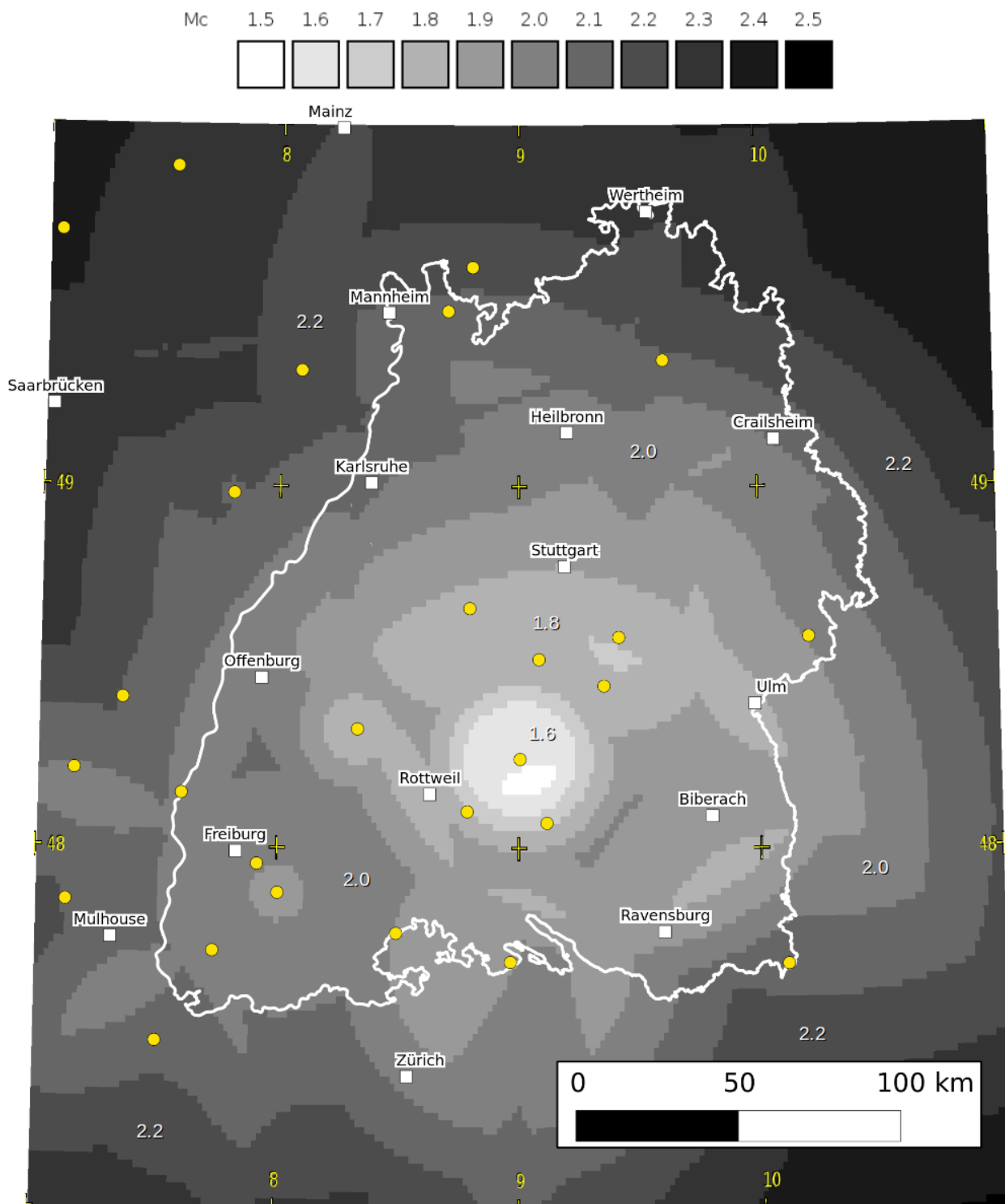


Abb. 46: Karte der Vollständigkeitsmagnitude im Zeitraum 1996-2005. Die Erdbebenstationen sind zur Orientierung als gelbe Punkte eingezeichnet.

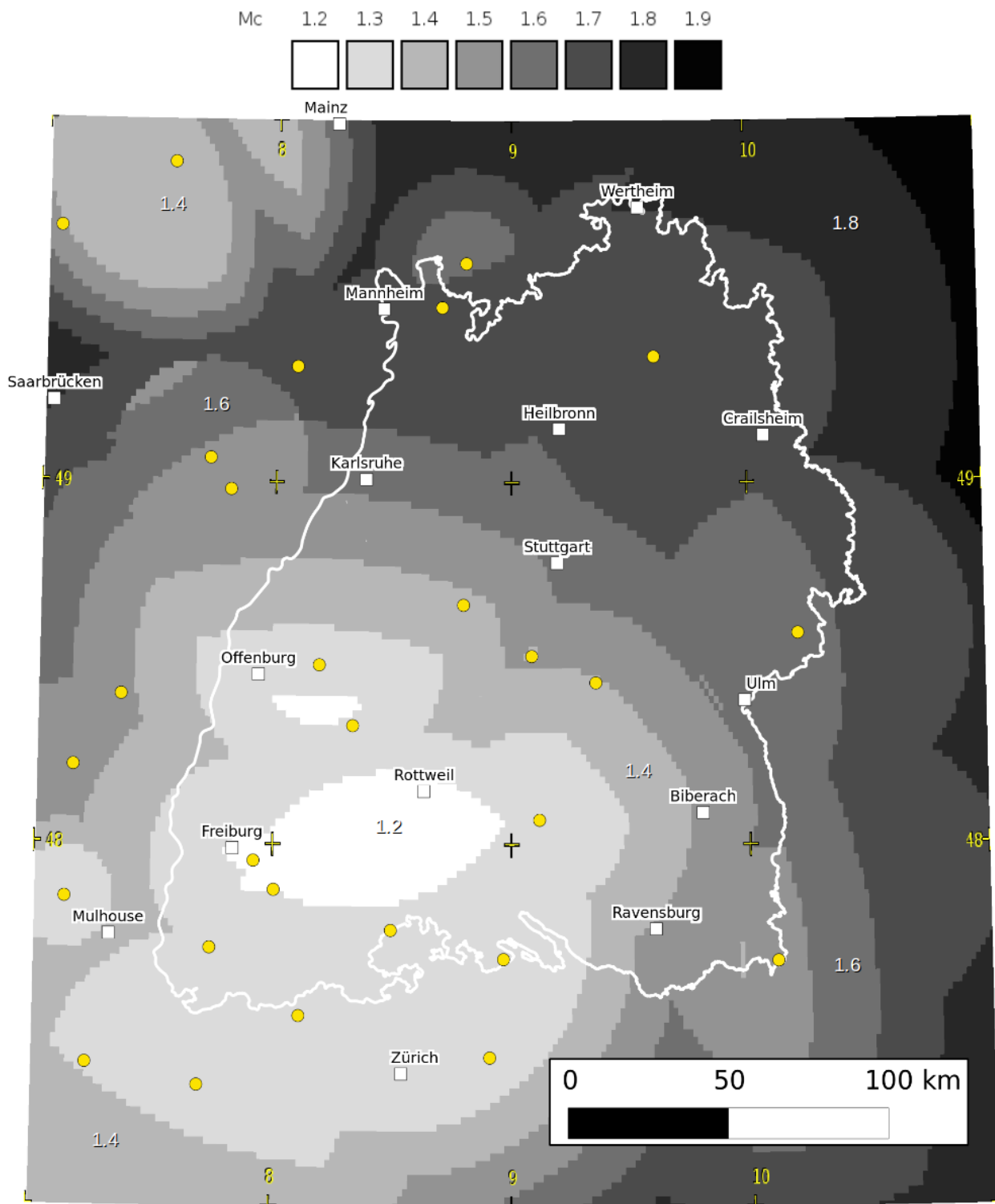


Abb. 47: Karte der Vollständigkeitsmagnitude im Zeitraum 2006-2011. Die Erdbebenstationen sind zur Orientierung als gelbe Punkte eingezeichnet.

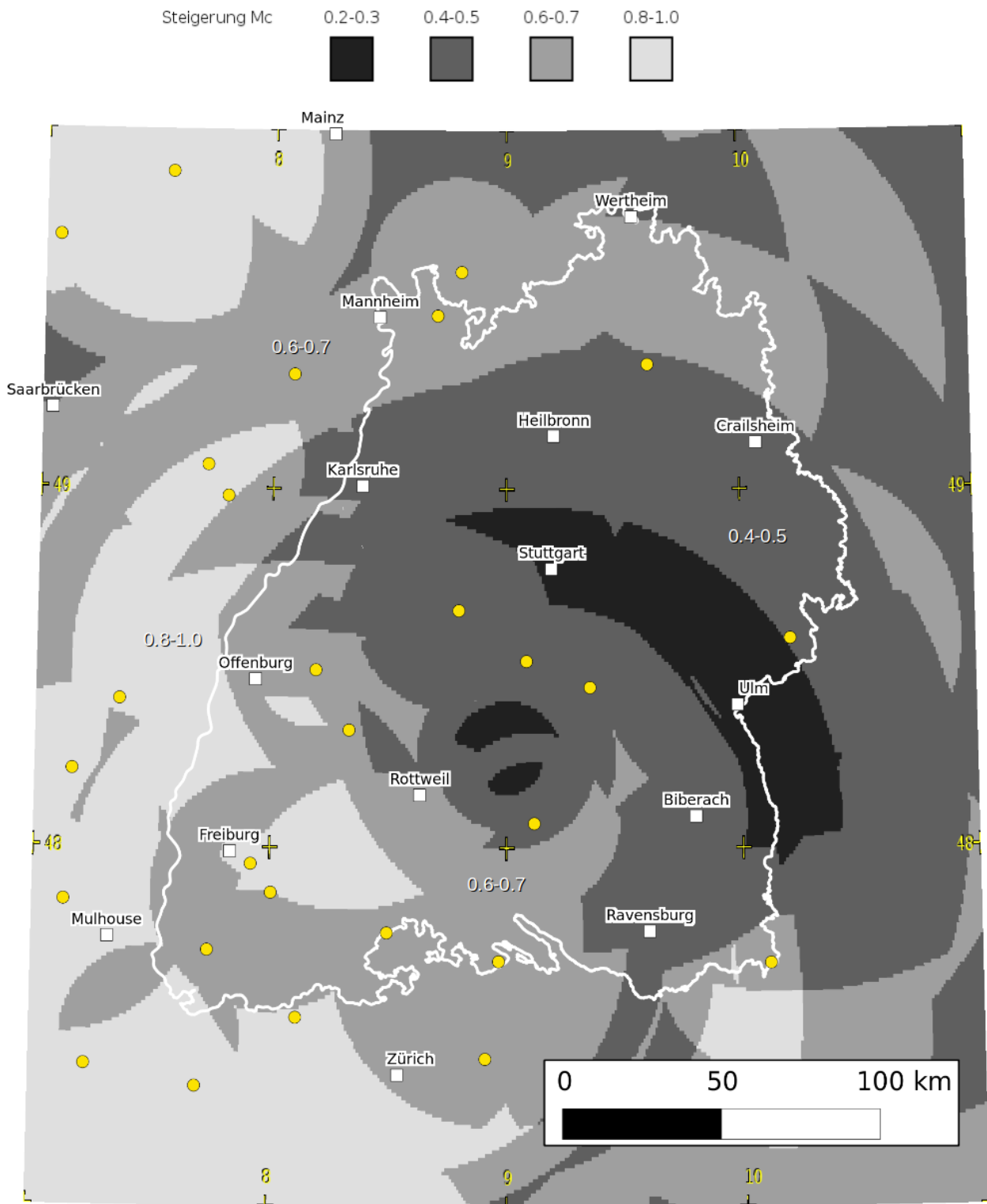


Abb. 48: Karte der Differenzen zwischen der Vollständigkeitsmagnitude im Zeitraum 1996-2005 und 2006-2011. Es zeigt sich eine generelle Verbesserung der Detektionsfähigkeit. Im Südwesten und im Westen des Landes ist sie besonders ausgeprägt.

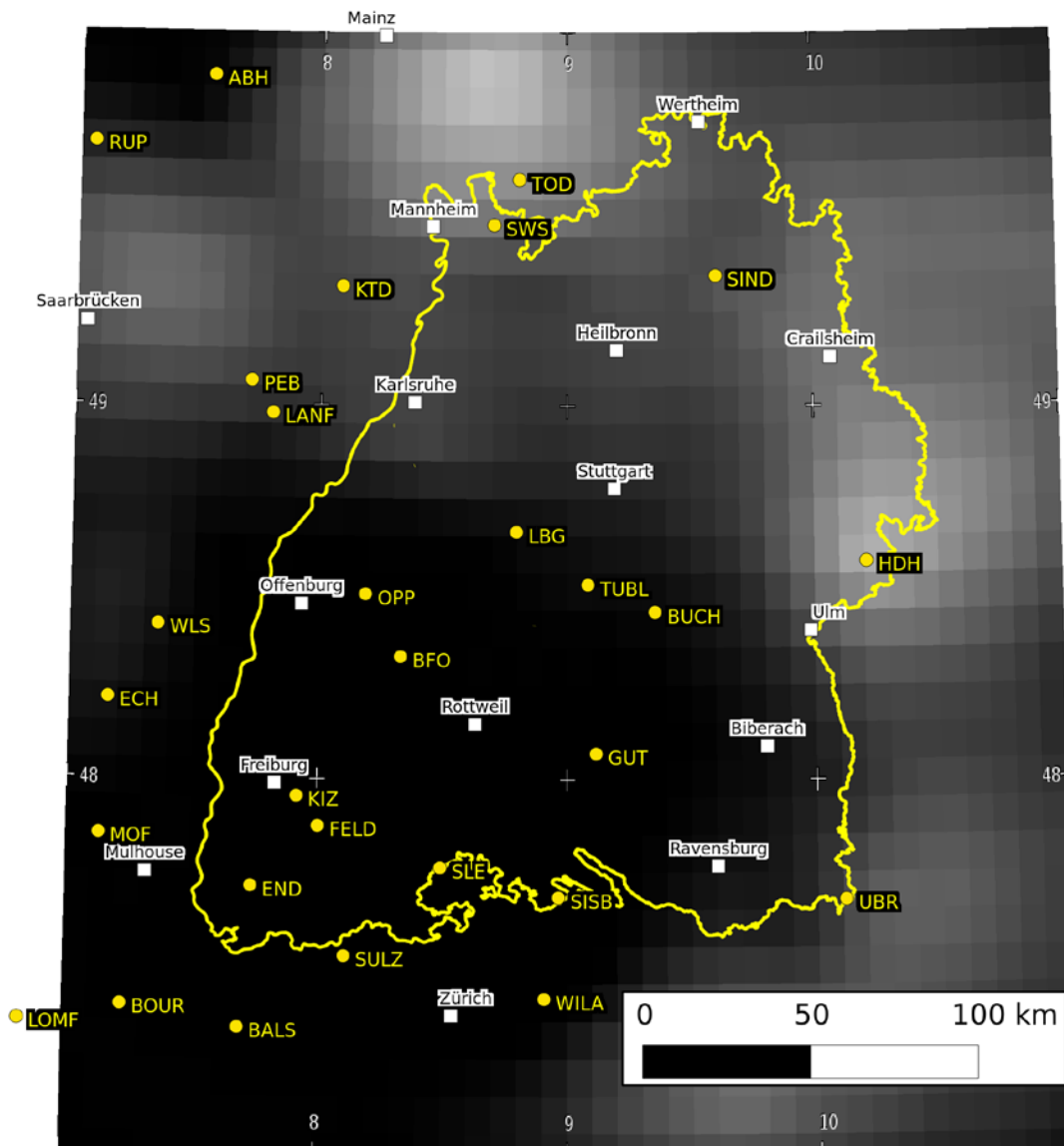


Abb. 49: Räumliche Bewertung von Standorten einer zusätzlichen Seismometerstation. Helle Stellen auf der Karte zeigen Orte auf, an denen der Betrieb einer zusätzlichen Station die meisten Vorteile brächte. Erläuterungen siehe Text.

Es ist im Rahmen einer Stationsbezogenen Bearbeitung möglich, die Effekte eines Stationsausfalls zu simulieren. Dazu ist es lediglich erforderlich, einzelne Stationen aus dem Datensatz herauszunehmen. Hier soll kurz auf den umgekehrten Fall, die Hinzunahme einer einzelnen Station, eingegangen werden. Es wurde eine fiktive Station mit durchschnittlichen Eigenschaften (siehe die Durchschnittsgerade in Abb. 45-B) in den existierenden Datensatz eingebunden.

So ergibt sich für jeden Standort - jede x und y-Koordinate - eine mögliche Verbesserung der Eigenschaften des Netzwerks, sofern an dieser Stelle die fiktive Station errichtet wird. Das Ergebnis dieser Berechnung ist in Abb. 49 einzusehen. Die Karte ermöglicht eine qualitative Aussage über die Steigerung (Verbesserung) von M_c je nach Standort einer zusätzlichen Station. Die hell gezeichneten Bereiche sind geeignet, um durch zusätzliche Seismometer die Netzwerk-Performance zu verbessern. Schwarz bedeutet keine Änderung von M_c für das gesamte Betrachtungsgebiet. Es zeigt sich, dass zum Beispiel im Nordost-Württembergischen Raum, nördlich von Heidenheim, eine weitere Seismometerstation Vorteile für das Gesamt-Netzwerk haben würde.

3.6.3 Katalogbezogener Ansatz

Der katalogbezogene Ansatz beruht auf der Auswertung der Katalogdaten hinsichtlich der Position und Stärke der einzelnen Beben. Eine Differenzierung nach Stationen wird nicht durchgeführt. In jedem beliebigen Flächenbereich lässt sich eine Menge $N \geq 0$ an Erdbeben aufzeichnen. Die Tiefenlage soll hierbei vernachlässigt werden. Es wurden, wie beim probabilistischen Ansatz, zwei verschiedene Zeiträume (1996-2005 und 2006-2011) betrachtet.

Anhand der Magnituden-Häufigkeitsbeziehung nach Gutenberg-Richter kann anhand der N aufgezeichneten Ereignisse eine Vollständigkeitsmagnitude M_c ermittelt werden. Es gibt verschiedene Ansätze zur Ermittlung von M_c , die hier im Folgenden skizziert werden:

a) MAXC

Hierfür ist eine relativ geringe Probenzahl erforderlich. Die genaue Zahl kann je nach Aufbau der Magnituden-Häufigkeitskurve variieren, doch in unserer Arbeit konnten wir feststellen, dass sich bereits mit 100 Ereignissen eine ausreichend stabile Datenbasis ergibt. In dieser Arbeit wird daher für die Kartengenerierung der MAXC-Ansatz gewählt. Für die Kartengenerierung wurde ein Korrekturfaktor von 0.2 herangezogen. Dieser ergab sich nach stichprobenartigem Vergleich von MAXC- und EMR-Methode bei 21 Positionen entlang der Längen- und Breitengrade (48°N/7°E, 48°N/8°E etc) des Betrachtungsgebiets. Bei einer Probenzahl von je mindestens 500 Ereignissen wurde ein Durchschnittswert von 0.18 für den Korrekturfaktor ermittelt.

b) 90%- und 95% Kriterium

Hierfür wird der Verlauf des b -Wertes und dessen Abweichung von der tatsächlich vorhandenen Zahl an kumulativen Ereignissen im Bereich des Abknickens der Magnituden-Häufigkeitskurve bewertet. Das 90%ige Kriterium der Übereinstimmung benötigt wenige Proben, ist jedoch relativ weich und die so ermittelten Werte für M_c liegen bei den hier verwendeten Datensätzen unter den MAXC-Werten. Die Vollständigkeitsmagnitude M_c wird sehr somit sehr tief angesetzt. Das 95%-Kriterium ergibt höhere Werte für M_c , doch ist eine deutlich größere Probenzahl als 100 erforderlich, um zu stabilen Ergebnissen zu gelangen.

c) EMR-Methode

Diese Methode beruht auf der Einbeziehung der Magnituden-Häufigkeiten auch unterhalb von M_c . Es wird also zugleich eine Analyse des Anstiegs der Ereigniszahlen von unten her und von oben zur Ermittlung von M_c durchgeführt. Es konnte im Zusammenhang mit dieser Arbeit festgestellt werden, dass die Probenzahl deutlich über 100 liegen muss, um Ergebnisse zu erhalten.

In dieser Arbeit wird, bis auf wenige gekennzeichnete Ausnahmen, die Auswertung der Katalogdaten mittels MAXC-Methode durchgeführt. Eine geringe erforderliche Probenzahl und ein sehr stabiler Korrekturfaktor von 0.1-0.2 rechtfertigen dies. Ein Vorteil ist zudem die verbesserte Vergleichsmöglichkeit mit den Daten des probabilistischen Ansatzes. Die Probenzahl wurde auf ein Minimum von 100 festgelegt. Die Auswertung erfolgte mit der Software ZMAP, die an der ETH Zürich entwickelt wurde und dort als Download frei verfügbar ist. (<http://www.seismo.ethz.ch/prod/software/zmap/index>).

Um eine Zahl von $N \geq 100$ zu erhalten, gibt es zwei Möglichkeiten:

- „Scannen“ eines Gebietes mit variablen Radien. Durch variable Radien ist gewährleistet, dass sich immer **100** Ereignisse finden. In Gebieten mit einer niedrigen Erdbebendichte (siehe Abb. 50-A und 50-C) wird der Radius zwangsläufig größer. Im Fall von Baden-Württemberg ist es nur in Teilen (<50 % der Landesfläche) möglich, Radien unter 50 km zu verwenden. Diese Grenze wird in dieser Arbeit als höchste tolerierbare Grenze der Genauigkeit für den katalogbezogenen Ansatz angesehen. Sie stellt einen Kompromiss zwischen einem Maximum an kartierbarer Fläche und der Genauigkeit dar. Abb. 50-B zeigt eine Karte der notwendigen Radien um 100 Ereignisse einzubeziehen. In den Kartendarstellungen (Abb. 51) ist die 50-km Grenze zur Orientierung eingezeichnet. Die Werte für M_c außerhalb dieser Grenze sind mit einer hohen Ortsungenauigkeit behaftet.
- Betrachtung eines Gebiets mit festen Radien. Hierbei wird das betrachtete Gebiet mit einem vorab festgelegten Radius „gescannt“. Sollten weniger als 100 Ereignisse innerhalb des Radius liegen, kann kein Wert für M_c angegeben werden. Wir haben, wie unter Punkt a) angegeben, 50 km als Betrachtungsradius gewählt.

In Abb. 51 (Feste Zahl von Ereignissen) und 52 (Fester Radius = 50 km) sind die Ergebnisse für den Zeitraum 1996-2005 einzusehen. In Abb. 53 und 54 die Ergebnisse für 2006-2011. Für die hellorange gekennzeichneten Flächen konnte kein Wert ermittelt werden.

Es zeigt sich, wie auch beim Probabilistischen Ansatz, eine Verschiebung der höchsten Werte vom Gebiet der Westalb hin zu dem Südwesten Baden-Württembergs. Auch die generelle Performance-Steigerung für Baden-Württemberg wird deutlich. Im Kapitel 3.7.3 werden vergleichende Karten für diesen und den Probabilistischen Ansatz vorgestellt.

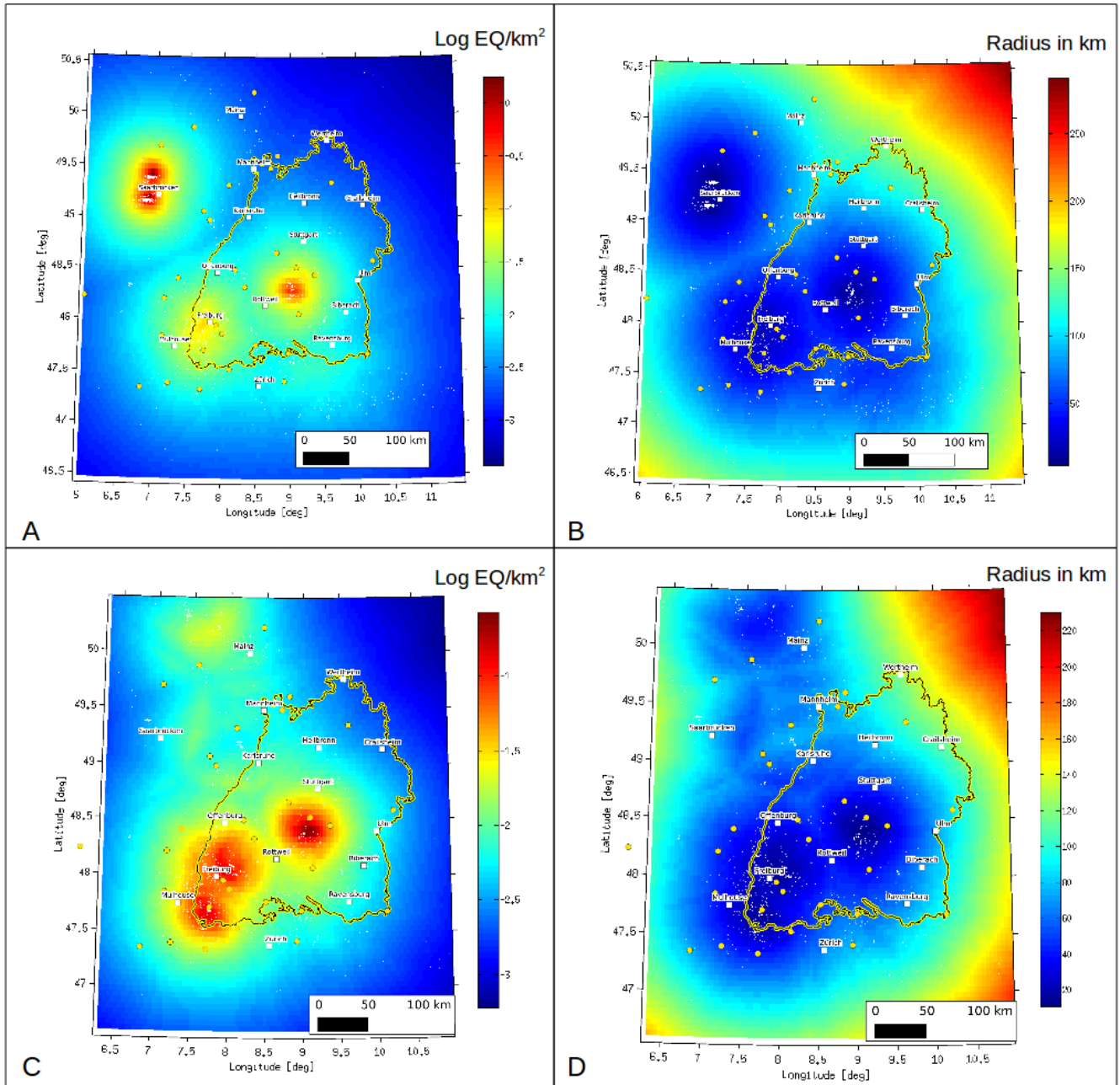


Abb. 50: Erdbebendichte und notwendige Radien, um 100 Ereignisse innerhalb einer Kreisfläche einzuschließen. Abb. A/B für 1996-2005 und C/D für 2006-2011. Erdbebenmessstationen des Gesamtzeitraums sind als gelbe Punkte eingetragen. Erstellt mit ZMAP.

Mc

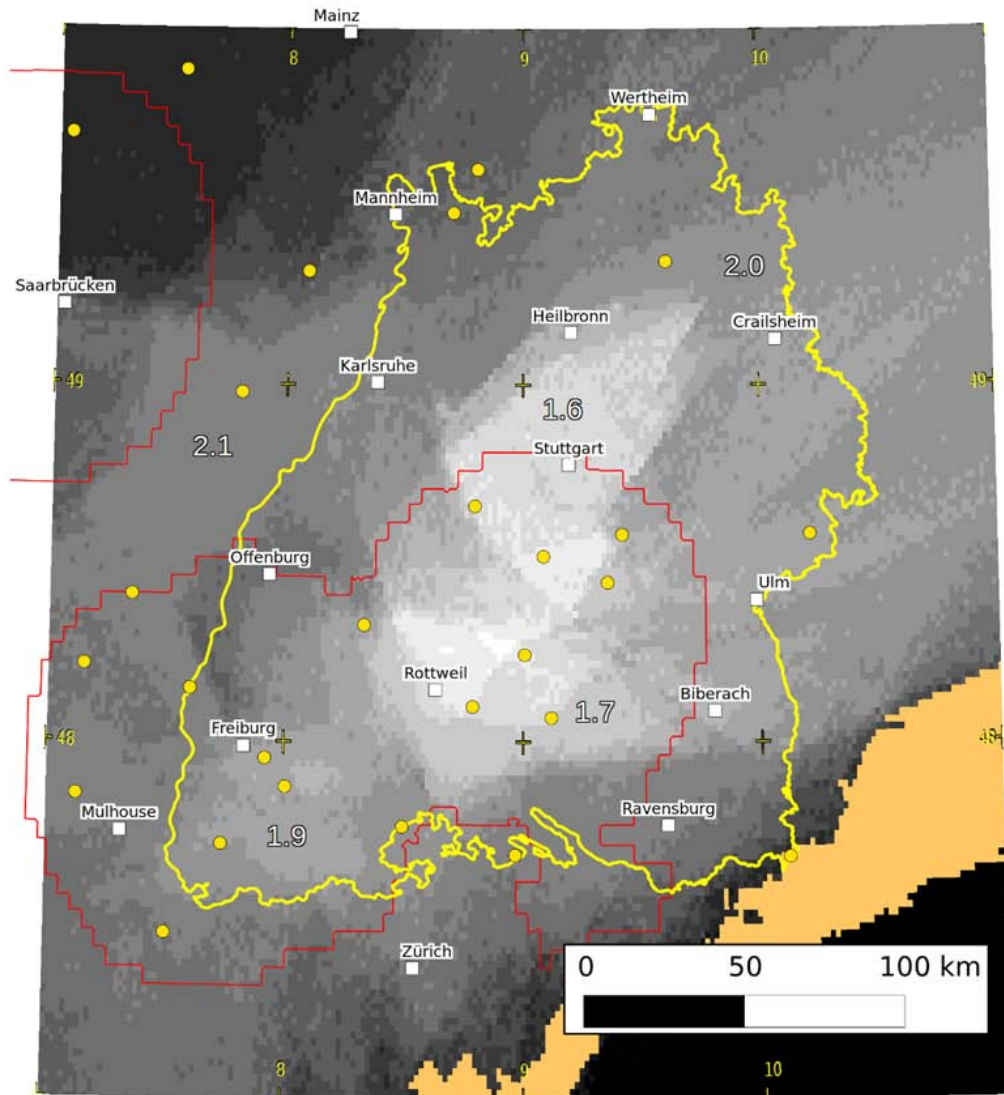
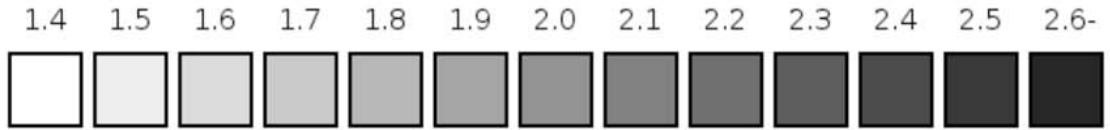


Abb. 51: Karte der Vollständigkeitsmagnitude für den Zeitraum 1996-2005 (Katalogbezogener Ansatz, Probenzahl 100). Die roten Konturen zeigen die Grenze der Genauigkeit von +/- 50 km.

Mc

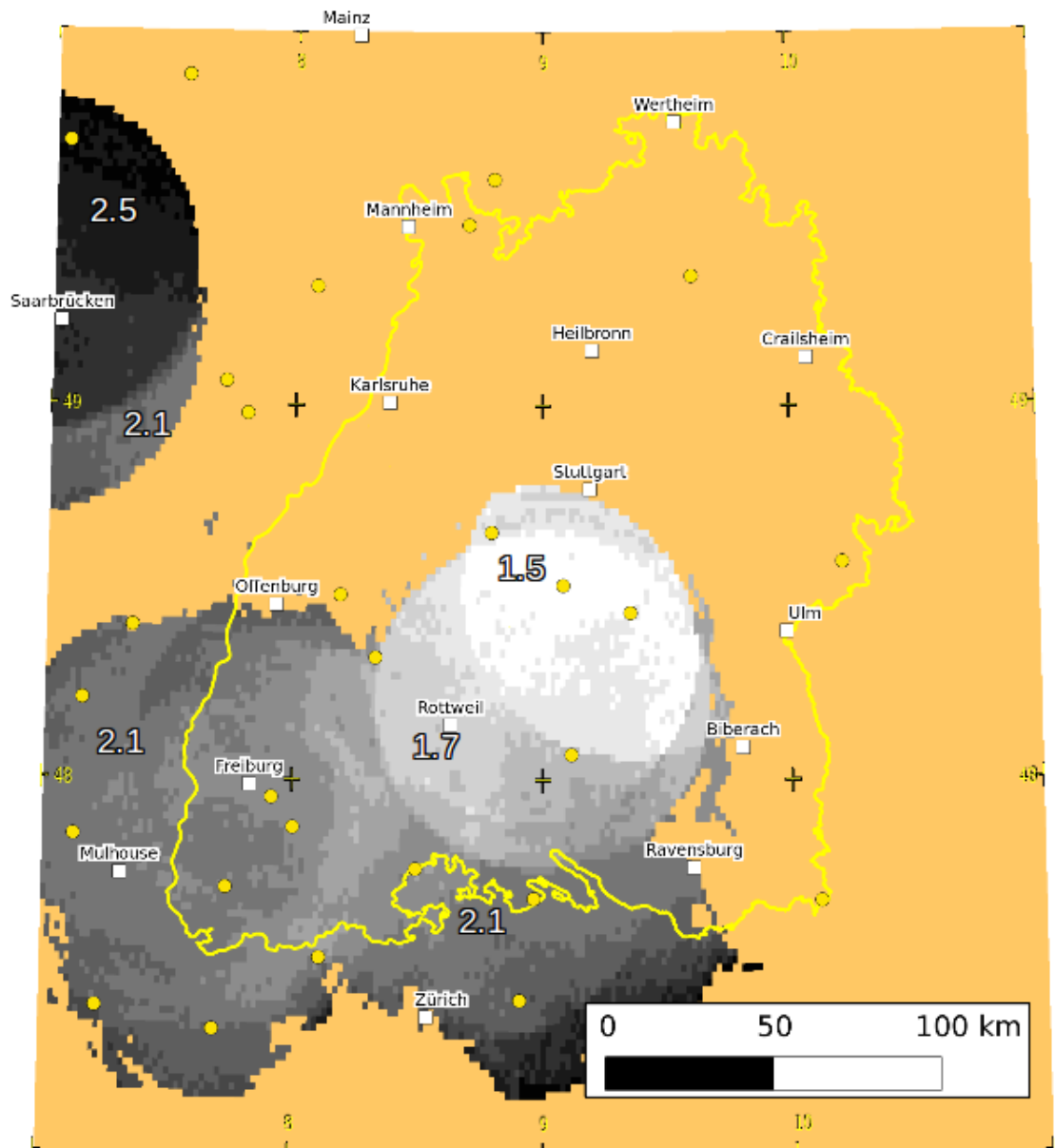


Abb. 52: Karte der Vollständigkeitsmagnitude für den Zeitraum 1996-2005 (Katalogbezogener Ansatz, Probennahme-Radius 50 km).

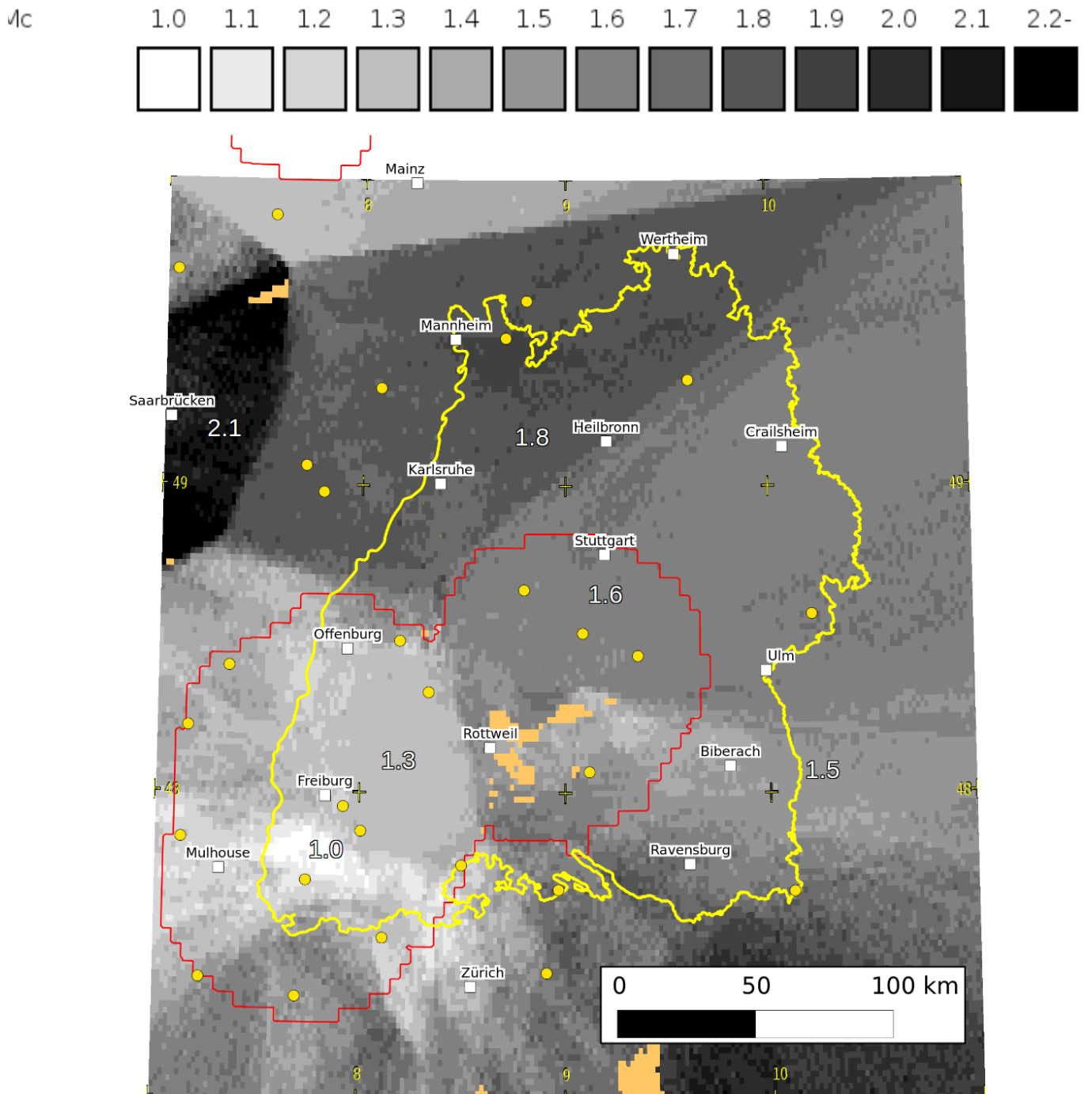


Abb. 53: Karte der Vollständigkeitsmagnitude für den Zeitraum 2006-2011 (Katalogbezogener Ansatz, Probenzahl 100). Die roten Konturen zeigen die Grenze der Genauigkeit von +/- 50 km.

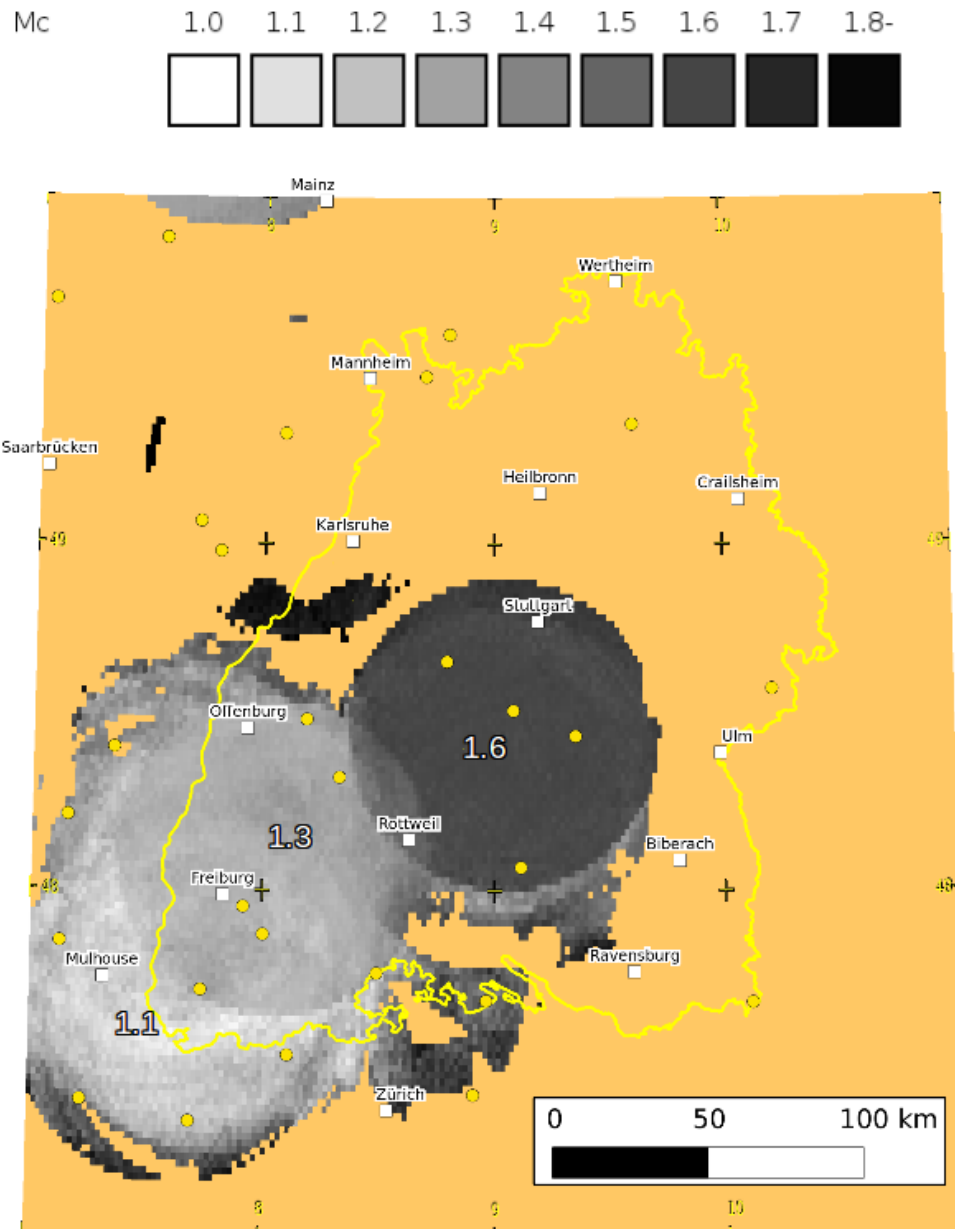


Abb. 54: Karte der Vollständigkeitsmagnitude für den Zeitraum 2006-2011 (Katalogbezogener Ansatz, Probennahme-Radius 50 km).

3.7 Vergleichende Betrachtung

In diesem Teil der Arbeit werden die Ergebnisse der drei verschiedenen Lösungsansätze verglichen. Die Lösungsansätze stellen Daten unterschiedlicher Art zur Verfügung:

- Stationsbezogene Daten aus dem Tag-Nacht-Vergleich. Diese bieten keine Lösungen für eine Kartendarstellung.
- Orts- und stationsabhängige Daten aus dem Probabilistischen Ansatz. Diese bieten die Möglichkeit, Karten zu erzeugen.
- Ortsbezogene Daten aus den Katalogdaten. Diese bieten eine eingeschränkte Möglichkeit, Karten zu erzeugen.

Der Vergleich wird anhand von Tabellen und Karten durchgeführt. Es zeigen sich unterschiedlich gut ausgeprägte Übereinstimmungen, auf die jeweils eingegangen wird.

3.7.1 Tag-Nacht-Vergleich und Probabilistischer Ansatz

In Tabelle 8 sind die Ergebnisse des Tag-Nacht-Vergleichs und des Probabilistischen Ansatzes zusammengefasst. Wir vergleichen den y-Achsenabschnitt der einzelnen Stationen (Mc Prob) mit dem Ergebnis der Tag-Nacht-Vergleiche (Mc TN) sowie deren relative Änderungen über die Zeit. Aufgrund des teilweise sehr geringen Datenumfanges erfolgt dies nur für die Stationen, welche für beide Zeiträume (1996-2005 und 2006-2011) Daten lieferten. Es muss darauf hingewiesen werden, dass die Relativwerte, also die Veränderungen, im Gegensatz zu den Absolutwerten eine größere Relevanz besitzen. Dies liegt darin begründet, dass der Tag-Nacht-Vergleich keine Angabe zur Entfernung von der Station übermittelt. Es kann lediglich davon ausgegangen werden, dass sie maximal in einer Größenordnung im Bereich der durchschnittlichen Stationsentfernung von Online- und MARS-Netz liegt (~60 km).

Tabelle 8: Vergleichstabelle für den Tag-Nacht-Vergleich und den Probabilistischen Ansatz.

	1996-2005	2006-2011		1996-2005	2006-2011	2010-2011		Station	Steigerung Mc Prob	Steigerung Mc TN-0/1
Station	Mc Prob	Mc Prob	Station	Mc TN-0	Mc TN-1	Mc TN-2				
ABH	1.990	0.920	ABH	2.3	1.4			ABH	1.070	0.900
BFO	1.727	1.179	ECH	2.3	2	1.1		BFO	0.548	
BUCH	1.076	1.536	END	2.1	0.9			BUCH	-0.460	
ECH	2.301	1.481	FELD	2.3	1.9	0.9		ECH	0.820	0.300
END	2.597	1.345	GUT	2.3	2	1		END	1.252	1.200
FELD	1.920	1.577	KIZ	2.3	1.9	0.9		FELD	0.343	0.400
GUT	1.457	1.210	LBG	2.3	2			GUT	0.247	0.300
HDH	1.687	1.236	LOMF	2.3	1.2			HDH	0.451	
KIZ	1.612	1.210	MOF	2.3	1.3			KIZ	0.402	0.400
LANF	2.132	1.455	SLE	2.3	0.9	0.9		LANF	0.677	
LBG	1.700	1.493						LBG	0.207	0.300
LOMF	2.129	1.416						LOMF	0.713	1.100
MOF	1.819	0.737						MOF	1.082	1.000
RUP	1.932	0.900						RUP	1.032	
SIND	1.827	1.592						SIND	0.235	
SISB	1.705	1.830						SISB	-0.125	
SLE	2.121	0.900						SLE	1.221	1.400
SWS	2.229	1.900						SWS	0.329	
TOD	1.694	1.511						TOD	0.183	
UBR	1.700	1.397						UBR	0.303	
Mittelwert	1.868	1.341		2.28	1.55	0.98			0.527	0.730
Std.-Abw.	0.370	0.260		0.07	0.48	0.33			0.444	0.410
Gesamtkat.	1.883	1.323		2.3	2	1.4			0.56	0.3

Aus der Tabelle lassen sich verschiedene Ergebnisse ableiten:

- Die Absolutwerte des Probabilistischen Ansatzes liegen um $\sim 0.2-0.4$ Magnituden unter denen des Tag-Nacht-Vergleichs. Sie sind für deutlich mehr Stationen verfügbar.
- Die relativen Änderungen liegen mit 0.527 und 0.73 in einer vergleichbaren Größenordnung und bestätigen gegenseitig die Relevanz der Ansätze sowie die Beobachtung einer Verbesserung der Empfindlichkeit des Seismologischen Netzwerks.
- Dass der Wert der Steigerung um 0.73 bei einem hypothetischen Vergleich der Jahre 1996-2005 und 2010-2011 noch höher anzusetzen wäre. Man vergleiche hierzu auch die Werte von Mc TN-1 und Mc TN-2, die die zwei Zeiträume 2006-2011 und 2010-2011 wiedergeben.
- Die große Varianz bei den Mc TN-1-Werten ist kennzeichnend für die seit 2010 vollzogene Verbesserung der Performance. Diese Verbesserung ist nicht bei allen Stationen ausgeprägt.

3.7.2 Probabilistischer Ansatz und Katalogbezogener Ansatz

Die oben vorgestellten Karten lassen sich durch eine einfache Differenzbildung jedes Datenpunkts miteinander vergleichen. Die Ergebnisse für 1996-2005 und 2006-2011 sind in den Abb. 55 bis 58 zu sehen. Gebiete, in denen eine gute Übereinstimmung mit Abweichungen von maximal +/- 0.2 Magnituden finden, sind in grün gehalten. Liegen die Werte von Mc des Katalogbezogenen Ansatzes unter denen des Probabilistischen Ansatzes, so wurden Rottöne verwendet (hellrot für -0.3 bis -0.4 sowie dunkelrot für Abweichungen von mehr als -0.5). Analog dazu wurde hellblau und dunkelblau für Gebiete verwendet, in denen der Katalogbezogene Ansatz höhere Werte für Mc liefert (hellblau für 0.3 bis 0.4 sowie dunkelblau für Abweichungen von mehr als 0.5).

Es zeigen sich weitgehende Übereinstimmungen zwischen dem probabilistischen und dem katalogbezogenen Ansatz. Für die Jahre 1996-2005 liefert der katalogbezogene Ansatz mit fester Probenzahl vor allem im Raum nördlich von Stuttgart und nordöstlich der Landesgrenze bessere (niedrigere) Werte für Mc. In diesen Bereichen sind allerdings die räumlichen Ungenauigkeiten des katalogbezogenen Ansatzes als relativ hoch anzusehen (> 50 km), die Karte ist daher in diesen Gebieten kritisch zu betrachten. Bei Verwendung von festen Radien ist der besagte Unterschied auf das Gebiet der Schwäbischen Alb konzentriert.

Für die Jahre 2006-2011 zeigt sich ein umgekehrter Trend: in einem Streifen von Saarbrücken über Rottweil bis zum Bodenseegebiet liefert der katalogbezogene Ansatz schlechtere (höhere) Werte für Mc. Gebiete mit besseren (niedrigeren) Werte treten dagegen zurück. Der katalogbezogene Ansatz zeigt also - abhängig vom Gebiet - die Änderungen in der „Netzwerk-Performance“ weniger ausgeprägt als der probabilistische Ansatz.

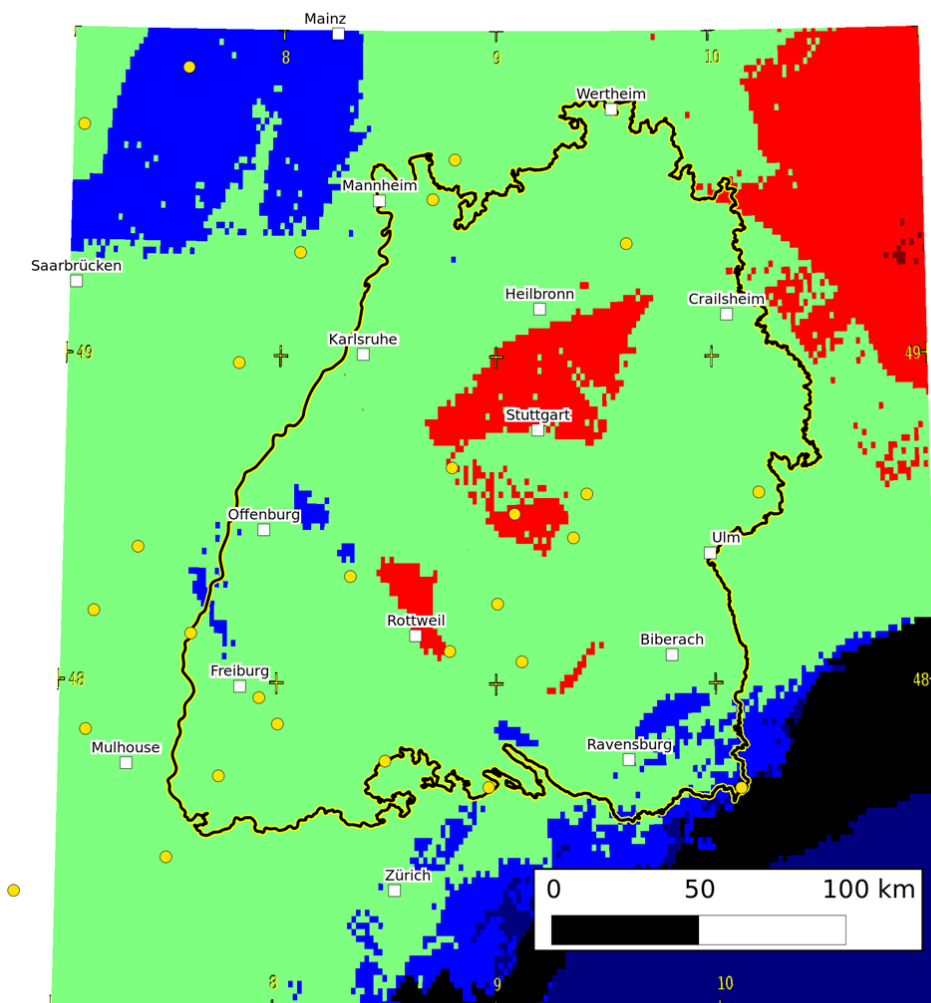


Abb. 55: Darstellung der Differenzen zwischen Probabilistischem und Katalogbezogenem Ansatz (Feste Probenzahl N=100) für 1996-2005.

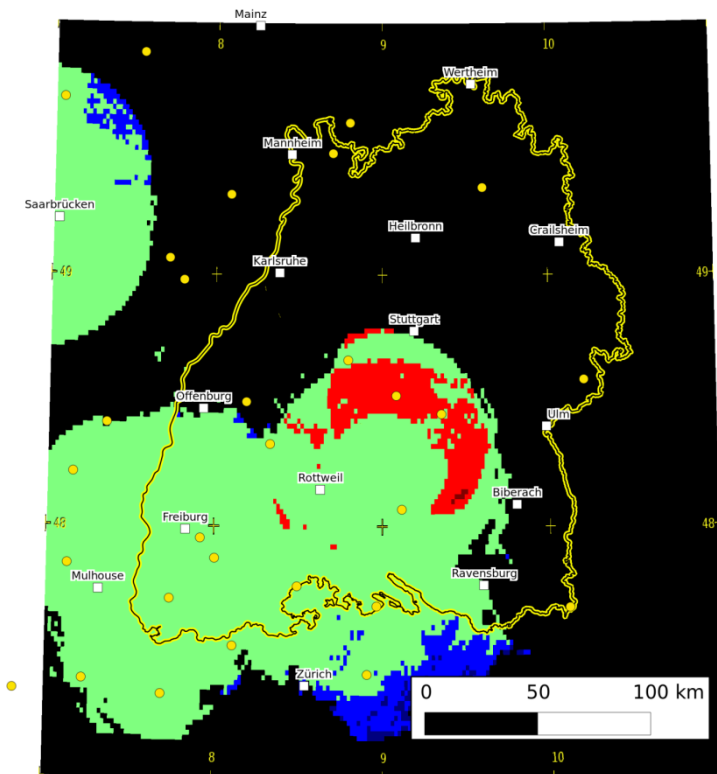


Abb. 56: Darstellung der Differenzen zwischen Probabilistischem und Katalogbezogenem Ansatz (Fester Radius $R=50$ km) für 1996-2005.

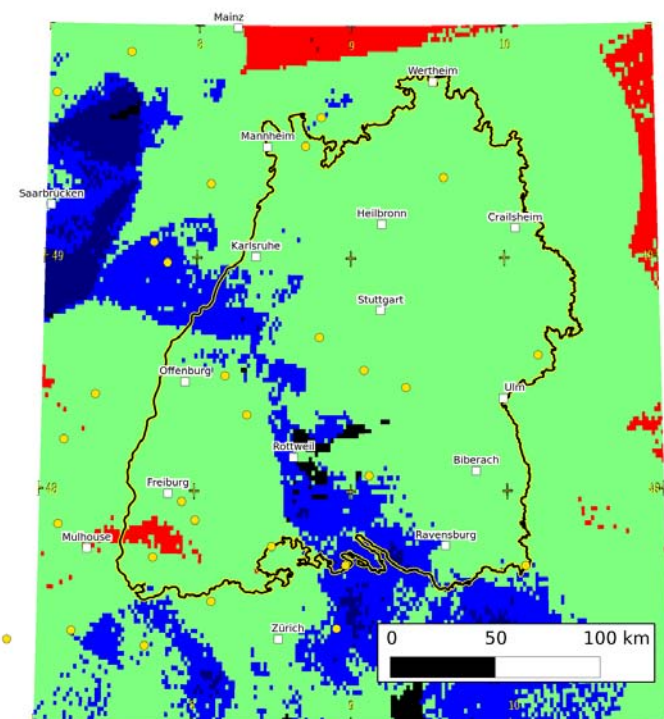


Abb. 57: Darstellung der Differenzen zwischen Probabilistischem und Katalogbezogenem Ansatz (Feste Probenzahl $N=100$) für 2006-2011

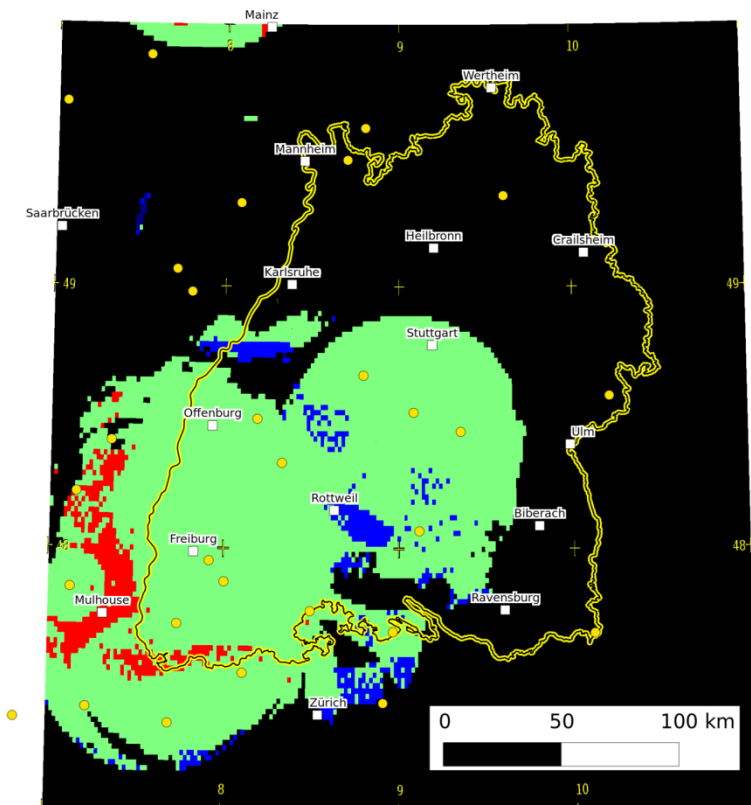


Abb. 58: Darstellung der Differenzen zwischen Probabilistischem und Katalogbezogenem Ansatz (Fester Radius $R=50$ km) für 2006-2011.

3.7.3 Fazit

Der Vergleich von Tag-Nacht-Ereigniszahlen liefert hinsichtlich absoluter Werte von M_c sehr konservative Abschätzungen, die unter denen der anderen Ansätze liegen. Dieser Unterschied nimmt für 2010-2011 ab, hier wird ein ähnlicher Wert (~ 1.0) von M_c erreicht. Der Ansatz ist als Kontrollinstanz geeignet, um die Werte der anderen zwei Ansätze hinsichtlich der relativen Änderungen der Netzwerkperformance zu prüfen. Die Verortung der beim Tag-Nacht-Vergleich ermittelten Werte für M_c ist schwierig. Es kann jedoch ein relevanter Radius, also eine Gültigkeit, in der Größenordnung vom durchschnittlichen Stationsabstand (~ 60 km) angesetzt werden.

Der Probabilistische Ansatz liefert Daten für jeden Koordinatenpunkt Baden-Württembergs. Der große Vorteil dieses Ansatzes liegt in der Möglichkeit, Stationsausfälle und Änderungen im Netzwerk zu berücksichtigen. Die Karten decken sich weitestgehend mit denen des Katalogbezogenen Ansatzes.

Der Katalogbezogene Ansatz liefert für einen Teil Baden-Württembergs Daten. Die größtmögliche Abdeckung ist jedoch an eine niedrige Ortsgenauigkeit gekoppelt. Umgekehrt wird bei hohen Ortsgenauigkeiten nur eine geringe Abdeckung - nur für die Mitte und den Südosten des Landes - erreicht. Stationsausfälle oder dynamische Änderungen des Messnetzwerks können nicht berücksichtigt werden.

Es wird daher empfohlen bei zukünftigen Studien zur Vollständigkeitsmagnitude den Probabilistischen Ansatz zu wählen. Es wird zudem empfohlen, eine Untersuchung zur Vollständigkeitsmagnitude in 3-4 Jahren durchzuführen. Bis dahin sollten genug Daten der neuen Netzwerkconfiguration gesammelt worden sein, um ein aktuelleres Bild der Performance zu erhalten. Die Angaben in dieser Arbeit für die Jahre 2006-2011 spiegeln die verbesserten Netzwerkeigenschaften nicht vollständig wider, die Performance wird unterbewertet. Es empfiehlt sich zudem, den genauen Umfang der Unvollständigkeits - landesweit - in einer qualitativen Untersuchung zu ermitteln.

3.8 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird versucht, ein möglichst genaues Bild der räumlichen Verteilung der Vollständigkeitsmagnitude in Baden-Württemberg zu zeichnen. Es werden verschiedene Zeiträume (1996-2005, 2006-2011 sowie 2010-2011) untersucht, um zusätzlich auch die zeitliche Änderung zu dokumentieren. Drei verschiedene Ansätze werden verwendet:

- a) Der Vergleich der registrierten Erdbeben Tags und Nachts.
- b) Der Probabilistische Ansatz, bei dem die Performance der einzelnen Seismometer-Stationen im Kontext des Netzwerks bewertet wird.
- c) Der Katalogbezogene Ansatz, bei dem die Vollständigkeitsmagnitude in Baden-Württembergs unabhängig von Stationsparametern aus dem instrumentellen Gesamtkatalog der Erdbeben ermittelt wird.

Die Vergleichbarkeit ist durch die Art der Analyseergebnisse (Raumbezogene vs. Nicht-Raumbezogene Daten) eingeschränkt, doch zeigen sich dort, wo ein Vergleich möglich ist, gute Übereinstimmungen. Der Probabilistische Ansatz scheint die beste Möglichkeit zu bieten, das Landesgebiet mit guter Genauigkeit auszukartieren. Es kann festgehalten werden, dass:

- a) Die Vollständigkeitsmagnitude großen regionalen Schwankungen unterworfen ist. Es finden sich über das gesamte Landesgebiet Differenzen im Bereich von 0.7 Magnituden. Dies gilt für beide betrachteten Zeiträume.
- b) Die Vollständigkeitsmagnitude im Zeitraum 1996-2005 die niedrigsten Werte im Bereich des Erdbebengebiets der westlichen Schwäbischen Alb aufwies, dieses Gebiet der niedrigen Vollständigkeitsmagnituden sich aber später weiter in den Südwesten des Landes verlagerte. Dort kann anhand der Ergebnisse dieser Arbeit rezent von einer Vollständigkeitsmagnitude im Bereich von rund 1.2 ausgegangen werden. Der Nordosten des Landes kommt auf Werte von rund 1.7.
- c) Durch die zunehmende Zahl an Online-Stationen, und hier sei vor allem das BFO genannt, die Empfindlichkeit des Gesamtnetzwerks deutlich verbessert wurde. Die Änderungen betragen bis zu einer Magnitude im Südwesten des Landes, im Raum zwischen Ulm und Stuttgart nur rund 0.2 Magnituden.
- d) Die erhöhte Empfindlichkeit sich in den Ergebnissen nicht vollständig widerspiegelt. Die Jahre 2010 und 2011 (in denen die größten Performanceänderungen vorkommen) sind Teil der Gesamtheit der Daten des Zeitraums 2006-2011, und überprägen ihn somit lediglich.

Abschließend darf nicht unerwähnt bleiben, dass sich die Räumliche Verteilung der Vollständigkeitsmagnitudenwerte nur auf die gesammelten Katalogdaten des Landeserdbebendienstes beziehen und keine Ergebnisse der kleinskaligen Messnetzwerke im Umfeld von Tiefengeothermie-Anlagen berücksichtigen. (Anmerkung: Die BGR-Station Landau (LDAU) hat mit 57 Detektionsbeteiligungen seit 2009 zu wenig Datenmaterial, um in dieser Arbeit Verwendung zu finden.)

Die Vollständigkeitsmagnitude liegt im Gebiet der Standorte Insheim und Landau im zentralen Oberrheingraben bei $\sim 0.8 - 0.9$ (Vortrag Küperkoch, Sitzung der AG Seismologie, Schmitten/Taunus, 2013). Im Bereich des etwas großzügiger ausgelegten Netzwerkes der Universität Frankfurt im Raum Groß-Gerau/Rheinhessen im nördlichen Oberrheingraben bei ~ 1.0 (Vortrag Homuth, Sitzung der AG Seismologie, Schmitten/Taunus, 2013). Diese Werte zeigen eindrücklich, dass, im Gegensatz zu landesweiten Messnetzwerken, gezielt vor Ort installierte Seismometer deutliche Verbesserungen bieten. Vor der Einrichtung dieser Stationen lag die Vollständigkeitsmagnitude beispielsweise bei Landau im Bereich von 2.1 - 2.2 (Werte für 1996-2005; übereinstimmend für Probabilistischen und Katalogbezogenen Ansatz). Erdbeben geringerer Stärke konnten nicht vollständig erfasst werden.

Die Bearbeiter hoffen, dass mit dieser Studie ein guter Einblick in die räumliche Verteilung und die zeitliche Änderung der Vollständigkeitsmagnitude gelang und die Dynamik der Netzwerkkonfiguration deutlich wird. Wir danken an dieser Stelle nochmals den Mitarbeitern des Landeserdbebendienstes Baden-Württemberg für ihre Kooperation.

3.9 Literatur

- Brüstle, W. und Stange, St. (2002): Erdbeben in Baden-Württemberg - Jahresbericht 2000.- Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, Freiburg i. Br., 2002.
- Häge, G. (2008): Entwicklung und Validierung eines neuen Verfahrens zur Kartierung seismisch aktiver Verwerfungen durch Kurzzeit-Kleinstbebenmessungen.- Dissertation, Stuttgart.
- Joswig, M. (2008): Nanoseismic monitoring fills the gap between microseismic networks and passive seismic.- First Break, 26, 121-128.
- Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (1999): Informationsheft 11 des Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau.- Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, Freiburg i. Br..
- Leydecker, G. (2011): Erdbebenkatalog für Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 800 bis 2008.- Geologisches Jahrbuch, Reihe E, 59.
- Mignan, A. und J. Woessner (2012): Estimating the magnitude of completeness for earthquake catalogs.- Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis, doi:10.5078/corssa-00180805. Available at <http://www.corssa.org>

- Mignan, A.; Werner, M.; Wiemer, S.; Chen, C.; Wu, Y. (2010): Bayesian estimation of the spatially varying Completeness Magnitude of earthquake catalogs.- Am. Geophys. U., Fall Meeting S44B-08.
- Rydelek, P. A., und I. S. Sacks (1989): Testing the completeness of earthquake catalogs and the hypothesis of self-similarity.- Nature, 337, 251–253.
- Sagar, S. und M. Leonard (2007): Mapping the magnitude of completeness of the Australian earthquake catalogue.- Proceedings of AEES.
- Schneider, G. (1971): Seismizität und Seismotektonik der Schwäbischen Alb.- Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- Schorlemmer, D., Mele, F. und Marzocchi, W. (2010): A completeness analysis of the National Seismic Network of Italy .- J. Geophys. Res., 115, B04308, doi:10.1029/2008JB006097
- Schorlemmer, D. und Woessner, J. (2008): Probability of Detecting an Earthquake .- Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 98, No. 5, pp. 2103–2117 , doi: 10.1785/0120070105 .
- Schweitzer, J. und Lee, W.H.K. (2003): Old Seismic Bulletins to 1920: A collective heritage from early seismologists.- International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Volume 81B.
- Stange (2006): ML determination for local and regional events using a sparse network in Southwestern Germany.- Journal of Seismology, Vol 10, 247-257.
- Wiemer, S. (2001): A Software package to analyze seismicity: ZMAP .- Seismological Res. Letters, 72, 2.
- Woessner, J., und S. Wiemer (2005): Assessing the quality of earthquake catalogues: Estimating the magnitude of completeness and its uncertainty.- Bull. Seismol. Soc. Am., 95.

3.10 Anhänge

Die Anhänge können am Institut für Geophysik der Universität Stuttgart angefordert werden.

Anhang A: Tabelle der in der Arbeit berücksichtigten Seismometerstationen

Anhang B: Diagramme zum Vergleich der Detektionszahlen Tags und Nachts

Anhang C: Diagramme zum Probabilistischen Ansatz, Karten der Verteilung der Vollständigkeitsmagnitude, Parameter-Tabellen