

Gefährdung von Endlagern für radioaktive Abfallstoffe durch Kleinstbeben und deren Überwachung mittels Nanoseismic Monitoring

Von der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Patrick Blascheck
aus Böblingen

Hauptberichter: **Prof. Dr. Manfred Joswig**

Mitberichter: **Prof. Dr. Georg Rümpker**

Tag der mündlichen Prüfung: 08.02.2019

Institut für Geophysik der Universität Stuttgart

2018

„Handele so, dass die Wirkungen deiner Handlungen verträglich sind mit der Permanenz des menschlichen Lebens auf Erden“

– Das Prinzip Verantwortung

(Hans Jonas – Philosoph, 1903 – 1993)

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Stuttgart, den 1. August 2018

Patrick Blascheck

Danksagung

Sehr herzlich bedanken möchte ich mich bei ...

... Prof. Dr. Manfred Joswig für die Möglichkeit zur Promotion, die Betreuung meiner Arbeit sowie die Möglichkeit diese selbstständig zu gestalten.

... meinem Mitberichter Prof. Dr. Georg Rümpker sowie dem Prüfungsausschussvorsitzenden Prof. Dr.-Ing. Christian Moormann

... Dr. Rudolf Widmer-Schniedrig, für sein umfassendes Feedback.

... allen Mitarbeitern des Instituts für Geophysik, die mich bei meiner Arbeit unterstützt haben.

... dem Mont Terri Konsortium für die Förderung meiner Arbeit sowie den Mitarbeitern für deren uneingeschränkte Unterstützung.

... den Eigentümern der Grundstücke, welche für das Aufstellen der Messgeräte zur Verfügung gestellt wurden.

... Meiner Freundin, meiner Familie, Kommilitonen und Freunden die mich tatkräftig bei dieser Arbeit unterstützt haben.

Kurzfassung

Die sichere Verwahrung der anfallenden radioaktiven Abfallstoffe erfährt seit dem Moratorium in Gorleben sowie dem Deutschen Atomausstieg 2011 ein steigendes Interesse. Neben der Auswahl eines geeigneten Standortes spielt die dauerhafte Überwachung eine erhebliche Rolle. In Deutschland kommen derzeit mehrere Wirtsgesteine in Frage: Ton, Salz und Granit. Unabhängig von der Wahl des Wirtsgesteins stellen Spannungsabbauprozesse, neben vielen anderen, eine Gefahr für die Biosphäre dar. Diese, als Erdbeben registrierbaren Prozesse, sollen in dieser Arbeit mit der seismischen Messmethode 'Nanoseismic Monitoring' untersucht werden. Diese bietet, durch die Verbesserung der Detektionsempfindlichkeit, eine Verkürzung der Messdauer. Die Annahme der Extrapolierbarkeit der Gutenberg-Richter-Beziehung hin zu kleinen Magnituden liegt dafür zu Grunde. Somit kann pro Magnitudenstufe die zehnfache Anzahl an Ereignissen erwartet werden. Die verbesserte Detektionsempfindlichkeit ermöglicht eine schnellere Bewertung eines potentiellen Standorts sowie die Analyse möglicher (unbekannter) Störungszonen.

Dazu wurde im Rahmen eines zehnjährigen Forschungsprojekts am schweizer Felslabor Mont Terri im April 2014 der Aufbau eines Messnetzwerks begonnen und im Sommer 2015 abgeschlossen. Dieses besteht aus 4 Mini-Arrays die sowohl überirdisch als auch unterirdisch im Felslabor bzw. im angrenzenden Tunnel installiert wurden. In dieser Arbeit wird der Anfangszeitraum von 18 Monaten ausgewertet. Zusätzliche Daten standen von den Stationen benachbarter Erdbebendienste (SED und RéNaSS) zur Verfügung. Es konnte, für die eigenen Daten, eine sehr hohe Datenverfügbarkeit erreicht werden sowie die lückenlose Aufzeichnung von mindestens einem Mini-Array seit Mai 2014.

Für die Bewertung der Lokalisierungsgenauigkeit konnten 11, vom Schweizer Erdbebendienst lokalisierte, Ereignisse aus dem Umfeld (10 km) im Untersuchungszeitraum, ein singular starkes Ereignis außerhalb sowie 39 bestätigte Steinbruchsprengungen herangezogen werden. Weiterhin wurde die Magnitudengenauigkeit anhand von 9 Ereignissen untersucht, die sich nach dem vollständigen Aufbau des Messnetzwerks ereigneten und bei denen eine detaillierte Auswertung vom Schweizer Erdbebendienst verfügbar war. Zusätzlich konnte für ein Mini-Array, für lokale Ereignisse, eine Richtungsabhängigkeit

des Backazimuthbeams in Richtung der Schichtorientierung festgestellt werden. Für das vollständig aufgebaute Netzwerk wurde eine Lokalisierungsgenauigkeit von lateral 425 m , sowie in der Tiefe von 800 m ermittelt. In der Magnitudenbestimmung ergab sich eine Abweichung, von den vom Schweizer Erdbebendienst bestimmten Magnituden, von $0,33$ Magnitudeneinheiten. Die Ereigniszahl der Lokalisierungen konnte im größeren Umfeld (100 km) um 40% auf fast 500 Ereignisse erhöht werden. Für den Nahbereich (10 km) konnte die Anzahl lokalisierter Ereignisse, im Vergleich zu Bulletins, auf insgesamt 51 verfünffacht werden. Der Magnitudenbereich konnte um mehr als zwei Größenordnungen auf $M_L = -2,0$ erweitert werden. Die Empfindlichkeit entspricht der in Olkiluoto (Finnland), für das seismische Monitoring, geforderten. Dort wird derzeit das weltweit erste Endlager für hochradioaktive Abfallstoffe gebaut. Diese Empfindlichkeit ermöglicht Brüche im Meterbereich zu detektieren und Hinweise auf existierende aktive Verwerfungen zu geben.

Für das Felslabor konnte eine aktive seismische Umgebung festgestellt werden. Die aufgetretenen Ereignisse sind überwiegend flach, etwa die Hälfte wurde im Bereich des Basements lokalisiert. Diese Ergebnisse konnten mit einer vom Schweizer Erdbebendienst verwendeten Software (NonLinLoc) verifiziert werden. Eine hierarchische Sortierung mittels Kreuzkorrelationsdurchschnitten konnte erfolgreich Ereignisse gruppieren. Die ermittelten Gruppen konnten so, um nicht lokalisierbare Ereignisse, erweitert werden.

Diese Ergebnisse zeigen, dass Nanoseismic Monitoring eine geeignete Methode ist um sowohl die Standortsuche von Endlagern zu unterstützen, als auch für die Dauerüberwachung in Frage zu kommen.

Abstract

The interest in safe storage of radioactive waste has increased since the moratorium in Gorleben and the German nuclear phaseout. Besides, the selection of a suitable location for the permanent monitoring is a crucial element. Clay, salt, and granite are possible host rocks in Germany. Independent of the choice of the host rock and besides other dangers, the strain relaxation process can pose a threat to the biosphere. The latter, registered as earthquakes, are examined within this thesis by applying the seismic method 'Nanoseismic Monitoring'. It allows by an enhancement of the detection threshold to shorten the time of monitoring. This is based on the assumption of extrapolating the Gutenberg-Richter scale towards small magnitudes. Therefore, per order of magnitude a tenfold number of earthquakes can be expected. The improved detection threshold enables a quicker rating of potential locations as well as the analysis of possible (undetected) fault zones.

A ten year research project is conducted at the rock laboratory Mont Terri (Switzerland). In April 2014 the construction of a monitoring network started, being completed in summer of 2015. It consists of 4 mini-arrays, located on the surface as well as inside the laboratory and the adjacent tunnel. The first 18 months are evaluated within this thesis. Additional data was available from nearby stations of neighboring earthquake services (SED and RéNaSS). For the own data a very high availability was achieved with the gap free recording of at least one mini-array since May 2014.

For the rating of the location accuracy 11 events, located by the Swiss earthquake service, in the vicinity of 10 *km* within the evaluation timeframe as well as one singular strong event outside the timeframe were available. Additionally 39 confirmed quarry blasts were taken into account. The accuracy of magnitude determination was evaluated with 9 events, with detailed information from the Swiss earthquake service available, that occurred after the network was fully functional. One mini-array showed, for local events, a direction dependency of the backazimuthal beam on the orientation of the underground. The completely installed network yields a location accuracy of laterally 425 *m* and 800 *m* for the depth determination. For the magnitude determination a discrepancy of 0.33 units of magnitude with respect to the results of the Swiss earthquake service was observed. In

the greater area (100 km) an increase of 40% of the amount of earthquakes was achieved, resulting in almost 500 events. In the vicinity (10 km) the amount was quintupled, compared to available bulletins, resulting in 51 events. The magnitude range was extended on the lower end for more than two orders of magnitude to $M_L = -2.0$. This detection capability is sufficient for the seismic monitoring in Olkiluoto (Finland). This is the first ultimate storage facility for high radioactive waste worldwide. This capability allows the detection of fractures in the extend of meters and hints towards active existing fault zones. The vicinity of the rock laboratory was rated as seismically active. Most of the earthquakes are of shallow origin, about half of them occurred inside the basement. This result was verified with the software (NonLinLoc) used by the Swiss earthquake service. A hierarchical sorting by the mean cross correlations allowed a clustering. The determined groups were successfully extended by unlocated events.

These results show that Nanoseismic Monitoring is a suitable method to support the location search of ultimate waste facilities as well as the permanent monitoring.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	9
Abstract	11
Inhaltsverzeichnis	13
Abkürzungsverzeichnis	17
Einheitenverzeichnis	18
Softwareverzeichnis	19
1 Einleitung	21
1.1 Motivation	22
1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung	22
1.3 Gliederung der Arbeit	23
2 Radioaktive Abfallstoffe	25
2.1 Geschichte der Kernenergie	28
2.2 Brennelemente Kreislauf	29
2.3 Mengenabschätzung radioaktiven Abfalls	31
3 Lagerung radioaktiver Abfallstoffe	33
3.1 Endlagerbergwerk mit Reversibilität	35
3.1.1 Wirtsgesteine	35
3.1.2 Internationale Vorgaben	40
3.1.3 Nationale Vorgaben und Gesetze	44
3.1.4 Hintergrundseismizität	46
3.2 Testsites, Zwischenlager und Endlager	48
3.2.1 Labore und Testsites	48
3.2.2 Zwischenlagerung	51
3.2.3 Endlager	52

3.3	Stand der Technik – Seismische Langzeitüberwachung	52
3.3.1	Nanoseismic Monitoring	55
4	Fallstudie: Felslabor Mont Terri	59
4.1	Einführung	61
4.1.1	Lage	61
4.1.2	Geologie und Tektonik	62
4.1.3	Hintergrundseismizität	68
4.1.4	Relokalisierung	71
4.2	Seismisches Monitoring	72
4.2.1	Permanentes Messnetzwerk	72
4.2.2	Standortqualität	77
4.2.3	Datenprozessierung	80
4.2.4	Lokalisierungs- und Magnitudengenauigkeit	81
4.3	Seismizität in Mont Terri	98
4.3.1	Lokale Seismizität	98
4.3.2	Clustering	103
4.3.3	Seismizität am Felslabor	112
5	Zusammenfassung	117
6	Diskussion	119
7	Ausblick	123
	Anhang	125
A	Eurock Paper	125
A.1	Introduction	126
A.1.1	The Mont Terri Rock Laboratory	126
A.1.2	Tectonic Setting	126
A.1.3	Background Seismicity	127
A.2	Nanoseismic Monitoring	128
A.3	Conducted Measurements	129
A.4	Results	131
A.4.1	Detection Limit Estimation	131
A.4.2	Global and Regional Seismicity	132
A.4.3	Local seismicity	132

A.5	Conclusions	134
A.6	Outlook	134
B	Datenverfügbarkeit	135
C	Software	147
C.1	HypoDD	147
C.2	NonLinLoc	148
D	Ereignisse	149
D.1	Seismogramme und Sonogramme, nach Clustern sortiert	149
D.2	Ereignistabelle, zeitlich sortiert	172
	Abbildungsverzeichnis	175
	Tabellenverzeichnis	179
	Literaturverzeichnis	181

Abkürzungsverzeichnis

1C	Ein-Komponenten [Seismometer]
3C	Drei-Komponenten [Seismometer]
AGIS	Arbeitsgruppe Induzierte Seismizität
AKW	Atomkraftwerk
CASTOR	cask for storage and transport of radioactive material (Behälter zur Aufbewahrung und zum Transport radioaktiven Materials)
CCS	Carbon Capture and Storage (CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung)
EDZ	excavation damaged zone (Auflockerungszone)
EHRA	Endlager für hochradioaktive Abfälle
GPS	Global Positioning System
haw	high active waste (hochradioaktive Abfälle)
IAEA	International Atomic Energy Agency (Internationale Atomenergie-Organisation)
law	low active waste (schwachradioaktive Abfälle)
LED	Landeserdbebendienst Südwest
maw	medium active waste (mittelradioaktive Abfälle)
NLL	NonLinLoc siehe Kapitel C.2
NSM	Nanoseismic Monitoring siehe Kapitel 3.3.1
PSD	Power Spectral Density (Spektrale Leistungsdichte)
P&T	Partitionierung und Transmutation
PUREX	Plutonium and Uranium Recovery by EXtraction
RéNaSS	Réseau National de Surveillance Sismique (Französischer Erdbebendienst)
SED	Schweizer Erdbebendienst

SNR	Signal-to-Noise-Ratio (Signal-Rausch-Verhältnis)
SNS	Seismic Navigating System (Miniarray)
swisstopo	Bundesamt für Landestopografie, Schweiz
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
URL	Underground Research Laboratory (Unterirdisches Forschungslabor)

Einheitenverzeichnis

<i>Bq</i>	Becquerel
<i>cm</i>	Zentimeter
<i>dB</i>	Dezibel
<i>Hz</i>	Hertz
<i>km</i>	Kilometer
<i>m</i>	Meter
<i>Ma</i>	Megaannum (1 Millionen Jahre)
M	Magnitude
M_c	Magnitude of Completeness (Vollständigkeitsmagnitude)
M_L	Lokalmagnitude
M_w	Momenten-Magnituden
<i>nm</i>	Nanometer
<i>s</i>	Sekunde
V	Volt

Softwareverzeichnis

- GMT* Generic Mapping Tools
- HypoDD* HypoDD, siehe Kapitel C.1
- HypoLine* HypoLine, siehe Kapitel 3.3.1
- NonLinLoc* NonLinLoc, siehe Kapitel C.2
- SonoView* SonoView, siehe Kapitel 3.3.1

Kapitel 1

Einleitung

1.1	Motivation	22
1.2	Aufgabenstellung und Zielsetzung	22
1.3	Gliederung der Arbeit	23

1.1 Motivation

Das Bild nahezu unbegrenzter, sauberer, allzeit verfügbarer und risikoarmer Atomenergie bekam mit diversen Katastrophen (Harrisburg USA 1979, Tschernobyl Ukraine 1986) im letzten Jahrhundert erste Risse. Nach Fukushima (Japan 2011) folgte noch im selben Jahr der Atomausstieg in Deutschland. Weltweit stehen dem Ausbau bzw. der Erschließung der Kernenergie die immer wichtiger werdende Frage der Endlagerung gegenüber. Hier vollzog Deutschland einen weiteren Ausstieg: Die Untersuchung vom Endlagerstandort Gorleben wurde 2016 vorerst ausgesetzt um eine ergebnisoffene bundesweite Suche zu starten.

Für die Selektion geeigneter Standorte für die Endlagerung radioaktiver Abfallstoffe sowie deren Überwachung gibt es verschiedene Empfehlungen von Regulierungsbehörden oder Nichtregierungsorganisationen. Die Internationale Atomenergie-Organisation fordert die mikroseismische Überwachung ohne spezifische Anforderungen zu definieren wie z.B.: Entfernung, Magnitude oder Tiefe. Finnland installierte in Olkiluoto ein Messnetzwerk um lokale Magnituden $M_L = -2,0$ im einem Bereich von einem Quadratkilometer um das Endlager in Tiefen von 500 – 1000 m erfassen zu können. Langzeiterfahrungswerte für das komplexe Zusammenspiel, unter anderem von Mehrbarrierensystemen, hydrogeologischer Umgebung und Wärmeentwicklung auf der Zeitskala von Jahrhunderten gibt es derzeit keine. Mögliche Wirtsgesteine werden in (Fels-)Laboren auf ihre physikalischen, chemischen, hydrogeologischen oder biologischen Parameter und deren Wechselwirkungen erforscht.

Eine der potentiellen Gefahren für alle derzeit in Frage kommenden Wirtsgesteine für Endlager sind Erdbeben. Der Vermeidung von strukturellen Schäden, durch singuläre Ereignisse, wird durch den Verzicht von Standorten in Erdbebenzonen Sorge getragen. Weiterhin geht aber eine Langzeitgefahr von Kleinstbeben unterhalb der menschlichen Wahrnehmungsschwelle, sowie der Detektionsschwelle von Regionalnetzen, aufgrund von Rissbildungen oder Reaktivierung existierender Störungen aus. Einzelne Risse oder Rissnetzwerke begünstigen die Infiltration von Wasser oder die Leckage von Radionukliden in die Biosphäre. Daher ist eine umfassende Kenntnis der natürlichen Seismizität am Standort im Vorfeld unabdingbar.

1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Eine Möglichkeit Aktivität von unkartierten Störungzonen, die möglicherweise mangels sichtbarem Versatz in der 3D Seismik unerkannt bleiben, frühzeitig zu entdecken ist die Verbesserung der Detektionsempfindlichkeit. Dies kann sowohl über die Qualität der ver-

wendeten Instrumente, als auch deren Anzahl geschehen. Weiterhin spielt die verwendete Methode zur Detektion und Lokalisierung von schwachen Ereignissen bei niedrigem Signal-to-Noise-Ratio (Signal-Rausch-Verhältnis, SNR) eine Rolle. Durch die Extrapolation der Gutenberg-Richter-Relation hin zu kleinen Erdbeben kann eine ungefähr um Faktor 10 höhere Ereignisanzahl pro Magnitude erwartet werden. Diese Faktoren berücksichtigt die Methode Nanoseismic Monitoring. In dieser Arbeit soll für das Felslabor Mont Terri (Schweiz), an dem zur Problematik der Endlagerung von radioaktiven Abfallstoffen geforscht wird, ein Messnetzwerk errichtet werden um die lokale Seismizität zu erforschen. Dazu sollen, für die Anwendung von Nanoseismic Monitoring, überirdisch und unterirdisch je zwei Seismic Navigating System (Miniarray, SNS) aufgebaut werden. Die dafür eingesetzten Instrumente sollen möglichst nahe am natürlichen Hintergrundrauschen arbeiten und eine möglichst große Datenverfügbarkeit aufweisen. Mit den erhobenen Daten soll die prinzipielle Tauglichkeit von Nanoseismic Monitoring sowohl für die Standortsuche als auch das Monitoring eines Endlagers erforscht werden.

1.3 Gliederung der Arbeit

Wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit ist die Bewertung der Datenqualität, sowohl im Bezug auf den Standort und die eingesetzte Technik, als auch im Vergleich zum Messnetzwerk und der Methodik des Schweizer Erdbebendienstes. Zusätzlich werden verschieden Auswertemethoden auf die sehr schwachen Erdbeben und geringen Ereigniszahlen angewendet und bewertet.

Kapitel 2 führt in die Thematik ein mit einem Ausflug in die Geschichte der Kernenergie und dem Kreislauf der Brennelemente. Es wird auf Kernkraftwerke und Forschungsreaktoren in Deutschland eingegangen, sowie dem daraus resultierenden radioaktiv belasteten Material.

Für die Endlagerung gibt es verschiedenste Möglichkeiten von denen die des Endlagerbergwerks als die derzeit erfolgversprechendste in Kapitel 3 genauer beschrieben wird. Wichtig in diesem Kontext sind nicht nur mögliche Wirtsgesteine, sondern auch ihre Untersuchung und Bewertung. Internationale und nationale Vorgaben, Empfehlungen sowie Gesetze zur Standortsuche und Überwachung werden besprochen, sowie letztere dezidiert auf die seismische Überwachung beleuchtet. Abschließend wird die in dieser Arbeit eingesetzte Methode im Rahmen klassischer Möglichkeiten vorgestellt.

Kapitel 4 umfasst drei größere Themengebiete. Zuerst wird der Untersuchungsstandort Mont Terri (Schweiz) vorgestellt. Die geologische und tektonische Geschichte, sowie die messtechnisch erfasste jüngere Vergangenheit der Umgebung werden beschrieben. Anschließend wird der Messstandort, das aufgebaute Messnetzwerk, sowie die Auswertung der Daten beschrieben. Letztere wird im Kontext, der vom Schweizer Erdbebendienst angewendeten Methoden, untersucht und die Genauigkeit, sowohl der Lokalisierung, als auch der Magnitudenbestimmung ermittelt. Abschließend werden die gefundenen Ereignisse mit verschiedenen Methoden untersucht, gruppiert, sowie ein historisches Ereignis in unmittelbarer Nähe diskutiert. Die Ergebnisse werden im folgenden Kapitel 5 zusammengefasst und in Kapitel 6 im Bezug auf die Anwendbarkeit der Methode auf Endlagerstandorte bewertet.

Kapitel 2

Radioaktive Abfallstoffe

2.1	Geschichte der Kernenergie	28
2.2	Brennelemente Kreislauf	29
2.3	Mengenabschätzung radioaktiven Abfalls	31

Radioaktive Abfälle fallen bei verschiedensten Anwendungen und Prozessen an (Abbildung 2.1). Eine der bekanntesten Quellen ist die Kernspaltung in Atomkraftwerken zur Energieerzeugung. Auch beim Uranbergbau (Abraum), in der Medizintechnik oder der Forschung (z.B. Teilchenbeschleuniger) werden radioaktive Elemente genutzt (Bundesamt für Strahlenschutz, 2016). Eine Hauptquelle der Wärmeleistung der Erde stammt aus radioaktivem Zerfall, neben der „Urhitze“ aus der Bildung des Planeten. Auch in der Kruste finden sich radioaktive Elemente (hauptsächlich Uran 238 und Thorium 232) welche durch Förderung von Erdöl, Erdgas oder in geothermalen Anlagen die Oberfläche erreichen. Wird in der Geothermie das Fluid üblicherweise nach dem Wärmeentzug umgehend wieder verpresst, werden bei der Öl- und Gasförderung zusätzlich beträchtliche Mengen an belastetem Abwasser und Schlamm produziert. Der Großteil der bei diesen Prozessen eingesetzten Materialien zur Abschirmung und zum Transport des radioaktiv belasteten Mediums aber auch Schutzkleidung, Reinigungsmaterial etc. wird selbst nach Gebrauch zu radioaktivem Abfall.

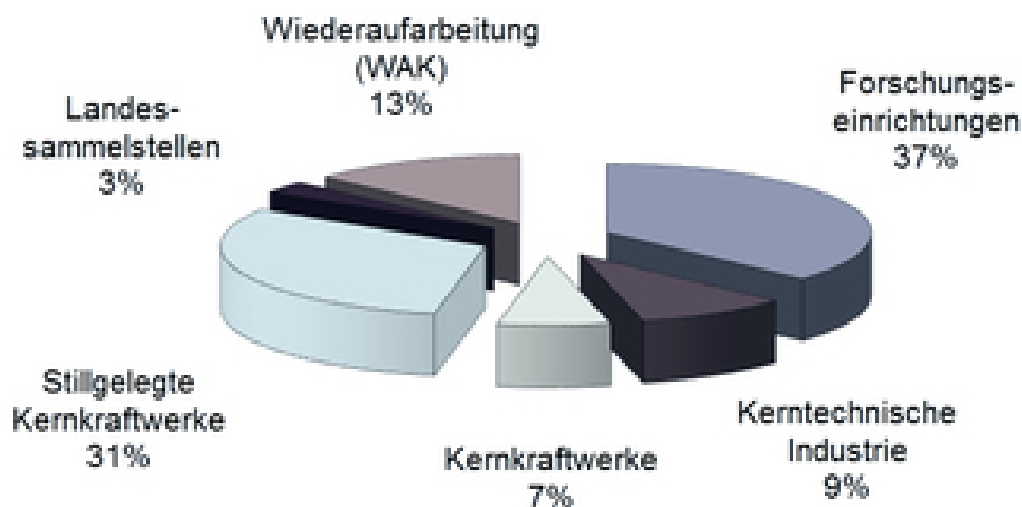


Abbildung 2.1: Prozentualer Volumenanteil der Verursacher konditionierter Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in Deutschland (Stand: 31.12.2014, Bundesamt für Strahlenschutz, 2016, zuletzt besucht am 28.09.2016).

Radioaktive Abfälle werden nach ihrer Art, Energie der Strahlung, Aktivität sowie Halbwertszeit unterschiedlich klassifiziert. Die International Atomic Energy Agency (1994)

unterteilt diese wie folgt:

- low active waste (schwachradioaktive Abfälle, law) ($< 10^{11} Bq \text{ pro } m^3$)
- medium active waste (mittlerradioaktive Abfälle, maw) ($10^{10} - 10^{15} Bq \text{ pro } m^3$)
- high active waste (hochradioaktive Abfälle, haw) ($> 10^{14} Bq \text{ pro } m^3$)

Die Unterschiede zur deutschen Klassifikation sind in Abbildung 2.2 dargestellt, darin werden vom Referat RS III 3 (Sonstige Angelegenheiten der nuklearen Entsorgung) (2009) nur „geringfügige Abweichungen“ festgestellt. Wegen der Diskrepanz zwischen relativer

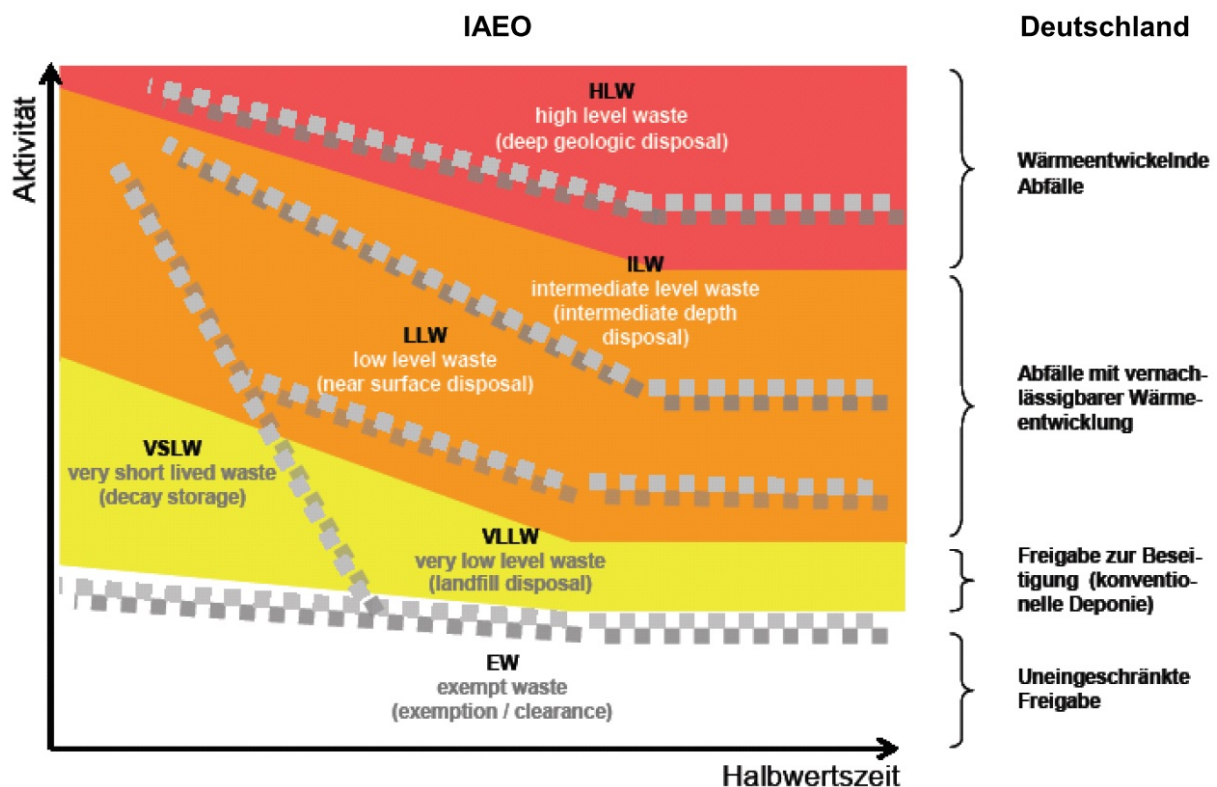


Abbildung 2.2: Unterschiede der Einteilung in Aktivitätskategorien zwischen der IAEA (grau gestrichelte Bereiche) und Deutschland (farbig hinterlegt) Referat RS III 3 (Sonstige Angelegenheiten der nuklearen Entsorgung) (2009).

Menge und Anteil der Radioaktivität werden üblicherweise law und maw getrennt von haw behandelt. Letztere stammen überwiegend aus Kernkraftwerken und machen über 99% der Radioaktivität aber nur 10% der Menge aus.

2.1 Geschichte der Kernenergie

Die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016, Seite 73ff) gliedert die Geschichte der Kernenergie in Deutschland in fünf Phasen. Die erste begann mit der Entdeckung des Neutrons 1932 durch James Chadwick und der ersten Atomkernspaltung durch Otto Hahn und Fritz Straßmann am 17. Dezember 1938 sowie der Beschreibung des Experiments im Januar 1939 durch Lise Meitner und Otto Frisch. Es entwickelte sich ein Wettlauf um den Bau der ersten Atombombe in den bald die USA, Japan und die Sowjetunion einstiegen. Auf den Trinity-Test der USA am 16.7.1945 folgten bald die Abwürfe über Hiroshima (6.8.1945) und Nagasaki (9.8.1945). Forderungen von Wissenschaftlern oder der UNO (1948) ein atomares Wettrüsten zu verhindern, scheiterten. Die

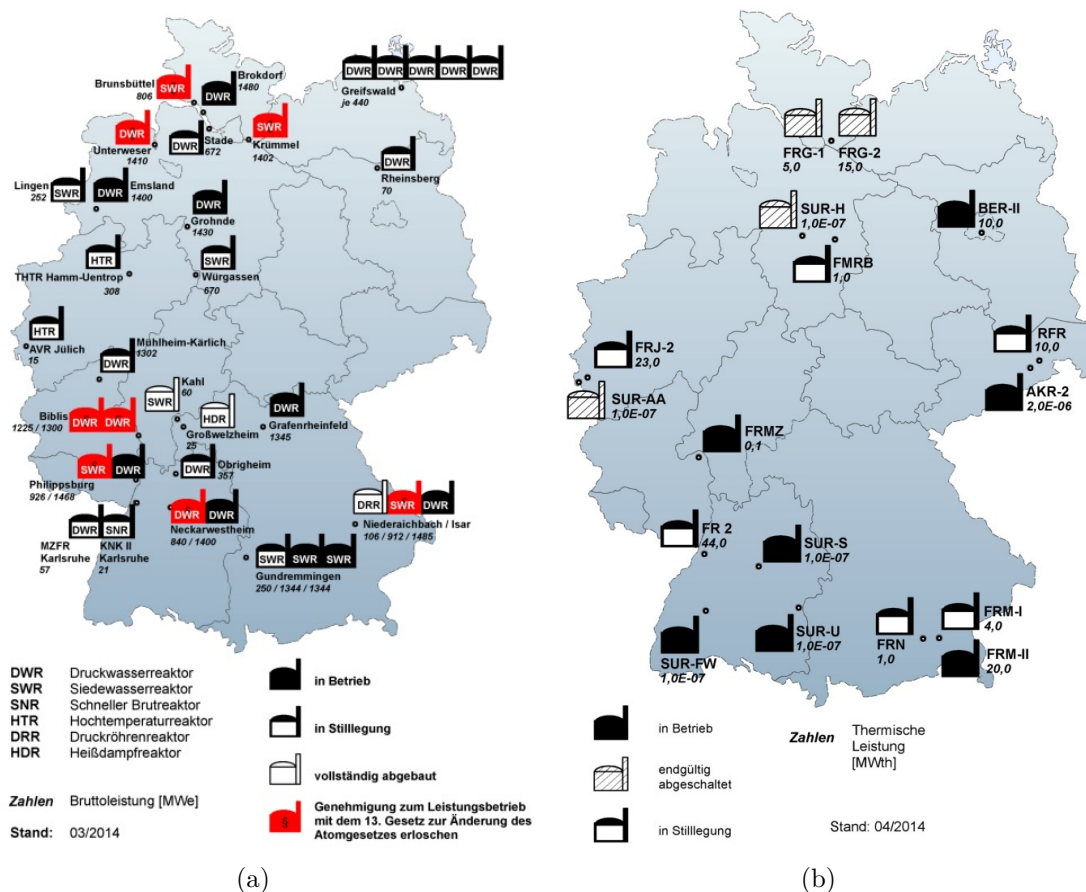


Abbildung 2.3: (a): Aktuelle und ehemalige Standorte von AKWs in Deutschland. (b): Forschungs- und Unterrichtsreaktoren (beide Referat RS III 3 (Sonstige Angelegenheiten der nuklearen Entsorgung), 2009, (b) abgewandelt).

zweite Phase, die zivile Nutzung der Atomenergie, begann mit dem Versuchsreaktor bei Arco (ID, USA) am 20.12.1951. In der Folge wurde am 29.7.1957 die IAEA zur Abkopp-

lung der zivilen von der militärischen Kerntechnik gegründet. Deutschland begann den Einstieg ins Atomzeitalter mit dem Inkrafttreten der Pariser Verträge zum 5.5.1955. Mit dem Traum einer unerschöpflichen und billigen Energie- und Wärmeversorgung begann die Grundlagenforschung 1957 an der TU München mit dem Atom-Ei, dem ersten deutschen Forschungsreaktor. Die Stromerzeugung in einem AKW, die dritte Phase, begann im Juni 1961 im RWE-Versuchsatomkraftwerk Kahl, begünstigt durch erhebliche staatliche Förderungen, gefolgt vom ersten kommerziellen AKW, einem Siedewasserreaktor, in Gundremmingen am 12.11.1966 (Abbildung 2.3). Die erste Ölkrise 1973 förderte den Bau neuer Anlagen, so dass zwischen 1957 und 2005 (Ausbildungsreaktor Dresden) insgesamt 110 kerntechnische Anlagen in Deutschland betrieben wurden. In der vierten Phase, ab den 80er Jahren, schaffte die Kernenergie es nicht, einen wertvollen Beitrag zur Menschheitsherausforderung des anthropogenen Klimawandels zu leisten. So konnte der Traum der CO₂ freien Stromproduktion nicht eingehalten werden, wenn man den Bau und Betrieb sowie den Rohstoffkreislauf berücksichtigt. Der wachsende Widerstand der Bevölkerung in der fünften Phase, in den 80er Jahren, verhinderte den Bau neuer AKWs. GAUs im amerikanischen Harrisburg (28.3.1979) und ukrainischen Tschernobyl (26.4.1986) taten ihr übriges. Ab 1983 wurden nur noch im Bau befindliche AKWs fertiggestellt. Auf den ersten Atomausstieg 1998 folgte zuerst die Laufzeitverlängerung am 28.10.2010 und mit der Katastrophe von Fukushima (11.3.2011) der endgültige Ausstieg (9.6.2011). Derzeit sind acht AKWs in Betrieb, diese werden schrittweise bis spätestens 31.12.2022 abgeschaltet (Tabelle 8 aus Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, 2016).

2.2 Brennelemente Kreislauf

Zur Reduktion der anfallenden Gesamtmenge an radioaktivem Abfall gibt es derzeit zwei verfolgte Strategien: Recycling (Wiederaufbereitung) und Umwandlung (Transmutation). Die Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen ergänzt den Rohstoffkreislauf in Abbildung 2.4. Diese trennt ausgebrannte Brennstäbe teilweise in spaltbares Material und Abfall. Ursprünglich sollte dieses Recycling kommerziell in Deutschland stattfinden. In Karlsruhe wurde jedoch lediglich eine Pilotanlage betrieben. Der Großteil der Wiederaufarbeitung fand zum einen aus Kostengründen, zum anderen wegen Bürgerprotesten im Ausland (La Hague, Frankreich oder Sellafield, Großbritannien) statt. Noch günstiger war die Produktion neuer Brennelemente (Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, 2016).

Röhlig et al. (2012) beschreiben das Standardverfahren für Wiederaufarbeitung **Plutonium and Uranium Recovery by EXtraction (PUREX)** als Trennung von wieder verwert-

2.2. BRENNELEMENTE KREISLAUF

barem Plutonium und Uran von anderen Spaltprodukten und Radionukliden in einem flüssig-flüssig-Extraktionsverfahren. Das Uran und Plutonium wird zu einem Mischoxidkernbrennstoff verarbeitet, welcher nur in speziellen AKWs verwendet werden kann. Die Abfälle werden neutralisiert und anschließend verglast und in Stahlkokillen in CASTOR-Container verpackt.

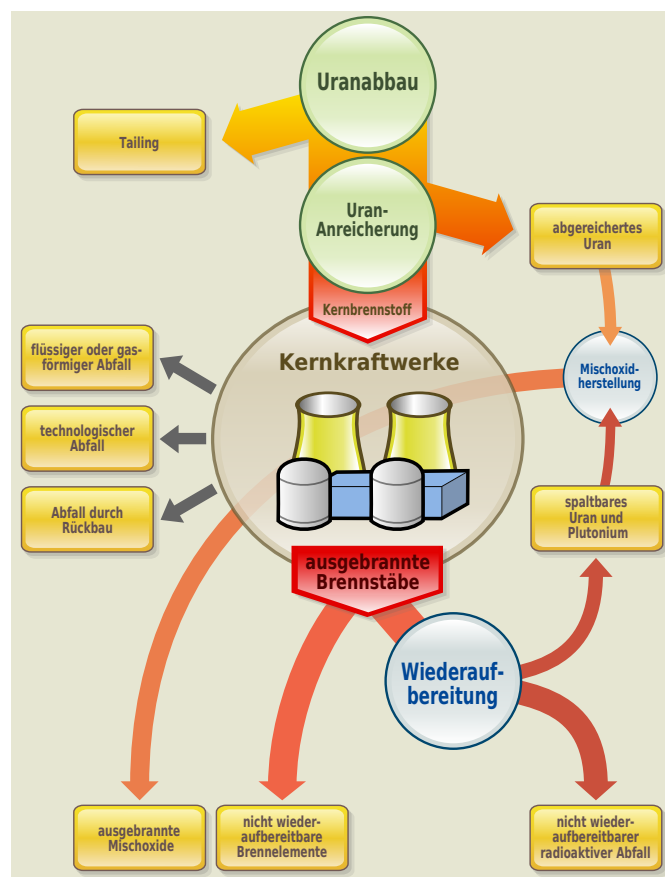


Abbildung 2.4: Rohstoffkreislauf in AKWs (Lardot, 2016, zuletzt besucht am 28.09.2016).

Abgebrannte Brennelemente aus Leistungsreaktoren können mittels Transmutation aufbereitet werden. Das Verfahren der Partitionierung und Transmutation (P&T) zielt darauf ab, langlebige Transurane (Neptunium, Plutonium, Americium oder Curium) in kurzlebige oder stabile Nuklide umzuwandeln (Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, 2016). Das dreistufige Verfahren aus Abtrennung (Partitionierung), Brennstoffertigung und Umwandlung (Transmutation) ist wesentlich aufwendiger als PUREX. Bei der Partitionierung müssen zusätzlich die minoren Aktiniden (Neptunium, Americium und Curium) abgetrennt werden, was wegen ihrer chemisch sehr ähnlichen Eigenschaften schwierig ist. Diese dann in Brennelemente zu integrieren und in entsprechenden Reaktoren einzusetzen ist aktuell Gegenstand der Forschung. Röhlig et al. (2012) geben für die

Abtrennung von Plutonium eine Verbesserung der Radiotoxizität innerhalb von einigen tausend Jahren auf das Niveau von Natururan an – im Gegensatz zu hunderttausend Jahren. Bis zur industriellen Reife des Verfahrens wird mit Jahrzehnten gerechnet und eine vollständige Lösung des Problems der Entsorgung kann nicht erreicht werden. Dennoch lässt sich mit P&T die Verringerung der Radiotoxizität um Faktor 100 nach 300 Jahren erreichen sowie einen reduzierten Platzbedarf im Endlager auf Grund verringerter Wärmeleistung (Röhlig et al. (2012), Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016)).

2.3 Mengenabschätzung radioaktiven Abfalls

Das Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit (2015) schätzt die anfallenden Mengen derzeit auf $300.000 m^3$ law und maw plus weitere 175.000 bis $220.000 m^3$ aus der Rückholung aus ASSE II. Für die anfallende Menge an haw lässt sich das Volumen auf Grund der teilweise bevorstehenden Aufbereitung nicht genau abschätzen. Es wird von 10.500 Tonnen Schwermetall in Form von bestrahlten Brennelementen ausgegangen, was ca. 1.100 Castor Behältern entspricht. Zusätzlich fallen etwa 300 Behälter aus der Wiederaufarbeitung sowie 10 bis 12 Tonnen Schwermetall aus Demonstrations-, Forschungs- und Versuchsreaktoren an. Die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016) rechnet bis zur Abschaltung des letzten AKW im Jahr 2022 mit $30.000 m^3$ haw.

Kapitel 3

Zwischen- und Endlagerung radioaktiver Abfallstoffe

3.1	Endlagerbergwerk mit Reversibilität	35
3.1.1	Wirtsgesteine	35
	Salz	37
	Ton	39
	Kristallin	39
	Zusammenfassung Wirtsgesteine	40
3.1.2	Internationale Vorgaben	40
	Internationale Vorgaben für Seismizität	43
3.1.3	Nationale Vorgaben und Gesetze	44
	Nationale Vorgaben und Gesetze für Seismizität	45
3.1.4	Hintergrundseismizität	46
3.2	Testsites, Zwischenlager und Endlager	48
3.2.1	Labore und Testsites	48
3.2.2	Zwischenlagerung	51
3.2.3	Endlager	52
3.3	Stand der Technik – Seismische Langzeitüberwachung . . .	52
3.3.1	Nanoseismic Monitoring	55

Für die Entsorgung der radioaktiven Abfallstoffe wurden über die letzten Jahrzehnte verschiedene Konzepte geplant, angewendet und verworfen. Die Lagerung von Atommüll im Meer ist seit 1974 für haw und umfassend durch die Londoner Konvention seit 1993 verboten (International Maritime Organization, 1996). Möglichkeiten zur Entsorgung im Weltall sowie im antarktischen oder grönländischen Inlandeis wurden diskutiert (Röhlig et al., 2012). Subduktionszonen oder tiefe Bohrlöcher werden zur Zeit aus (kosten-)technischen Gründen sowie der Voraussetzung der Rückholbarkeit nicht intensiv erforscht (Akend, 2002). Letztere soll späteren Generationen ermöglichen, auf Änderungen in der Langzeitsicherheit sowie bei technischem Fortschritt reagieren zu können. Auch die Option der dauerhaften Zwischenlagerung an der Erdoberfläche, mit der Hoffnung verbunden auf technischen Fortschritt, wurde erwogen. Letztere existieren für maw und law in Spanien (El Cabril), im französischen Centre de l'Aube (Region Champagne-Ardenne), in Großbritannien (bei Drigg, Grafschaft Cumbria) oder der Tschechischen Republik (Dukovany, Region Vysocina). Überwacht wird für 300 Jahre, nach deren Ablauf sie keine Gefahr mehr darstellen sollten (Röhlig et al., 2012). Von P&T wird langfristig lediglich eine Reduzierung der Abfallstoffmenge erwartet, nicht die vollständige Beseitigung der Abfallstoffe. Die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016) empfiehlt für Deutschland daher die Option „Endlagerbergwerk mit Reversibilität“:

- Die Endlagerung in einer tiefen geologischen Formation bietet nach Meinung der Kommission als einzige Option die Aussicht auf eine dauerhafte und sichere Entsorgung der radioaktiven Abfälle für den Nachweiszeitraum von einer Million Jahre.
- Die langzeitige Verlässlichkeit der Einschlussfunktion und die Integrität der sicherheitstragenden Eigenschaften geologischer Barrieren können durch empirische Erhebungen und Modellierungen wissenschaftlich nachgewiesen werden.
- Geologische Barrieren bieten, anders als oberirdische oder oberflächennahe Lager, ab einem bestimmten Zeitpunkt passive Sicherheit und bedürfen dann keiner Wartung.
- Auf sehr langfristig stabile gesellschaftliche Strukturen, die oberflächennah gelagerte radioaktive Abfälle auf Dauer sicher warten könnten, kann man nicht in gleicher Weise bauen.
- Die Option „Endlagerbergwerk mit Reversibilität“ ist in Deutschland in absehbarer Zeit machbar. Technische Voraussetzungen, wie Behälter, Auffahren und Betrieb des Endlagerbergwerks, Einlagerung und Verschluss, hält die Kommission für realisierbar.

- Mit dieser Option werden zukünftige Generationen von einem bestimmten Zeitpunkt an von Belastungen durch die radioaktiven Abfälle befreit, anders als beispielsweise bei einer oberflächennahen Dauerlagerung.
- Die Option „Endlagerbergwerk mit Reversibilität“ erlaubt hohe Flexibilität zur Nutzung neu hinzukommender Wissensbestände. Ein Umschwenken auf andere Entsorgungspfade bleibt über lange Zeit im Prozess möglich.
- Sie ermöglicht das Lernen aus den bisherigen Prozessschritten und die Korrektur von Fehlern, etwa durch Monitoring.
- Über die erforderlichen geologischen Voraussetzungen liegen weit reichende wissenschaftliche Kenntnisse vor, welche die Realisierung als aussichtsreich erscheinen lassen.
- Die Option „Endlagerbergwerk mit Reversibilität“ entspricht damit nach Meinung der Kommission am besten ihrem Leitbild und ist der aussichtsreichste Weg, mit den hochradioaktiven Abfällen in Deutschland verantwortlich umzugehen.

Ähnliche Konzepte werden auch in anderen Staaten verfolgt, teilweise ohne Reversibilität. Die geologischen und technischen Voraussetzungen sind jedoch ähnlich genug, um sie im Folgenden gemeinsam zu diskutieren.

3.1 Endlagerbergwerk mit Reversibilität

Die Einlagerung radioaktiver Abfallstoffe in tiefe geologische Formationen mittels eines Mehrbarrierenkonzepts ist die weltweit am meisten verfolgte Strategie zur Lösung der Endlagerproblematik. Zu den Barrieren zählen neben technischen, wie *haw*-Verglasung, Abfallbehälter oder Verfüllmaterial, auch natürliche Barrieren, wie das Wirtsgestein und seine Umgebung (Abbildung 3.1).

Diese sollen zusammen ein redundantes, wirksames Barrierensystem (Abbildung 3.2) ergeben, welches über Zeiträume von 1 *Ma* Jahre den Abfall sicher von der Biosphäre trennt (Akend, 2002). Bei der Wahl des Wirtsgestein existieren Unterschiede zwischen einzelnen Staaten. Diese beruhen teilweise auf der Verfügbarkeit natürlicher Vorkommen in den jeweiligen Staaten oder auf den bis dato gemachten Erfahrungen und Forschungen.

3.1.1 Wirtsgesteine

Diverse Wirtsgesteine wie Granit, Basalt, Tuff, Ton, Tonstein und Salz kommen weltweit in Betracht (Hudson, 1999). Die meisten wurden bereits auf ihre Tauglichkeit als

3.1. ENDLAGERBERGWERK MIT REVERSIBILITÄT

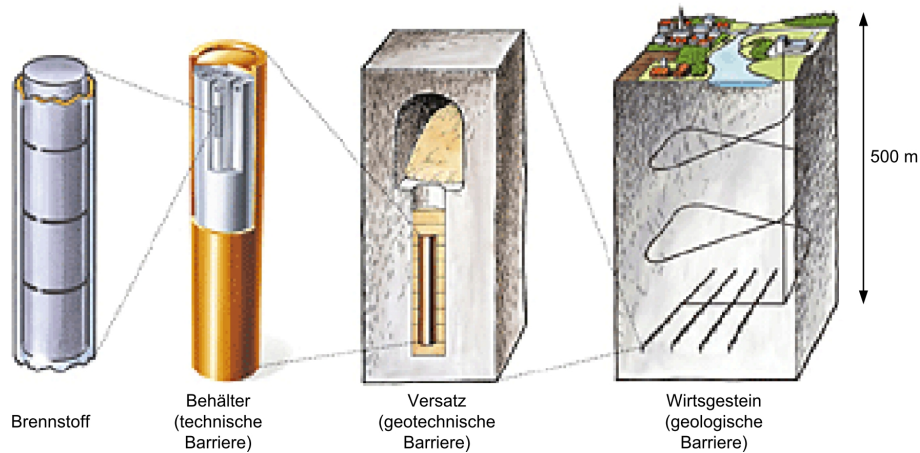


Abbildung 3.1: Schema einer Realisierung eines Endlagers mittels Mehrbarrierensystems am Beispiel SKB (Kristalin, Schweden) (Akend, 2002).

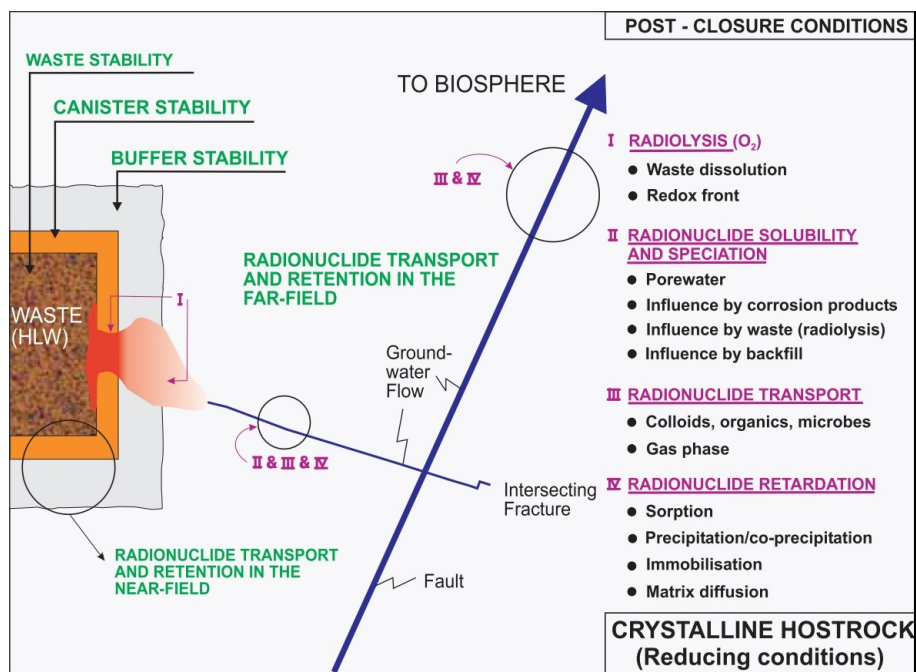


Abbildung 3.2: Schema eines Mehrbarrierensystems mit möglichen Leckagewegen (Grundfeld und Smellie, 2004).

Endlager untersucht. Eine Übersicht verschiedener Studien findet sich in Tabelle 3.1. Eine ausführliche Beschreibung der Entstehung der drei, derzeit am häufigsten in Frage kommenden Wirtsgesteine (Tonstein, Granit und Steinsalz), ist in Mengel et al. (2012) gegeben. Die dort diskutierten unterschiedlichen Eigenschaften sollen im Folgenden zusammengefasst werden. Insbesondere zeigen sie unterschiedliches mechanisches und chemisches Verhalten bei haw auf Grund seiner starken Wärmeentwicklung. Die Bedingungen bei der Bildung der jeweiligen Gesteine beeinflussen deren Eigenschaften als mögliches Wirtsgestein: “Langsame Sedimentation feinkörniger Minerale aus der Meerwassersäule im Bereich großer Flussmündungen mit anschließender Diagenese (Tonsteine); Kristallisation silikatischer Magmen in den oberen 20 km der kontinentalen Erdkruste bei 700 bis 850°C (Granit) und chemische Fällung von Chloriden und Sulfaten aus eindunstendem Meerwasser in isolierten ozeanischen Randbecken unter ariden Bedingungen der geologischen Vergangenheit (Steinsalz), (Mengel et al., 2012). Dadurch ergeben sich für Granit günstige Eigenschaften bezüglich der Resistenz gegen wässrige Lösungen bei Temperaturerhöhungen, in Salz werden Abfallbehälter auf Grund der höheren Plastizität schneller umschlossen, während die Rückhalteeigenschaften in Ton reduziert werden. Eine Übersicht relevanter Eigenschaften von potentiellen Wirtsgesteinen für Endlager ist in Tabelle 3.2 gegeben.

Salz

Steinsalz als Wirtsgestein für Endlager in Deutschland wurde früh als Favorit festgelegt und mit dem Erkundungsbergwerk Gorleben seit 1979 umfassend untersucht. Gründe dafür werden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2008) gelistet, unter anderem die über hundertjährige Erfahrung im Salzbergbau. Gebirgsmechanische Eigenschaften erlauben das standsichere Errichten von Untertagebauwerken ohne Stützbauten. Dennoch reagiert es durch Kriechen auf mechanische Belastung und verschließt damit Hohlräume. Damit verbunden ist die Durchlässigkeit von Gasen und Flüssigkeiten äußerst gering. Zuletzt ist seine hohe spezifische Wärmeleitfähigkeit wesentlich höher als bei anderen, in Frage kommenden Wirtsgesteinen, speziell für die Einlagerung von haw.

In jüngster Zeit mehrt sich Kritik an Gorleben bzw. Steinsalz als Wirtsgestein. Am 14.6.2000 einigten sich Bundesregierung und Energieversorgungsunternehmen auf ein Moratorium zum 1.10.2000, da die folgenden Probleme konzeptioneller und sicherheitstechnischer Art sind und nicht durch weitere Erkundung gelöst werden können (Bundesamt für Strahlenschutz, 2005). Es wird die Beherrschbarkeit der Gasbildung durch Korrosion und Zersetzung der Abfälle in Frage gestellt. Die Rückholbarkeit ist im Konzept nicht gewährleistet und die langfristige Kritikalität kann nicht ausgeschlossen werden.

3.1. ENDLAGERBERGWERK MIT REVERSIBILITÄT

Informationsquelle	Wirtsgestein	Verantwortliche Organisation
NEA FEP-Datenbank (Jesus et al., 1992)	Verschiedene	OECD/NEA
SR-97 (Pers et al., 1999)	Kristallingestein	SKB
SITE-94 (SKI, 1996)	Kristallingestein	SKI
Safety assessment of long-lived intermediate-level waste (SKB, 1999)	Kristallingestein	SKB
FSAR for SFR (schwach- und mittelaktiver Abfall) (SKB, 2001)	Kristallingestein	SKB
TILA-99 (Vieno und Nordman, 1999)	Kristallingestein	Posiva Oy
FSAR for VLJ (schwach- und mittelaktiver Abfall) (Vieno und Nordman, 1998)	Kristallingestein	Posiva Oy
Nirex-97 (Norris et al., 1997)	Tuffgestein	UK Nirex Ltd
Sicherheitsanalyse Schacht Konrad (BFS, 1990)	Sedimentgestein	BfS
Szenarienanalyse Morsleben (Käbel et al., 1999)	Salzstruktur	BfS
Szenarienanalyse Gorleben (Keller (2001a); Keller (2001b))	Salzstruktur	BfS
H12 (JNC, 1999)	Sedimentgestein und Deckgebirge	PNC
Kristallin-I (Nagra, 1994)	Kristallingestein	Nagra
Wellenberg (Nagra, 1994)	Mergel	Nagra
AECL/EIS & Alternative Case Study,, (Becker et al. (2002); Stephens et al. (1997))	Kristallingestein	AECL
WIPP (Departement of Energy, 1996)	Salz, flache Lagerung	US DOE
Yucca Mountain Project (Freeze et al., 2001)	wasserungesättigter verfestigter Tuff	US DOE
SSFIR-1 (NIRAS/ONDRAF, 2001)	Ton	ONDRAF/NIRAS

Tabelle 3.1: Übersicht zu Studien verschiedener Organisationen über mögliche Wirtsgesteine (Grundfeld und Smellie, 2004).

Eigenschaft	Steinsalz	Ton/Tonstein	Kristallingestein (z. B. Granit)
Temperaturleitfähigkeit	hoch	gering	mittel
Durchlässigkeit	praktisch undurchlässig	sehr gering bis gering	sehr gering (ungeklüftet) bis durchlässig (geklüftet)
Festigkeit	mittel	gering bis mittel	hoch
Verformungsverhalten	viskos (Kriechen)	plastisch bis spröde	spröde
Hohlraumstabilität	Eigenstabilität	Ausbau notwendig	hoch (ungeklüftet) bis gering (stark geklüftet)
In-situ Spannungen	lithostatisch isotrop	anisotrop	anisotrop
Lösungsverhalten	hoch	sehr gering	sehr gering
Sorptionsverhalten	sehr gering	sehr hoch	mittel bis hoch
Temperaturbelastbarkeit	hoch	gering	hoch

Tabelle 3.2: Eigenschaften von potentiellen Wirtsgesteinen nach BGR (2007), grün: günstige, gelb: mittlere, rot: ungünstige Eigenschaft für die sichere Verwahrung radioaktiver Abfallstoffe.

Ton

Opalinuston eignet sich als Wirtsgestein zum einen wegen seiner sehr geringen hydraulischen Leitfähigkeit die ihn quasi wasserundurchlässig macht (Mont Terri, 2016). So konnte Millionen Jahre altes Porenwasser nachgewiesen werden. Zum anderen ist das Rückhaltevermögen von Schadstoffen hoch. Diese werden auf Grund der hohen inneren Oberfläche gebunden sowie wegen seiner elektrischen Eigenschaften zurück gehalten. Risse und Klüfte werden bei Kontakt mit Wasser durch Quellen verschlossen (Selbsteheilungseffekt).

Kristallin

Die BGR (2007) nennt als Vorteile für die Endlagerung in Granit die Hohlraumstabilität und hohe Festigkeit. Dies erlaubt den Verzicht auf Stützbauten. Weiterhin werden die geringe Temperaturempfindlichkeit sowie das geringe Lösungsverhalten genannt sofern das Gestein ungeklüftet ist. Flach und ungeklüftet tritt Granit vor allem in Skandinavien auf. Insgesamt nehmen granitische Gesteine etwa 70% des Volumens der kontinentalen Erdkruste ein (Mengel et al., 2012), allerdings zum Großteil in Tiefen die für ein Endlager derzeit nicht in Frage kommen.

Zusammenfassung Wirtsgesteine

Das Bundesamt für Strahlenschutz (2005) untersuchte verschiedene Geosystem-Subtypen: Steinsalz (flache Lagerung), Steinsalz (Salzkissen), Steinsalz (Salzdiapir), kristalline Gesteine, Tonstein, Tonstein + Wirtsgestein (Wirtsgestein vollständig von Tonstein umschlossen), Tonstein + Wirtsgestein (Wirtsgestein nicht vollständig von Tonstein umschlossen). Es kommt zum Ergebnis, „dass die Möglichkeiten und Grenzen eines generischen Vergleichs von Wirtsgesteinen aufgezeigt und eine Beantwortung der 12 Fragestellungen erreicht wurde. Danach gibt es kein Wirtsgestein, das grundsätzlich immer eine größte Endlagersicherheit gewährleistet“. Ebenso wenig kann ein Geosystem als schlechteste Wahl vernachlässigt werden. Eine Bewertung von Vor- und Nachteilen im Bezug auf das Isolationspotential ergibt, dass in Deutschland „der Geosystemtyp kristalline Gesteine als Option für die Endlagerung wahrscheinlich aus[scheidet]“, auf Grund seiner ungünstigen mechanischen und hydraulischen Eigenschaften. Auch die (BGR, 2007) kommt zu ähnlichem Ergebnis: „Die Kristallinvorkommen Deutschlands sind ausgewiesen und geologisch kartiert. Aus den bisherigen Bergbauerfahrungen und geologischen Befunden geht hervor, dass in Deutschland homogene und ungeklüftete Bereiche im Kristallin in einer für die Errichtung eines Endlagerbergwerkes notwendigen räumlichen Ausdehnung nicht zu erwarten sind.“ Der Akend (2002) sieht Mindestanforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit verletzt. Durch die notwendigen Anpassungen des Sicherheitskonzepts würde der Fokus wesentlich verschoben von geologischen auf (geo)technische Barrieren. Auf Grund dieser Bewertungen kommt in Deutschland als Wirtsgestein für ein Endlagerbergwerk derzeit nur Ton und Salz in Frage (Abbildung 3.3).

3.1.2 Internationale Vorgaben

Durch den Bau eines unterirdischen Endlagers und den damit verbundenen Eingriff in anstehendes Gestein werden dessen physikalische, chemische, hydrogeologische oder biologische Eigenschaften verändert. Für die Überwachung dieser Änderungen gibt es verschiedene Vorschläge oder Anforderungen der internationalen Gemeinschaft. Die International Atomic Energy Agency (2001a) empfiehlt die Sammlung von Umweltdaten über mehrere Dekaden. Dazu gehören unter anderem: das Grundwasserflussfeld (Druckverteilung und hydraulischer Gradient), geochemische Charakterisierung des Grundwassers, Hintergrundpegel der natürlichen Radioaktiven Strahlung (im Grundwasser, Oberflächenwasser, Luft, Erde und Sedimente, Flora und Fauna), meteorologische und klimatische Bedingungen, die Hydrologie des Oberflächenwassers (Drainagemuster, Infiltrationsraten) sowie die Ökologie des Lebensraums und Ökosystems. Auch die verschiedenen Zeitskalen der

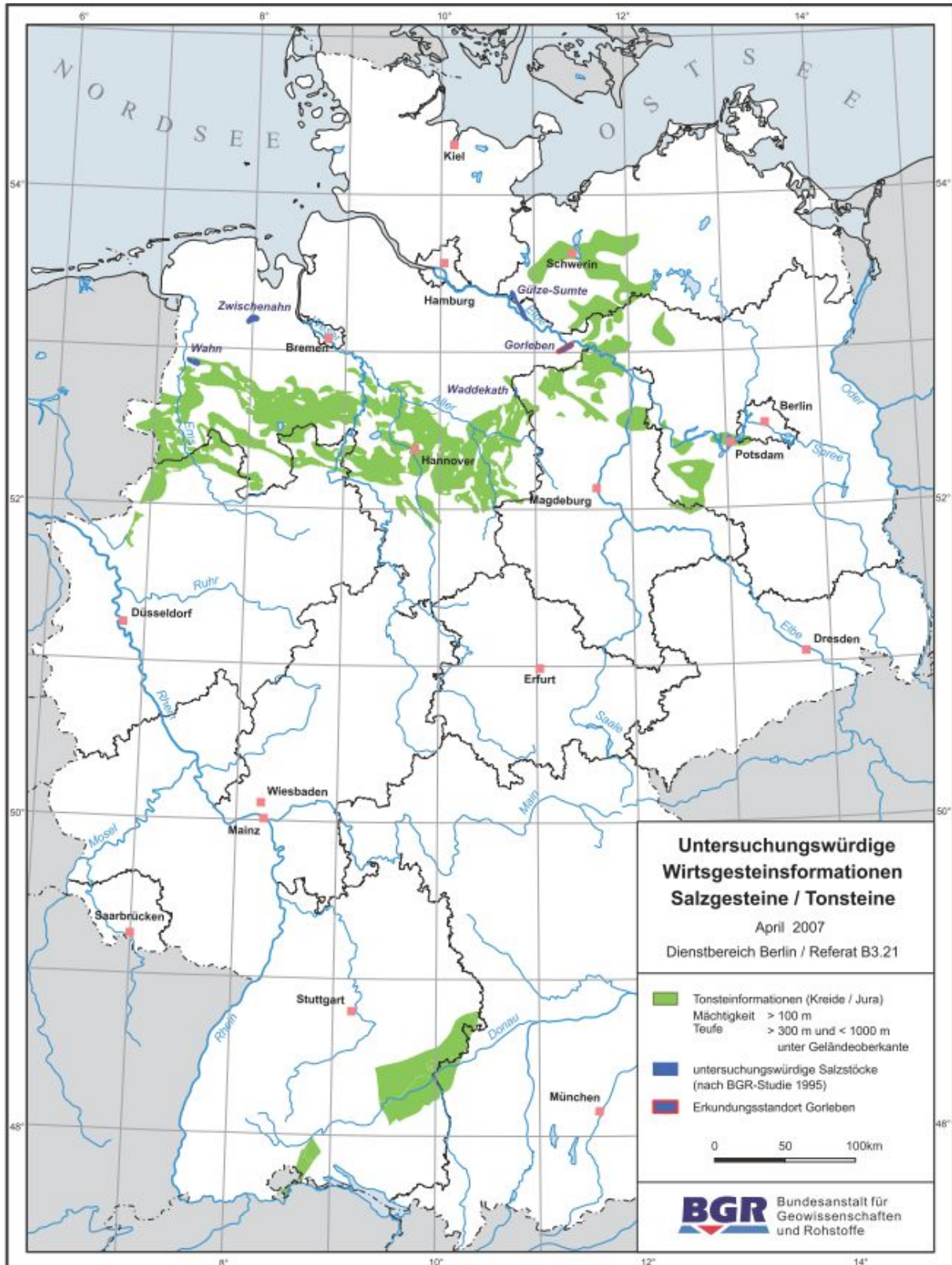


Abbildung 3.3: Untersuchungswürdige Steinsalz- und Tonsteinformationen in Deutschland (BGR, 2007).

3.1. ENDLAGERBERGWERK MIT REVERSIBILITÄT

Prozesse bei der Endlagerung müssen bedacht werden: die Exkavation, Einlagerung und Verfüllung (Jahre), die Wärmeentwicklung (Jahrzehnte) sowie die geologischen Veränderungen wie Eiszeiten oder Erosion (Jahrtausende) (Lavrov et al., 2002). Abbildung 3.4 gibt einen Überblick über die Dimension des Problems der Endlagerung in Bezug auf die Zeiträume die zu beachten sind. Die aufgeführten Tonsteinformationen sind z.B. in der Schweiz oder in Frankreich als Wirtsgestein vorgesehen, der skandinavische Schild in Finnland und Schweden (Geckeis et al., 2012). Salzstöcke mit ähnlichem Alter wie Gorleben kommen in Deutschland zusätzlich zu Tonsteinen in Frage.

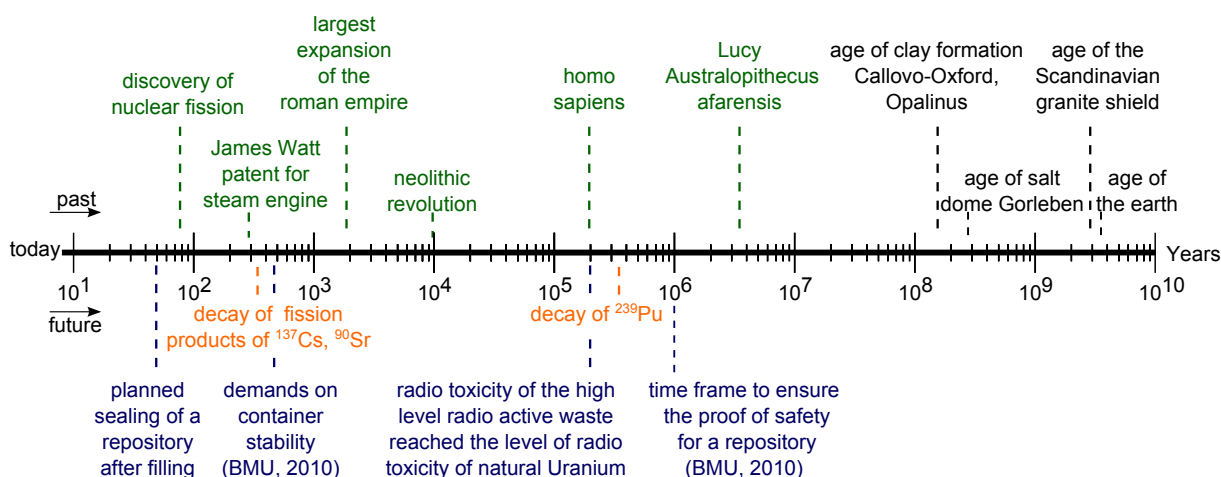


Abbildung 3.4: Zeitskala der Endlagerung im Vergleich mit Ereignissen der Menschheitsgeschichte. Verändert nach Geckeis et al. (2012).

Das „Gemeinsame Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle“ (Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management) wurde 1997 abgeschlossen. Es regelt weltweit den Umgang mit radioaktiven Abfallstoffen (BMUB, 2016, zuletzt besucht am 14.12.2016):

- Umsetzung der international anerkannten technischen Vorschriften (Artikel 4 bis 28) in nationales Recht und Berichterstattung über die Umsetzung (Artikel 29 bis 37)
- Nachbesserung von Anlagen, die den Anforderungen des Gemeinsamen Übereinkommens nicht entsprechen (Artikel 5 und 12).

Die Umsetzung erfolgt unter Führung der IAEA mit regelmäßigen Konferenzen (alle 3 Jahre seit 2003) sowie gegenseitiger Kontrolle der Mitgliedsstaaten. Referat RS III 3 (Sonstige Angelegenheiten der nuklearen Entsorgung) (2009) fasst den aktuellen deut-

schen Stand und Fortschritt zusammen und gibt in Anhang L-(e) eine Übersicht der wichtigsten völkerrechtlichen Verträge Deutschlands bezüglich der Endlagerung.

Internationale Vorgaben für Seismizität

Als Grundlage für die meistens Endlagerstandorte dient eine 3D Seismik. Diese stellt allerdings nur eine Momentaufnahme dar und kann die Aktivität und Dynamik des Stressfeldes nicht abbilden. Die Überwachung von Änderungen des Stressfelds kann mittels eines lokalen seismischen Überwachungsnetzwerks realisiert werden und gibt einen Aufschluss über die Rate und Lokalität der Störungen und der damit verbundenen Stabilität des Deckgebirges sowie den Anpassungseffekten der Felsumgebung. Weiterhin können gestörte Schwächezonen im Fels in den geschaffenen Hohlräume kartiert werden (Saari, 2003). Miller et al. (2002) listen die folgenden Prozesse als höchst signifikant in Bezug auf die Seismizität:

- Entwicklung der excavation damaged zone (Auflockerungszone, EDZ)
- Reaktivierung von existierenden Brüchen im Fels
- Erzeugung neuer Brüche im Fels
- Entwicklung des hydraulischen Netzwerks
- Entwicklung des hydraulischen Gradienten

Zur Tektonik listet die International Atomic Energy Agency (2001a) vertikale und laterale Bewegungsraten sowie seismische Ereignisse durch mikroseismische Überwachung, ohne letztere genauer zu definieren im Bezug auf Entfernung, Tiefe oder Magnitude.

Le Gonidec et al. (2014) kommt zu dem Ergebnis, dass eine genaue Detektion der Schäden durch den Tunnelvortrieb von besonderer Wichtigkeit ist, auf Grund ihrer negativen Einflüsse auf die Permeabilität im umgebenden Gestein (Souley et al. (2001), Bossart et al. (2002)) und damit auf die geologische Barriere. Da die hydraulische Leitfähigkeit solcher entstehender Bruchnetzwerke um Größenordnungen höher ist, als im undeformierten Opalinuston, können sich Radionuklide entlang der Tunnel und Schächte ausbreiten mit einer Reichweite von bis zu 2 m (Bossart et al., 2002).

Allen Wirtsgesteinen gemeinsam ist die Bewertung „wahrscheinlich“ für das Szenario Erdbeben (Bruns et al., 2004). Auch Miller et al. (2002) stufen sowohl die Reaktivierung von existierenden als auch die Erzeugung neuer Brüchen im Gestein als hoch signifikant ein, die Mikroseismizität als „mittel“. Die NAGRA (2002) empfiehlt einen Standort mit niedriger neotektonischer Aktivität, d.h. geringe Hebungs- und Erosionsraten, geringe seismische

Aktivität sowie keine vulkanische Aktivität. Zur Standorterkundung empfiehlt sie eine 3D Seismik und genügend Abstand zu Verwerfungen mit Verschiebungen von $> 10\text{ m}$ sowie Anzeichen von Aktivität im Tertiären.

3.1.3 Nationale Vorgaben und Gesetze

In Deutschland wurde nach den Erfahrungen von Gorleben und Asse Rückholbarkeit als Auflage festgelegt. Von der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016) wird der in Tabelle 3.3 gezeigte Ansatz verfolgt.

Phase	Aufgaben	Abschluss
1	Start mit der „weißen Landkarte“ Deutschlands. Ausschluss von Regionen nach Maßgabe der vereinbarten Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen. Vergleichende Analyse auf Basis vorhandener Daten nach Maßgabe der festgelegten Abwägungskriterien und den repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen	Beschluss des Deutschen Bundestages und Bundesrates über die obertägige Erkundung möglicher Standortregionen
2	Übertägige Erkundung der in Phase 1 identifizierten, möglicherweise geeigneten Standortregionen. Vergleichende Analyse und Abwägungen nach Maßgabe der vereinbarten Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien sowie weiterentwickelter vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen.	Beschluss des Deutschen Bundestages und Bundesrates über die untertägige Erkundung möglicher Standorte
3	Untertägige Erkundung der als Ergebnis der Phase 2 ausgewählten Standorte. Vertiefte Untersuchung im Hinblick auf die Anforderungen an eine sichere Endlagerung. Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen. Abwägende Vergleiche zwischen den möglichen Standorten mit dem Ziel, den Standort mit bestmöglicher Sicherheit zu identifizieren.	Festlegung des Endlagerstandortes durch den Deutschen Bundestag und Bundesrat

Tabelle 3.3: Ablauf der Endlagersuche (Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, 2016).

Im ersten Schritt soll mit einer „weißen Landkarte“ Deutschlands begonnen werden, ohne Vorfestlegungen. Danach werden schrittweise ungeeignete Regionen und Standorte ausgeschlossen, welche den Mindestanforderungen nicht genügen. Als nächster Schritt folgt eine übertägige Erkundung um Kandidaten (im Idealfall mehrere) für eine untertägige Erkundung auszuwählen. Die Grundlagen dafür erarbeitete der Akend (2002), basierend

auf International Atomic Energy Agency (1995) und International Atomic Energy Agency (1997) übernommen von der Europäischen Gemeinschaft (Referat RS III 3 (Sonstige Angelegenheiten der nuklearen Entsorgung), 2009, in der Fassung von 1997) und seit 2001 in Deutschland Gesetz.

- Das Endlager soll an einem Standort mit langfristiger Sicherheit errichtet und betrieben werden, der in dem kriteriengesteuerten Auswahlverfahren als relativ bester Standort ermittelt wird.
- Das Endlagerbergwerk soll höchste Sicherheitsanforderungen erfüllen, d.h. es wird nachsorgefrei ausgelegt. Die Rückholbarkeit von Abfällen aus dem Endlager wird bei der Standortsuche nicht berücksichtigt, da dadurch die, auf die langfristige Sicherheit zielenden, Merkmale von Gebirge und geotechnischen Barrieren nachteilig beeinträchtigt werden können.
- Eine möglichst hohe Beteiligungsbereitschaft der regionalen Bevölkerung wird von Beginn an angestrebt. Die Erkundung eines Standortes hängt von der Beteiligungsbereitschaft ab. Wenn nicht an mindestens zwei Standorten die Bevölkerung ihre Beteiligungsbereitschaft erklärt, legen Bundesregierung und Bundestag das weitere Vorgehen fest.
- Von Anfang an soll die Suche nach einem Endlager mit der Regionalentwicklung eng verbunden werden. Die Analyse der vorgeprägten regionalen Entwicklungsmöglichkeiten und die unter Einbeziehung der Öffentlichkeit zu erarbeitenden Entwicklungskonzepte für eine zukünftige "Endlagerregion" sind wichtige Bausteine bei Suche und Auswahl eines Endlagerstandortes.

Diese Grundlagen spiegeln sich in den Leitzielen der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016) wieder. So steht der Vorrang an Sicherheit der Transparenz und Bürgerbeteiligung gegenüber, um in einem fairen und gerechten Verfahren einen breiten gesellschaftlichen Konsens zu erreichen. Die höchste Bedeutung gilt der langfristigen Endlagersicherheit um künftige Generationen zu schützen. Weiterhin gilt der Grundsatz der nationalen Lagerung, ein „outsourcing“ wird derzeit nicht in Betracht gezogen. Grundsätzlich geeignete Standorte wurden von der BGR (2007) in Abbildung 3.3 zusammengefasst, es darf mit einem ähnlichen Ergebnis in Phase 1 gerechnet werden.

Nationale Vorgaben und Gesetze für Seismizität

Die in Kapitel 3.1.2 diskutierten Anforderungen werden im Folgenden durch Vorgaben deutscher Behörden ergänzt. Der Akend (2002) empfiehlt den geologischen Ausschluss von

Gebieten „die durch verstärkte Seismizität und Tektonik, erhöhte Hebungsraten, rezenten Vulkanismus und junge Grundwässer gekennzeichnet sind“. Die BGR (2007) spezifiziert die seismologischen Anforderungen. So dürfen am Endlagerstandort „die zu erwartenden seismischen Aktivitäten nicht größer sein als in Erdbebenzone 1 nach DIN 4149“ welche in Abbildung 3.5 abgebildet sind und in Abbildung 3.3 bereits berücksichtigt wurden. Die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016) listet weiterhin Ausschlusskriterien, wie aktive Störungszonen, Verwerfungen an denen sich zwischen dem Zeitraum Rupel (33,9 *Ma*) und heute erwiesenermaßen oder mit hoher Wahrscheinlichkeit Bewegungen ereignet haben. Entsprechend sind atektonische oder aseismische Vorgängen zu behandeln, wenn sie ähnliche Auswirkungen haben. Der Akend (2002) gibt vor, dass „im einschlusswirksamen Gebirgsbereich, inklusive eines Sicherheitsabstands, [...] keine geologisch aktiven Störungszonen vorhanden sein [dürfen], die das Endlagersystem und insbesondere den einschlusswirksamen Gebirgsbereich sowie die technischen und geotechnischen Barrieren beeinträchtigen können“. Ein Sicherheitsabstand beidseits der Verwerfung sollte einige Kilometer betragen (Akend, 2002). Das Bundesamt für Strahlenschutz (2005) hält geologische Veränderungen in zehntausend bis mehrere hunderttausend Jahre für nicht vorhersehbar. Der Akend (2002) definiert den Begriff „Monitoring“ als „eine laufende oder in regelmäßigen Abständen durchzuführende Beobachtung vorab festzulegender Parameter und die Bewertung dieser Ergebnisse vor dem Hintergrund der jeweiligen Anforderungen oder sich ändernder Rahmenbedingungen und Einschätzungen“. Eine Überwachung erlaubt somit Einblicke in den aktuellen (geologischen) Zustand der Etappen des (möglichen) Standorts. Es werden zwei Formen des Monitorings unterschieden, zum einen das Prozessmonitoring, die Evaluierung und Optimierung der Entwicklung hin zu einem Endlager und der getroffenen Entscheidungsprozesse, zum anderen die reale Überwachung der Veränderungen an einem Endlagerstandort sowie der eingelagerten Abfälle. Bei letzterer ergibt sich unweigerlich das Problem der Daten- und Energieversorgung. Kabel, welche die Messsensoren mit der Außenwelt verbinden, stellen eine potentielle Schwachstelle für Wasserzutritt dar (Akend, 2002). Vor allem dann, wenn das Monitoring nach dem Verschluss fortgesetzt werden soll.

3.1.4 Hintergrundseismizität

Durch die Vorgabe der Meidung von Erdbebenzonen größer Zone 1 werden größtenteils Gebiete ausgeschlossen die derzeit kleinskalig durch Erdbebendienste, Wissenschaft oder private Firmen überwacht werden. Informationen bezüglich der Seismizität können daher nur für größere Magnituden vorausgesetzt werden. Das Auflösen kleiner Magnituden ist essentiell um Zerrüttungszonen, üblicherweise nicht erkannt mit traditionellen Kartie-

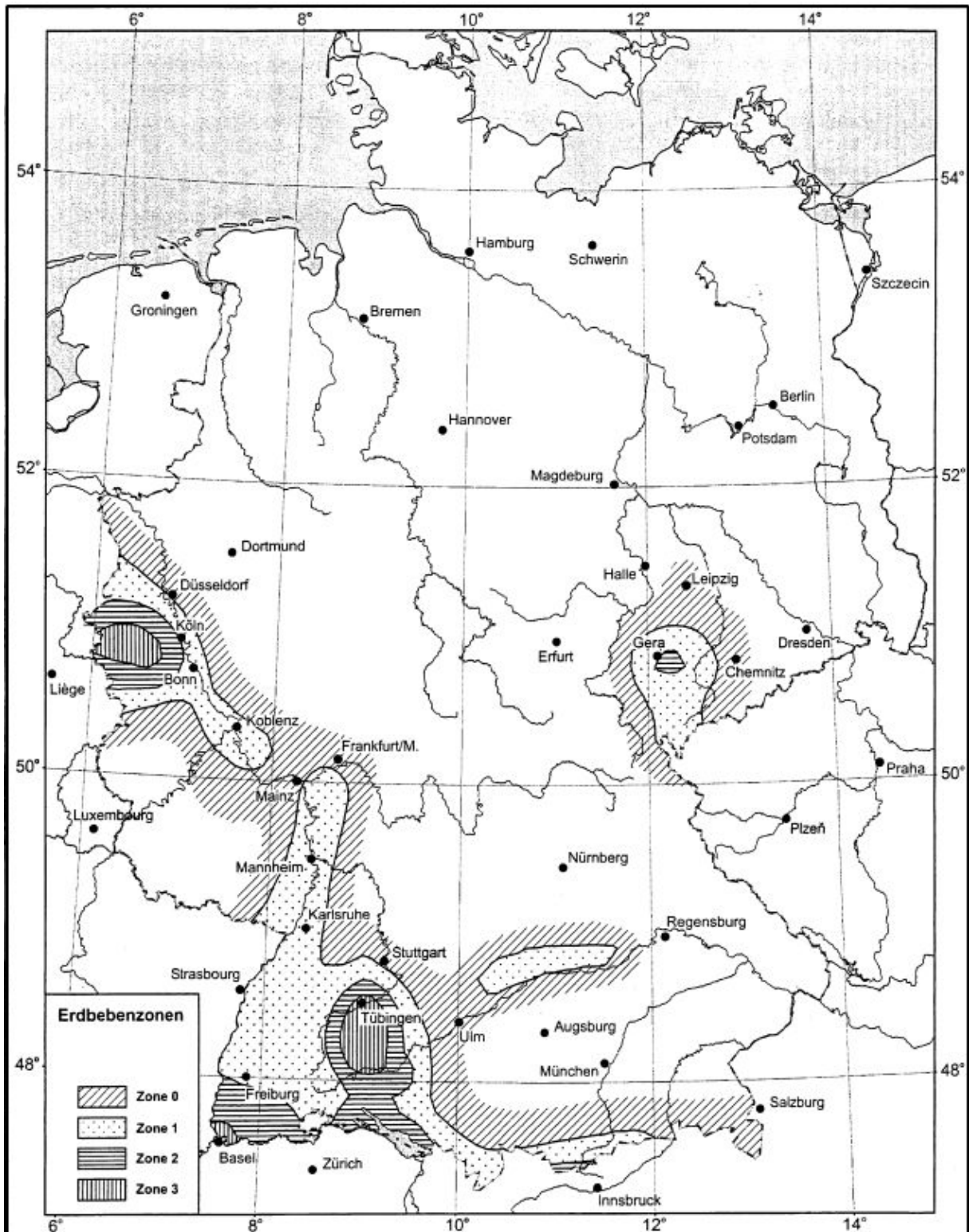


Abbildung 3.5: Erdbebenzonen in Deutschland (Deutsche Norm, 2005).

rungsmethoden (Akend, 2002), aufzuspüren. Mikroseismisches Monitoring kann die genannten Verfahren der Fernerkundung oder der Geoelektrik ergänzen, insbesondere für Zonen in größerer Tiefe. Der Akend (2002) vermerkt weiterhin: „Die Genese der Störungen oder Störungszonen in Raum und Zeit ist in vielen Gebieten im Detail nicht befriedigend aufgeklärt. Das geologische Faktenmaterial reicht in der Regel nur für eine sehr grobe Rekonstruktion der Bewegungsereignisse aus.“ Als sicherheitsrelevant sind somit „aktive Störungen“:

- an denen nachweislich oder mit großer Wahrscheinlichkeit im Zeitraum Rupel bis heute Bewegungen stattgefunden haben,
- die eindeutig mit seismischen Ereignissen im Zusammenhang stehen und
- an denen nachweislich Fluidtransport stattfindet.

Die primäre Referenz der Hintergrundseismizität bildet der Katalog von Leydecker (2011) sowie die daraus abgeleiteten Erdbebenzonen. Der Akend (2002) vermerkt abschließend: „Die seismische Aktivität eines Gebietes ist eng verknüpft mit dem Auftreten aktiver Störungen. Bei allen Angaben über die seismische Gefährdung eines Gebietes muss klar sein, dass eine Prognose, basierend allein auf den Erdbebenbeobachtungen ab dem Jahre 800, über einen Zeitraum von einer Million Jahren nicht möglich ist.“ Eine umfassende kleinskalige Erhebung der Hintergrundseismizität ergänzend zur Standortuntersuchung sowie ein entsprechendes dauerhaftes Monitoring des Endlagers sollte daher verwirklicht werden.

3.2 Testsites, Zwischenlager und Endlager

Im folgenden werden die derzeitigen Lagermöglichkeiten für radioaktive Abfallstoffe beschrieben. Während für law und maw weltweit bereits vereinzelt Endlager in Betrieb sind, ist für haw bisher nur in Finnland ein Endlager im Bau (Kapitel 3.2.3). Die Abfallstoffe werden daher bis zur Endlagerung gesammelt, zwischengelagert und gegebenenfalls aufbereitet. Abbildung 3.6 zeigt eine Übersicht über Zwischenlager und Sammelstellen sowie (Pilot-) Konditionierungsanlagen und Endlager-(projekte) in Deutschland.

3.2.1 Labore und Testsites

Weltweit werden überwiegend die in Kapitel 3.1.1 diskutierten, Wirtsgesteine untersucht und meist in einem Underground Research Laboratory (Unterirdisches Forschungslabor,



Abbildung 3.6: Karte der Untersuchungsstandorte, Zwischenlager, Endlager und (Pilot-) Konditionierungsanlagen in Deutschland (Referat RS III 3 (Sonstige Angelegenheiten der nuklearen Entsorgung), 2009).

3.2. TESTSITES, ZWISCHENLAGER UND ENDLAGER

URL) in-situ erforscht. Viele Länder betreiben Labore und Testsites um geeignete Wirtsgesteine zu untersuchen oder um die Tauglichkeit von Standorten nachzuweisen. Tabelle 3.4 gibt einen Überblick über diverse URLs, die teilweise in International Atomic Energy Agency (2001b, Anhang G) ausführlich beschrieben sind.

COUNTRY	LOCATION	USUAL NAME	FACILITY TYPE	HOST ROCK/ FORMATION	NATURE OF EXPERIMENTS	PERIOD
Belgium	Mol	HADES-URF PRACLAY	S (purpose-built)	Soft clay	TCHMR+D	Since 1980
Canada	Pinawa, Manitoba	Lac du Bonnet URL	G (purpose-built)	Granite	TCHM	Since 1984
Czech Republic	Přibram	Shaft 16	G (galleries in U mine)	Granite	Characterization work	Late 90's
Finland	Olkiluoto	Research Tunnel	G (in VLJ repository)	Granite	HM+D	Since 1993
France	Fanay Augères/Tenelles	Fanay	G (galleries in U mine)	Granite	TCHM	1980–1990
	Amélie	Amélie	G (galleries in K mine)	Bedded salt	TM+D	1986–1994
	Tournemire	Tournemire Research Tunnel	G (railway and test galleries)	Shale	CHM	Since 1990
	Bure	Bure URL	S (purpose built)	Shale	Under construction	Since 2000
Germany	Asse	Asse Forschungsbergwerk – Asse Salt Mine	G (test galleries in K/salt mine)	Domed salt	TCHMR + D	1977–1995 Now in sealing phase
	Gorleben	Gorleben	S (purpose built)	Domed salt	Characterization	Since 1997
	Konrad	Konrad	S (test galleries in Fe mine)	Shale	CHM	Since 1980
	Morsleben	ERAM	S (test galleries in K/salt mine and repository for L/ILW)	Domed salt	D	Since 1981
Hungary	Pécs	Pécs	G (galleries in U mine)	Shale	Characterization work	1995–1999
Japan	Tono	Tono	G (galleries in U mine)	Sandstone	CHM	Since 1986
	Kamaishi	Kamaishi	G (galleries in Fe–Cu mine)	Granite	Characterization work	1988–1998
	Mizunami	MIU	G (purpose built)	Granite	Under development	
	Honorobe	Honorobe	G (purpose built)	Sedimentary rocks	Under development	
Sweden	Stripa	Stripa	G (galleries in Fe mine)	Granite	TCHM	1976–1992
	Äspö	HRL	G (purpose built)	Granite	TCHM + D	Since 1990
Switzerland	Grimsel	GTS	G (dam tunnel)	Granite	TCHM	Since 1983
	Mont Terri	Mont Terri URL	G (highway and test galleries)	Shale	TCHM	Since 1995
UK	Sellafield	RCF	S	Tuff	Characterization	Project stopped in 1997
USA	Nevada Test Site	Climax	G (galleries in mine)	Granite	D	1978–1983
	Nevada Test Site	G-Tunnel	G (tunnel)	Tuff	THM	1979–1990
	Lyons, Kansas	Project Salt Vault	G (galleries in mine)	Bedded salt	TM	1965–1968
	Carlsbad, New Mexico	WIPP	S (TRU repository)	Bedded salt	TCHMR+D	Since 1982
	Yucca Mountain, Nevada	ESF	S (purpose built)	Tuff	TCHM+D	Since 1993
	Yucca Mountain, Nevada	Busted Butte	G (purpose built)	Tuffs	CHM	Since 1997

Tabelle 3.4: Übersicht der Testsites weltweit (S = site specific URL, G = generic URL; T = Thermal, C = Chemical, H = Hydrogeological, M = Mechanical, R = Radiation, D = Demonstration tests) (International Atomic Energy Agency, 2001b).

Die Endlagerung in der Bundesrepublik Deutschland begann 1965. Das ehemalige Salzbergwerk Schachtanlage Asse II wurde umgewidmet und zwischen 1967 und 1978 etwa $47.000 m^3$ law und maw eingelagert (Referat RS III 3 (Sonstige Angelegenheiten der nuklearen Entsorgung), 2009). In den 1960er bis 1990er Jahren wurden Programme zur Ent-

wicklung und Erprobung von Endlagertechniken sowie sicherheitsrelevante Fragen In-situ erforscht (Röhlig et al., 2012). Die Kombination aus eindringendem Grundwasser sowie verschlechternde Standsicherheit führten zur Stilllegung. 2013 wurde die Rückholung aller Abfälle beschlossen. Geplant ist eine unterirdische Umverpackung sowie oberirdische Konsolidierung und Zwischenlagerung.

Das ehemalige Eisenerzbergwerk Konrad soll ab 2022 als Endlager für radioaktive Abfallstoffe mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung dienen (Referat RS III 3 (Sonstige Angelegenheiten der nuklearen Entsorgung), 2009). Der einschlusswirksame Bereich beruht dabei nicht auf dem Korallenoolith sondern auf einer mehrere hundert Meter mächtigen Tonschicht (Röhlig et al., 2012) über der Einlagerungsebene.

Die Eignung des Salzstocks Gorleben als Endlager für haw wird seit 1979 untersucht. Ende 2012 wurden die Untersuchungen, nach zuvor 10-jähriger Unterbrechung, endgültig eingestellt (Akend, 2002). Im Bergwerk werden vorläufig nur Erhaltungsmaßnahmen durchgeführt (Referat RS III 3 (Sonstige Angelegenheiten der nuklearen Entsorgung), 2009). Unklar ist nach wie vor, wie und warum Gorleben ausgewählt wurde als auch ob der Standort überhaupt geeignet ist (Röhlig et al., 2012).

Im Salzbergwerk Bartensleben in Morsleben wurde seit 1981 seitens der DDR law und maw eingelagert (Referat RS III 3 (Sonstige Angelegenheiten der nuklearen Entsorgung), 2009). Bis 1998 wurden $36.800 m^3$ radioaktive Abfälle sowie etwa 6.600 ausgediente umschlossene Strahlenquellen (Gesamtaktivität $1014 Bq$) endgelagert. Seither wird die Verfüllung und Verschließung verfolgt (Röhlig et al., 2012).

3.2.2 Zwischenlagerung

(Referat RS III 3 (Sonstige Angelegenheiten der nuklearen Entsorgung), 2009) listet und beschreibt als derzeit genutzte Zwischenlager:

- die Standortzwischenlager an den Kernkraftwerksstandorten,
- die Zwischenlager in Ahaus und Gorleben,
- die Zwischenlager in Rubenow und Jülich sowie
- die Pilot-Konditionierungsanlage in Gorleben.

Die Standortzwischenlager sind als passive, windgekühlte Lager für Transport- und Lagerbehälter für abgebrannte Brennelemente angelegt. Die dichten, unfallsicheren Behälter sind unter anderem gegen Erdbeben, Explosionsdruckwelle oder Flugzeugabsturz durch die dicke Wandung geschützt. Ausgelegt wurden sie für mindestens 40 Jahre. Ahaus

ist zusätzlich geeignet für die Lagerung von cask for storage and transport of radioactive material (Behälter zur Aufbewahrung und zum Transport radioaktiven Materials, CASTOR) Behältern aus Versuchs-, Demonstrations- und Forschungsreaktoren. Die Lagerung von hochdruckkompaktierten radioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitungsanlage in La Hague ist beantragt. Gorleben hingegen ist zusätzlich für die Lagerung von haw-Glaskokillen und entsprechender CASTOR Behälter genehmigt. In Rubenow und Jülich werden überwiegend Brennelemente sowjetischer Bauart sowie Abfallstoffe aus der Kompakten Natriumgekühlten Kernreaktoranlage Karlsruhe oder dem Nuklearschiff Otto Hahn aufbewahrt. Zusätzlich werden haw Glaskokillen aus der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe gelagert. In Jülich kommen abgebrannte Brennelementkugeln aus dem Atomversuchsreaktor Jülich (AVR) hinzu. Eine Verlegung nach USA wird erwogen. In der Pilot-Konditionierungsanlage Gorleben sollten Brennelemente aus den Transport- und Zwischenlagerbehältern in endlagergeeignete Behälter umgepackt werden. Das Referenzkonzept des Behälters heißt Pollux. Die Konditionierungsanlage hat derzeit nur die Genehmigung zur Reparatur schadhafter Behälter.

3.2.3 Endlager

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2008) beschreibt verschiedene Beispiele (teilweise inzwischen überholt) für die Festlegung von Endlagerstandorten weltweit, z.B. Finnland (aktuell im Bau), Schweden, Frankreich, Schweiz, USA und Japan. Olkiluoto, Finnland ist das erste, sich im Bau befindliche Endlager weltweit. Es entsteht in einer Umgebung die sich durch den isostatischen Ausgleich hebt. Derzeit ist es auf einer Insel, durchschnittlich 5 m über dem Meeresspiegel. Durch das benachbarte Lager für law und maw VLJ können im Voraus Informationen über die Orientierung von Verwerfungen gewonnen werden.

3.3 Stand der Technik – Seismische Langzeitüberwachung

Gemäß der Vorgaben aus Kapitel 3.1.3 sind Erdbebenzonen >1 ausgeschlossen als Standorte für Endlager. Diese Zonen werden von Erdbebendiensten mittels von Regionalnetzen erhobene Daten festgelegt. Deren Stationsabstände (ca. 10 – 100 km) eignen sich nicht um ein Endlager in der Größenordnungen von etwa einem Kubikkilometer zu überwachen (wie z.B. Olkiluoto in Finnland Saari, 2003). Tabelle 3.5 vergleicht die Kennwerte Mikroseismischer Netzwerke (ähnliche Methodik wie Regionalnetze), der in dieser Arbeit eingesetzten

Methode Nanoseismic Monitoring siehe Kapitel 3.3.1 (*NSM*) und dem hauptsächlich in der Explorationswirtschaft eingesetzten Verfahren: passive seismics. Die Besonderheiten der einzelnen Methoden sind zusätzlich in Abbildung 3.7 dargestellt.

Mikroseismische Netzwerke, bestehend aus einzelnen Drei-Komponenten (3C) Seismo-

	microseismic networks	nanoseismic monitoring	passive seismic
typical application area, completeness magnitude	perm. local network 10000 km ² M _L 1.0	temp. fault mapping 100 km ² M _L - 1.0	instrumented oil field 1 km ² M _L -3.0
#stations (typical)	30 single 3c	3 SNS arrays	100+ array traces
select analysis segment	STA/LTA & voting	Sonograms & PR	(continuous)
noise forensics	optional	essential	none
SNR	> +15 dB (5:1)	> 0 dB (1:1)	> -15 dB (1:5)
status of onset phases	clear	questionable	not visible
process solution	pick all → batch	pick → live update	automated stack
test/improve solution	new run	slide any parameter*	(not applicable)
solution info	hypo, t ₀ , M _L , \vec{M}	hypo, t ₀ , M _L ,	statistics
improve by master event	possible	possible	(not applicable)
identify effects of single parameter* to joint solution	indirect by time residuals to LMS solution	fully resolved in location domain by jack-knifing	(not available)
* phase picks, forced depth, layer model			

Tabelle 3.5: Methodenvergleich seismischer Überwachungsnetze nach Joswig (2008).

metern, werden heutzutage überwiegend bei der lokalen Überwachung (<10 km × 10 km) eingesetzt z.B. bei geothermischen Anlagen. Dies wurde von der Arbeitsgruppe Induzierte Seismizität (AGIS) empfohlen (Baisch, Stefan Fritschen, R. Groos, J. Kraft, Toni Plenefisch, T. Plenkers, K. Ritter, J. Wassermann, 2012) und von Aufsichtsbehörden bislang überwiegend gefordert. Seismisches Rauschen besteht primär aus Oberflächenwellen deren Amplituden mit der Tiefe schnell abfallen. Dies kann genutzt werden, indem die Seismometer in Bohrlöchern versenkt werden. Ein solches Netzwerk wurde z.B. für die Überwachung des Salzstocks Gorleben realisiert (Stammler et al., 2013). Solche besseren Rauschbedingungen werden nur erreicht durch finanzielle (mit der Tiefe schnell ansteigen-

de) Mehrkosten sowie einem steigenden Aufwand für Wartung und Reparatur. Die Tiefe ist limitiert, da durch die Bohrungen die Integrität des Deckgebirges eines Endlagers nicht beeinträchtigt werden darf. Es würden sonst mögliche künstliche Wegsamkeiten geschaffen, die radioaktiv belastete Fluide den Weg in die Biosphäre verkürzen können.

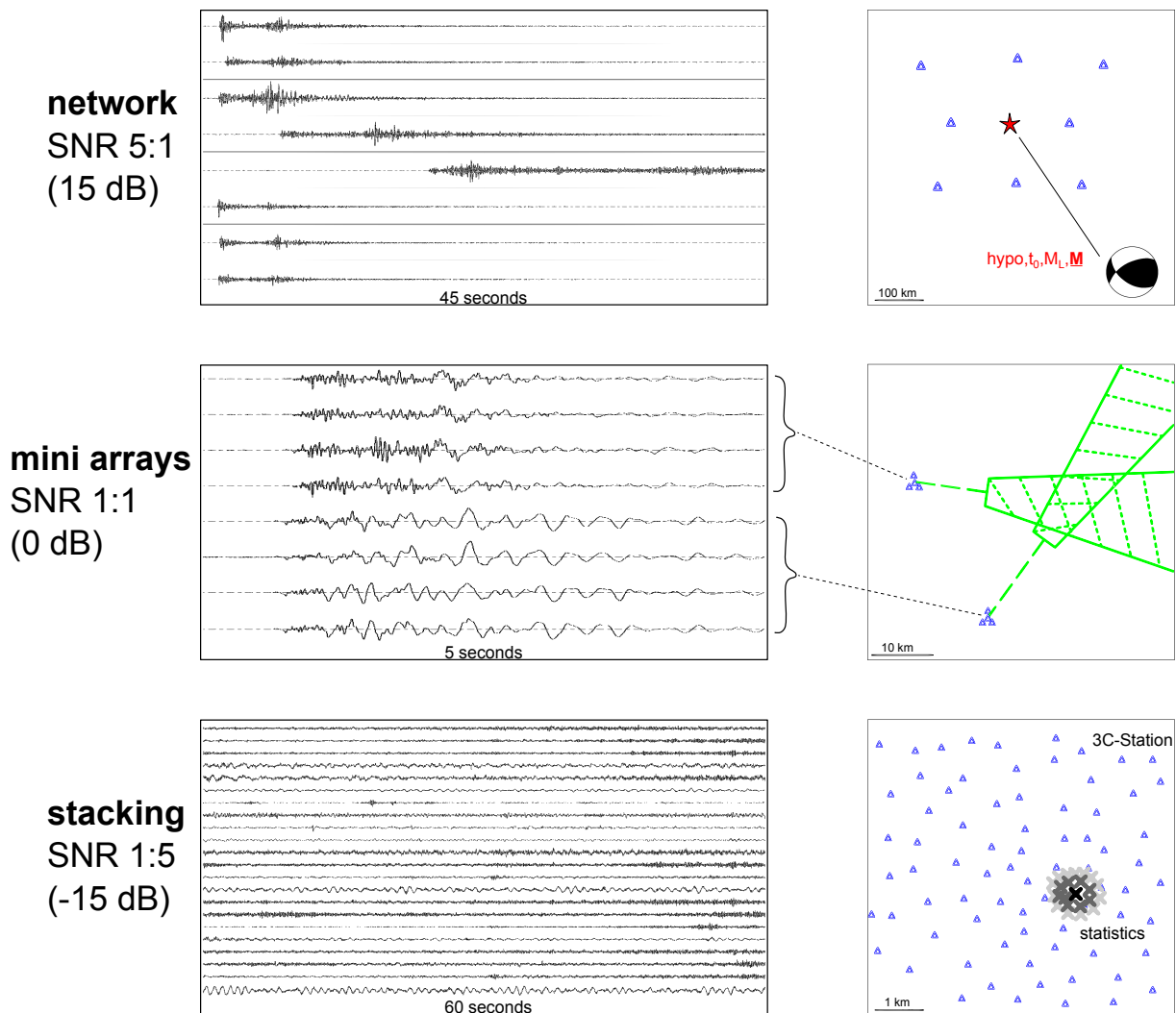


Abbildung 3.7: Visualisierung des Methodenvergleichs nach Tabelle 3.5, das angegebene SNR bezieht sich auf ungefilterte Daten.

Passive Seismics kommt u.a. bei der Überwachung hydraulischer Stimulationen zum Einsatz. Hunderte bis tausende Seismometer werden großflächig ausgelegt und mittels statistischer Methoden ausgewertet. Durch Stacking werden Ereignisse noch unterhalb des natürlichen Hintergrundrauschen auswertbar. Allerdings schlägt sich dies im Flächenbedarf dieser Auslage und damit verknüpften Aufwand und Kosten nieder. Zusätzlich sind der Wartungsaufwand für derart viele Stationen sowie die Anschaffungskosten zu berücksichtigen.

Innerhalb eines fertiggestellten Bergwerks gibt es die Möglichkeit mit Acoustic Emission Messnetzwerk zu installieren. Dies wurde z.B. in Morsleben realisiert. Dieses eignet sich auf Grund seines hochfrequenten Empfindlichkeitsbereichs zum direkten Nachweis von Mikrorissbildungen (Becker et al., 2010) mit etwa 20 Millionen Ereignissen pro Jahr. Allerdings ist wegen der geringen Reichweite keine Anwendung außerhalb des Endlagers möglich und innerhalb, nach Verschluss, keine Wartung. Daten- und Stromleitungen und deren Durchführung müssen sehr sorgfältig gegen Fluidaustausch abgesichert werden. Weitere Möglichkeiten zum Monitoring von Seismizität bieten der Einsatz Arraytechnologie wie beispielsweise in der Taunusumgebung (Rümpker et al., 2013) zur Überwachung von mehreren Geothermieprojekten oder in Norddeutschland (Sick et al., 2012) im Bereich Erdöl und -gas Förderung. Zur Verringerung des Rechenaufwands kann, wenn der Array-Ereignis-Abstand dem der zehnfachen der Apertur entspricht, die Ebene-Welle-Näherung verwendet werden. Arrays ermöglichen die Überwachung stärkerer Ereignisse aus unterschiedlichsten Richtungen, wie verschiedene Geothermieranlagen oder Erdölfelder, jedoch, verglichen mit lokalen Überwachungsmethoden, erst ab höheren Magnituden.

3.3.1 Nanoseismic Monitoring

In dieser Arbeit wird für die Überwachung der lokalen Seismizität das Verfahren *NSM* angewendet. *NSM* ist ein passives seismisches Messverfahren bei dem durch den Einsatz von SNS Netzwerk- und Arrayauswertung kombiniert wird. Ein SNS besteht aus vier Seismometern (Abbildung 3.8, links oben). Mehrere SNS in Kombination, mit speziell dafür entwickelter Software, ermöglichen die Auswertung von Ereignissen bis zu einem SNR von eins. Die Ereignisdetektion basiert auf Mustern in den Sonogrammen, dies sind mathematisch rauschadaptierte Spektrogramme, die signifikante Energie oberhalb des durchschnittlichen Rauschens pro Frequenzband, darstellen. Abbildung 3.9 zeigt die Berechnungsschritte, Details können in Joswig (1999) und Sick et al. (2012) gefunden werden. Die Sonogramme der einzelnen Vertikalspuren werden, wie in Abbildung 3.8 gezeigt, zu einem Supersonogramm kombiniert. Diese erlauben eine schnelle Übersicht über mehrere Stationen und größere Zeitbereiche in *SonoView* (Abbildung 3.10). Die Bewertung eines Ereigniskandidaten sowie bei Eignung die Lokalisierung desjenigen werden in *HypoLine* durchgeführt (Joswig, 2008). Dabei werden Methoden klassischer Einzelstationsnetzwerke (t_s-t_p Kreise, t_p-t_p Hyperbeln (Kurz et al., 2008)) mit Arraymethoden kombiniert (Backazimuth, Scheingeschwindigkeit).

NSM wurde im politischen Rahmen des Nuklearwaffentestsperrvertrags (CTBT) entwi-

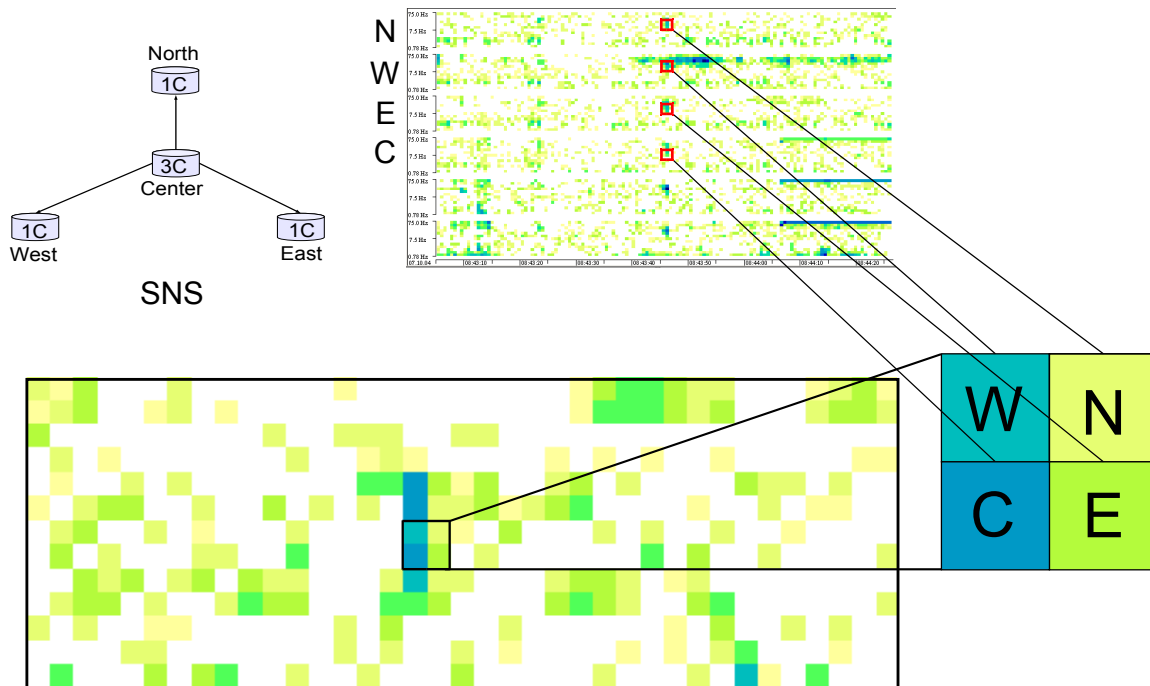


Abbildung 3.8: Zusammensetzung von Supersonogrammen (Sick et al., 2012).

ckelt, um die Vorgabe zu erfüllen ein Erdbeben mit lokaler Magnitude $M_L = -2,0$ in 3 km Entfernung lokalisieren zu können. Dies entspricht der Stärke von Nachbeben eines unterirdischen Atomwaffentests nach einer Woche (Joswig (2008) und Sick et al. (2012)). Diese Zeit benötigen UN-Inspektoren bis sie vor Ort sind.

Erstmals angewendet wurde *NSM* in Israel um Sinkholes aufzuspüren (Wust-Bloch und Joswig, 2006). Seither wurde es am Institut für Geophysik der Universität Stuttgart als Methode der Wahl für seismische Messungen verbessert und weiterentwickelt (Joswig, 2008). Getestet wurde *NSM* beim Kartieren aktiver Verwerfungen (Häge und Joswig, 2009a), bei Notfallnachbebenmessungen (Häge und Joswig, 2009c) und verifiziert durch eine kooperative Messung an einem etablierten lokalen Präzisionsmessnetzwerk im Vogtland (Häge und Joswig, 2009b). Die Anwendungen wurden erweitert mit Messungen an Lockergestein's Hangrutschungen (Walter und Joswig (2008), Walter und Joswig (2009) und Walter et al. (2011)). Die Genauigkeit der Relativlokalisierung konnte bei der hydraulischen Stimulation in Basel gezeigt werden (Häge et al., 2013). Verbesserungen der Detektionsempfindlichkeit lokaler Netzwerke durch den Einsatz von Sonogrammen kann-

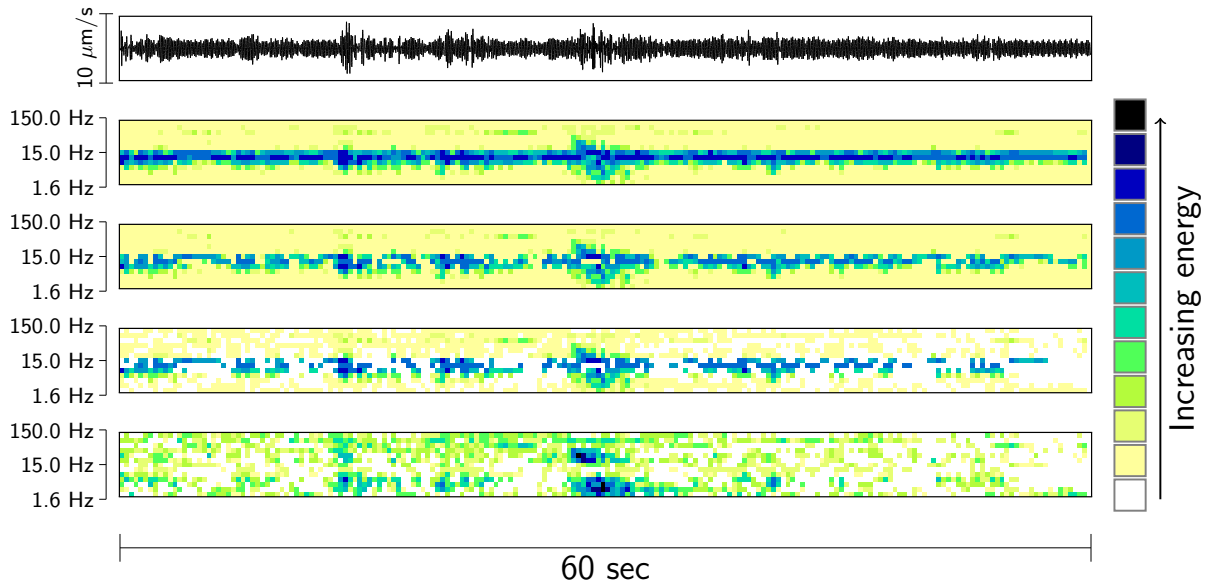


Abbildung 3.9: Berechnungsschritte vom Seismogramm über Spektrogramm zum Sonogramm (Sick et al., 2012).

te von Vouillamoz (2015) und Vouillamoz et al. (2016) gezeigt werden. Einen Vergleich zu klassischen Mikroseismischen Netzwerken sowie zu „passive seismic“ ist in Tabelle 3.5 und Abbildung 3.7 gegeben. Eine umfassende Einführung sowie ein Vergleich zu anderen Methoden können in Häge (2009), Vouillamoz (2015) und Joswig (2008) gefunden werden. Der vorhergehende Abschnitt wurde bereits in ähnlicher Form in Blascheck et al. (2015) veröffentlicht.

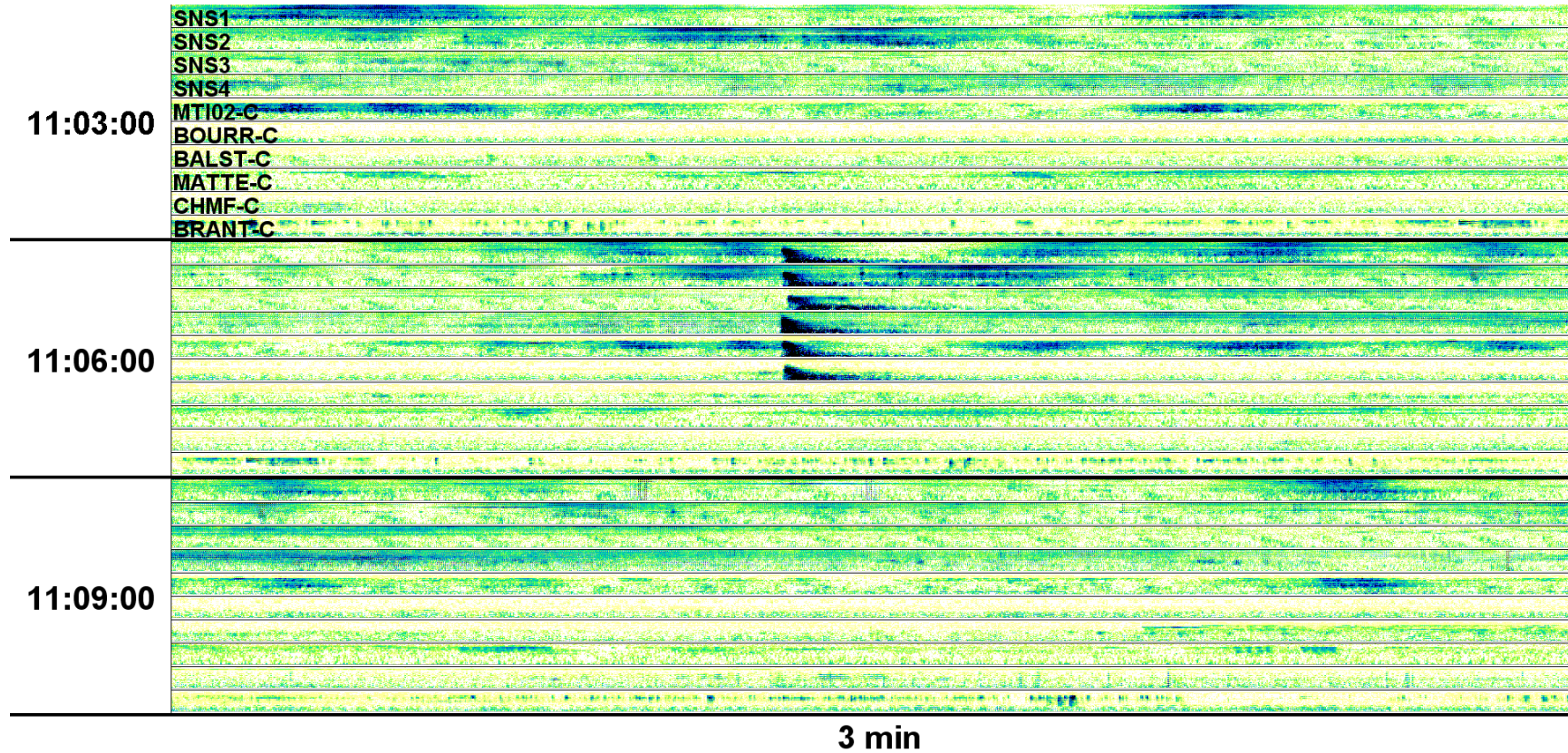


Abbildung 3.10: Screenshot des Programms zur manuellen visuellen Ereignisdetektion (*SonoView*) mit lokalem lokales Ereignisbeispiel, drei Zeitzeilen mit je 3 Minuten zeigen die Supersonogramme der SNS des Mont Terri Netzwerks sowie die Sonogramme der Dreikomponentenstationen benachbarter Regionalnetzstationen.

Kapitel 4

Fallstudie: Felslabor Mont Terri

4.1 Einführung	61
4.1.1 Lage	61
4.1.2 Geologie und Tektonik	62
4.1.3 Hintergrundseismizität	68
4.1.4 Relokalisierung	71
4.2 Seismisches Monitoring	72
4.2.1 Permanentes Messnetzwerk	72
4.2.2 Standortqualität	77
4.2.3 Datenprozessierung	80
Ereignisdetektion	80
Ereignislokalisierung	80
Schweizer Erdbebendienst	81
4.2.4 Lokalisierungs- und Magnitudengenauigkeit	81
Das Monnat Ereignis	81
Lokalisierungsgenauigkeit	84
Backazimuthfehler von SNS1	90
Magnitudendiskussion	94
Zusammenfassung	98
4.3 Seismizität in Mont Terri	98
4.3.1 Lokale Seismizität	98
4.3.2 Clustering	103

	Ereignis vom 28.3.2000 3:16 Uhr (hist)	110
	Self Organizing Maps	111
4.3.3	Seismizität am Felslabor	112
	Relativlokalisierung	113

4.1 Einführung

Das Mont Terri Projekt untersucht seit 1996 in einem Forschungsfelslabor die Eignung des Opalinuston als Wirtsgestein für radioaktive Abfallstoffe. Nicht nur in Frankreich oder der Schweiz, in der das Bundesamt für Energie BFE (2011) den Opalinuston als einziges Wirtsgestein für haw ausgewählt hat, sondern auch in Deutschland wurde der Fokus von Salz auf Opalinuston erweitert, dank seiner vorteilhaften Eigenschaften (Kapitel 3.1.1). Am Projekt beteiligen sich derzeit 15 internationale Partner unter Leitung vom Bundesamt für Landestopografie, Schweiz (swisstopo). Diese ermöglichen 138 Experimente (Stand: Juni 2015, Mont Terri (2016)), welche großteils in Bossart und Thury (2008) beschrieben sind, um die Einlagerungseigenschaften des Opalinuston zu erforschen, speziell die hydrogeologischen, geochemischen und felsmechanischen. Zusätzlich werden Untersuchungen im Zusammenhang mit Carbon Capture and Storage (CO₂-Abscheidung und -Speicherung, CCS) durchgeführt.

4.1.1 Lage

Das Felslabor befindet sich im Nordwesten der Schweiz im Kanton Jura (Abbildung 4.1) nahe der Siedlung St. Ursanne. Es liegt etwa 300 m unterhalb der Erdoberfläche. Die Basis bildet der Rettungstunnel in dem Bereich, in welchem der Autobahntunnel der A16 den Opalinuston schneidet. Dies erlaubt die Untersuchung des Opalinuston auf Umgebungs-



Abbildung 4.1: Lage des Mont Terri Felslabors in der Schweiz (Mont Terri, 2016).

höheniveau. In mehreren Abschnitten wurde das Felslabor bereits ausgebaut (Abbildung 4.2), zusätzliche Erweiterungen sind bereits in Planung. Insgesamt beträgt die Länge der Galerien ca. 500 m, welche vollständig im Opalinuston liegen, mit einer Scheinmächtigkeit von 160 m und einer wahren Mächtigkeit von 130 m.

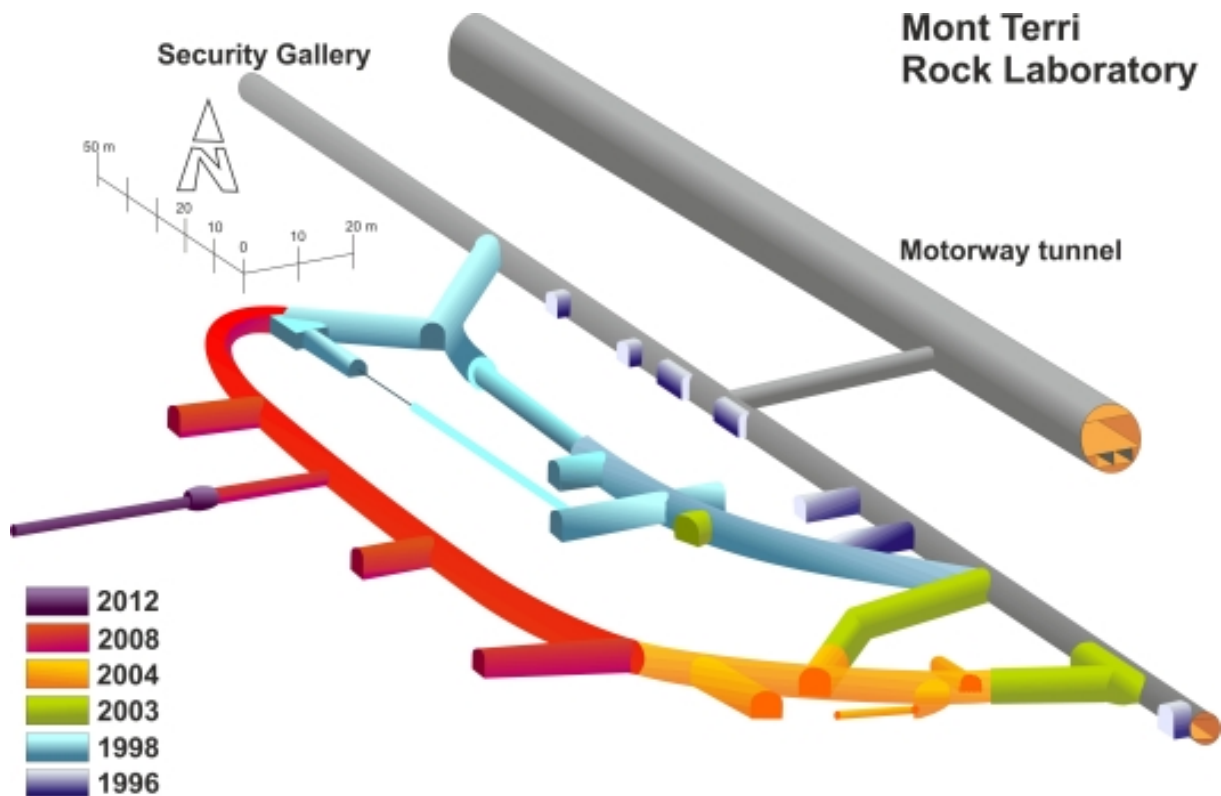


Abbildung 4.2: Ausbaustufen des Felslabors Mont Terri. Begonnen wurde in kleinen Nischen bis 1998 ein erster Versuchsstollen gebaut wurde. Weitere Ausbauten folgten (Mont Terri, 2016).

4.1.2 Geologie und Tektonik

Als Pangaea im Trias zerbrach, bildete sich im heutigen Alpenraum der Tethysozean, im Norden begrenzt durch den europäischen Kontinentalrand, im Süden sowohl durch den Adria-Kontinentalrand als auch durch den Kontinentalrand der ostalpinen Mikroplatte (Alcapan) (Abbildung 4.3). Im späten Jura entstand durch das Auseinanderdriften von Europa und Afrika/Adria eine neue ozeanische Lithosphäre mit Peridotiten, Serpentinitten, Gabro und Basalt (Weissert und Stössel, 2015). In dieser Zeit bildeten sich frühe Transform-Störungen. Der Beginn der Orogenese ereignete sich in der frühen Kreidezeit, als im Osten die Terrane Tisza und Alcapan kollidierten. In der mittleren Kreide kehrten sich großtektonisch Bewegungen um und Afrika/Adria/Alcapan und Europa bewegten sich

aufeinander zu. Im frühen Tertiär kollidierten zuerst Europa mit dem Mikrokontinent Briançonnais, der Piemont Trog wurde subduziert und die Adria-Platte wurde nordwärts auf die europäische Platte geschoben. Die Hauptphase der Gebirgsbildung ereignete sich vor 30 bis 35 *Ma* im Erdzeitalter Paläogen. Vor 3 bis 12 Millionen Jahre wurde das Jura-gebirge gebildet (Mont Terri, 2016). Es erstreckt sich 50 *km* östlich von Lyon über Genf bis 15 *km* nordwestlich von Zürich (Lägern) (Weissert und Stössel, 2015). Der Tafeljura im Norden zeigt die ursprünglichen Sedimentgesteinsabfolgen (Abbildung 4.4): Sandstein, Evaporite, Dolomite, und Kalke der Trias die von Kalken, Mergeln und Tongesteinen aus dem Jura (Abbildung 4.5) überlagert werden.

Durch den Fernschub der Alpen (Laubscher (1961), Burkhard und Sommaruga (1998)) resultierte eine Überschiebung von etwa einem Kilometer (alternative Theorien zur Fernschub Theorie werden in Ibele (2011) diskutiert). Die gesamte Raumverkürzung durch die Jurafaltung beträgt etwa 25 *km* (Weissert und Stössel, 2015). Entlang des Jurabogens existieren die Überschiebungen in listrischer Form. Zwar zeigen sich an der Oberfläche recht steil stehende Schichten, mit zunehmender Tiefe werden diese flacher bis sie im mittleren Trias quasi schichtparallel verlaufen („Thin-skinned-Tektonik“, Weissert und Stössel (2015)). Philippe (1995) und Sommaruga (1999) unterscheiden drei Struktureinheiten (Abbildung 4.6(b)): der autochthone und schwach deformierte Tafeljura, der allochthone äußere Jura, markant durch seine niedrigen Amplituden der entkoppelten Verwerfungen und der innere Jura, der stärker deformiert ist durch Brüche und Verwerfungen. Mont Terri befindet sich im Jura Faltengürtel, der die äußerste Deformationsfront der Europäischen Alpen darstellt. Aus Südosten ist der Juragürtel begrenzt durch das Schweizer Molasse Becken (Oligo-Miozän, Abbildung 4.6, Sommaruga (1999)). Der Mont Terri befindet sich an der nordwestlichen Kante des Juras, im Bereich in dem der interne Jura vom Tafeljura überschoben wurde. Im Bereich vom anstehenden Gestein ist der Tunnel mit zahlreichen Fossilien, wie z.B. dem namensgebenden Ammoniten *Leioceras Opalinum* (Insert Abbildung 4.5), durchsetzt. Der Opalinuston ist eine marine, organhaltige Tonsteinformation im Mitteljura (Aaleium). Abgelagert wurde er in einer mittleren Wassertiefe von 20 – 50 *m*. Im Felslabor ist er eine vorbelastete Schieferformation mit einer aktuellen Auflast von 300 *m* und einer geschätzten ehemaligen Auflast von mindestens 1350 *m*. Er besteht zu 40 – 80% aus Tonmineralien und Glimmer, 10 – 40% Quarz, 5 – 40% Kalkspat, 1 – 5% Siderite, 0 – 1,7% Pyrit und 0,1 – 0,5% Organik (Bossart und Thury, 2008). Beim Opalinuston unterscheidet man fünf lithostratigrafische Untereinheiten (Blaesi et al. (1991); Schaeren und Norbert (1989); Thury und Bossart (1999)) welche in drei Hauptfazies gegliedert sind: eine Schieferfazies im liegenden Teil der Formation (ton-

4.1. EINFÜHRUNG

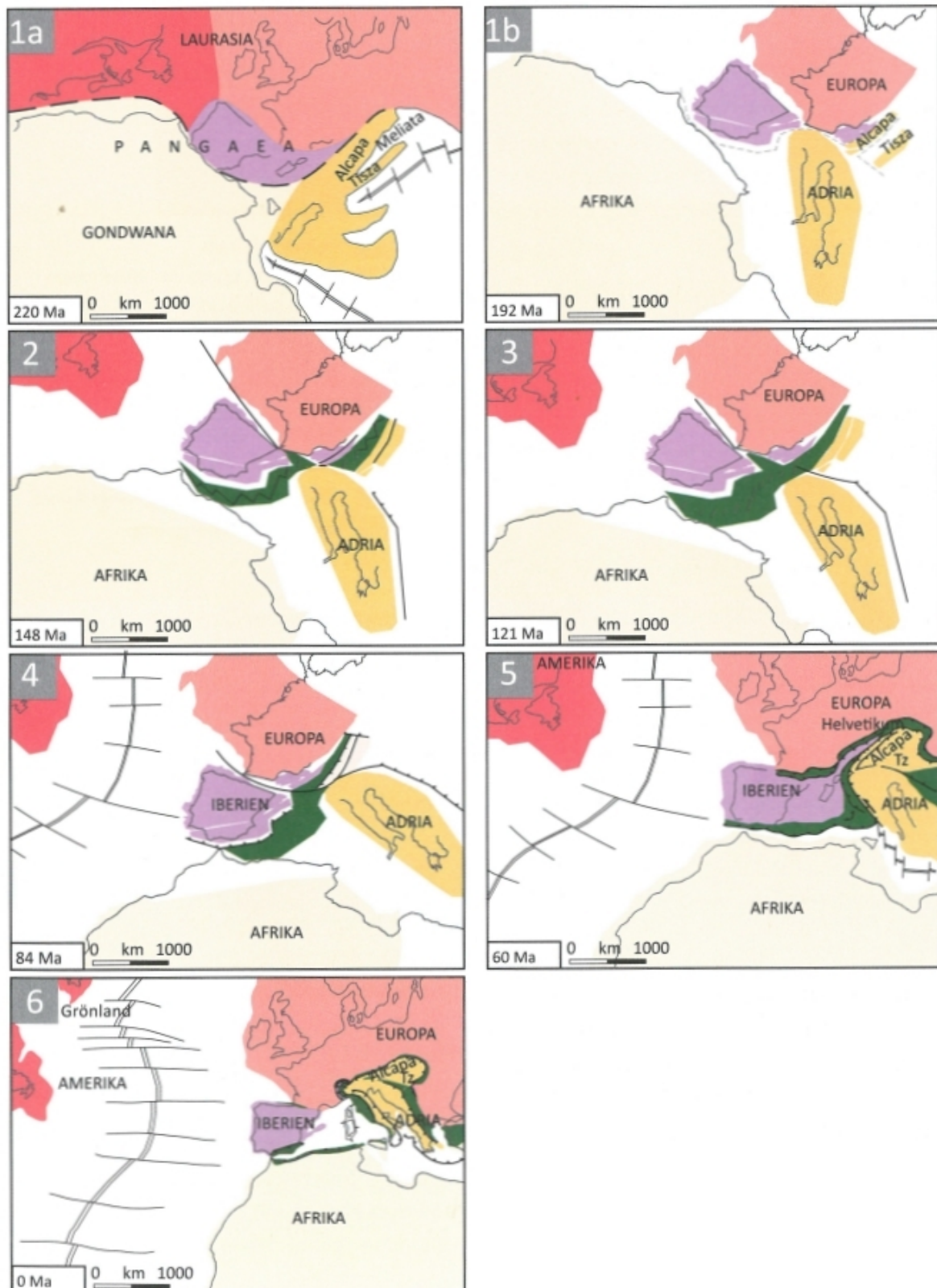


Abbildung 4.3: Palaeogeografische Phasen des zentralen Atlantiks und im Bereich der Tethys. In grün ist die mesozoische ozeanische Kruste dargestellt (Weissert und Stössel, 2015).

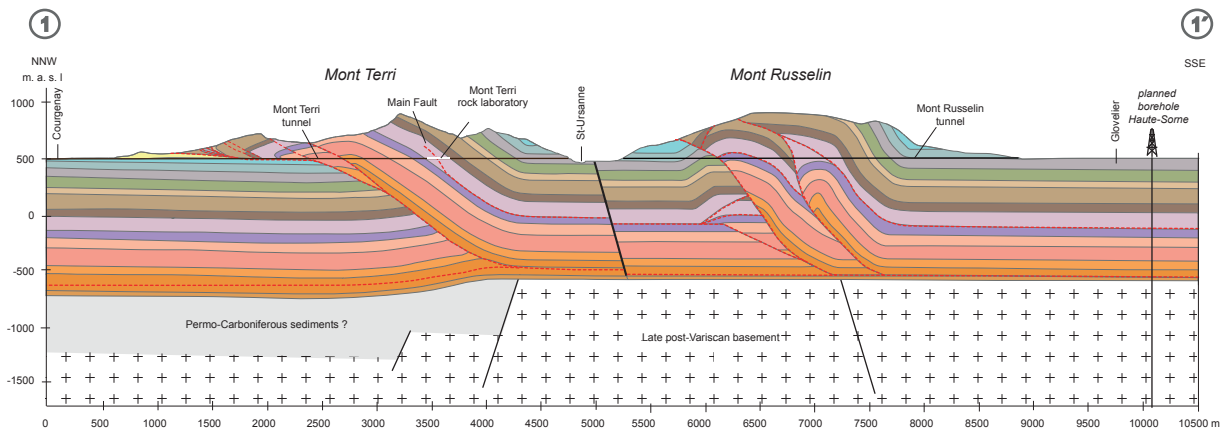


Abbildung 4.4: Geologischer Schnitt durch Mont Terri und Mont Russelin entlang der Autobahn (persönliche Kommunikation C. Nussbaum 09.08.2016). Die in Abbildung 4.5 gezeigte Stratigraphie folgt in etwa dem Strich zur Beschriftung „Mont terri rock laboratory“.

und mergelhaltige Schiefer mit Glimmer und knolligen biologisch durchsetzten Mergelschichten und millimeterdicken Sandsteinschichten), eine sandige Fazies im mittleren und oberen Teil (Mergelschiefer mit Sandsteinschichten und biogenem Kalkstein oder Linsen aus grauem, sandigen Kalkstein mit millimetergroßen Schichten aus weißem Sandstein mit Pyrit) sowie einer dünnen kohlenstoffreichen, sandigen Fazies im mittleren Teil (kalkhaltige Sandsteine mit eingelagertem, biologisch durchsetzter Kalksteinbank, letztere mit einem hohen, dendritalen Quarzanteil). Die Höchsttemperatur die im Opalinuston erreicht wurde, lag bei 85 °C während der Bedeckung in der Kreidezeit (Mazurek et al., 2006). Die lokale Tektonik wird von verschiedenen Störungssystemen beeinflusst. Großräumig wirken Oberrheingraben und Lyon-Bresse-Graben sowie lokal das Juragebirge und reaktivierte permokarbonische Störungen im Grundgebirge ein. Die in den 1980er Jahren entdeckten Permokarbontröge stellen ein über die Nordschweiz weit hinausreichendes Störungssystemen dar, welches teilweise im Tertiär reaktiviert wurde (Weissert und Stössel, 2015). Die Gräben sind durch eine sinistrale Transferzone verbunden, welche Ost-West verläuft, alten, im Grundgebirge vorhandenen Grabenbrüchen des Permokarbontrögs folgend. Auf Grund dieser speziellen Position sind vermutlich die präexistente NNO-SSW oder WSW-ONO verlaufenden Krustendiskontinuitäten verantwortlich für die Verwerfungen und die Segmentation durch Blattverschiebungen während der Mio-Pliozän Kompressionsphase. Rezente Seismizität könnte mit diesen tiefen Strukturen zusammenhängen. Die neotektonische Aktivität ist eingeschränkt bestätigt durch das Auftreten von Erdbeben im Grundgebirge. Herdmechanismen weisen auf Blattverschiebungen hin mit einer leichten

Stratigraphic sequence BDB-1

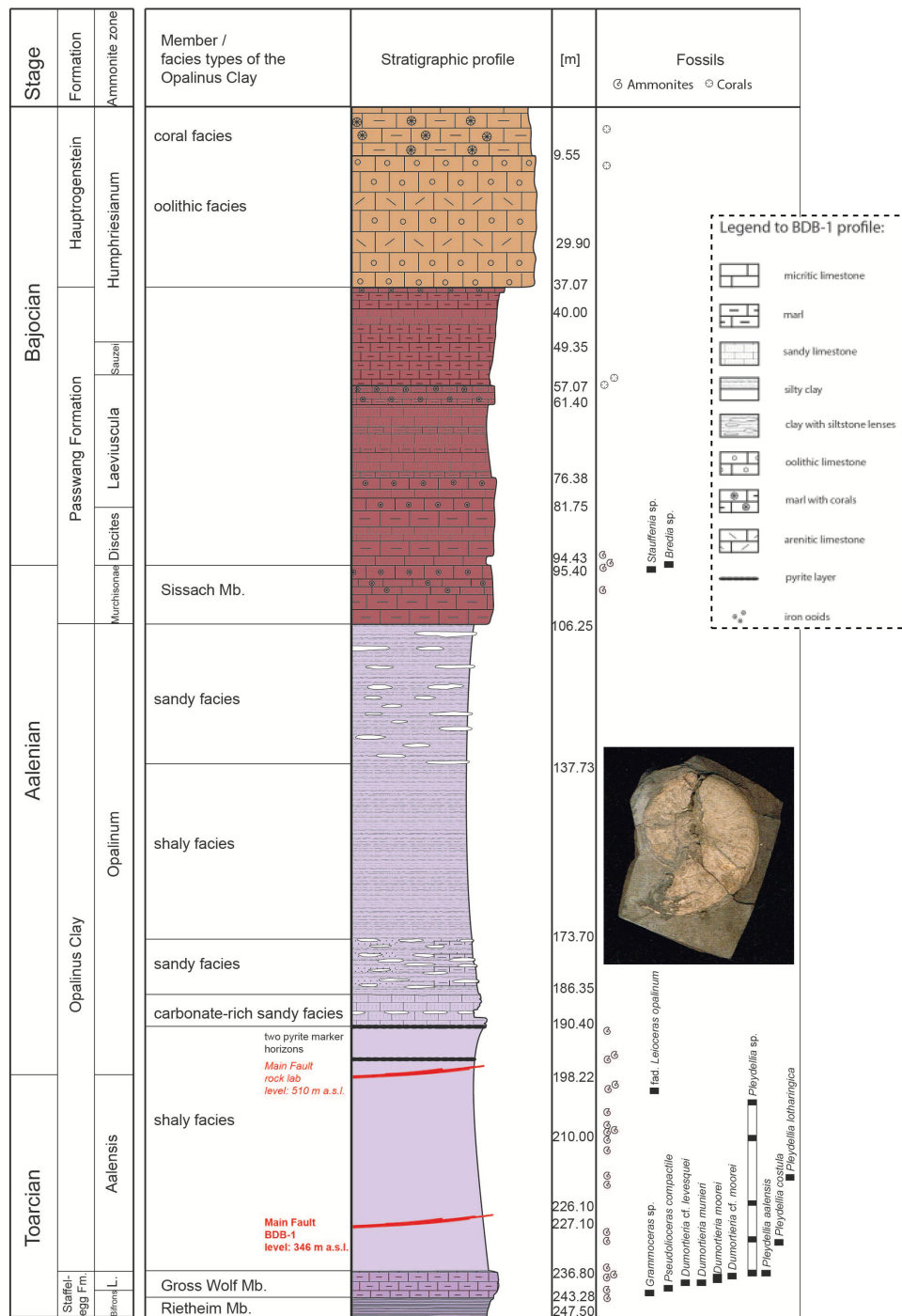
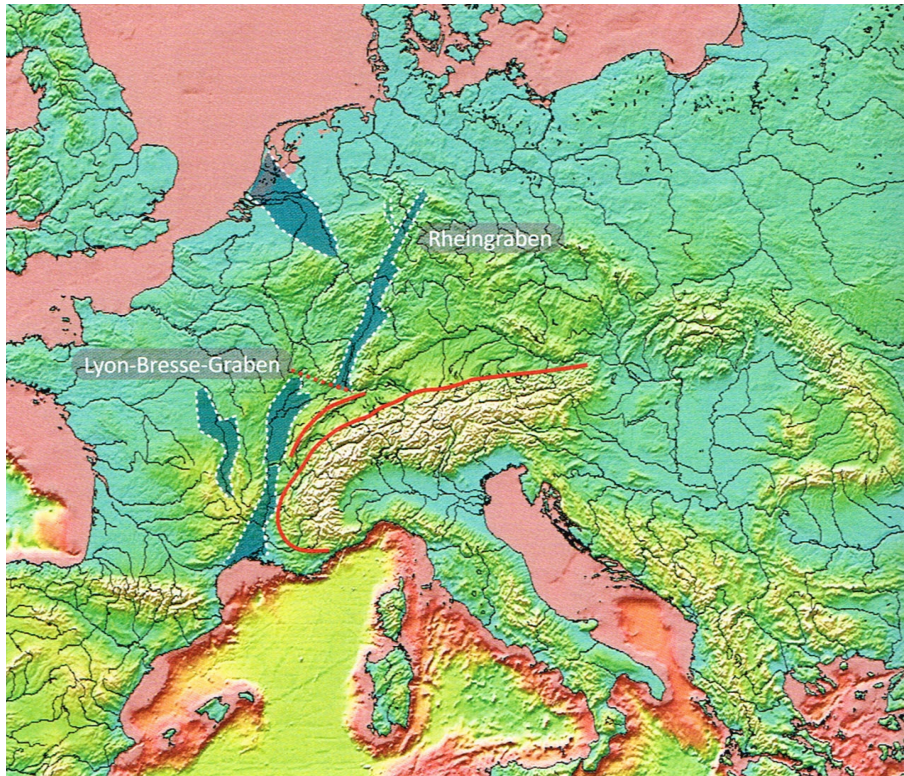
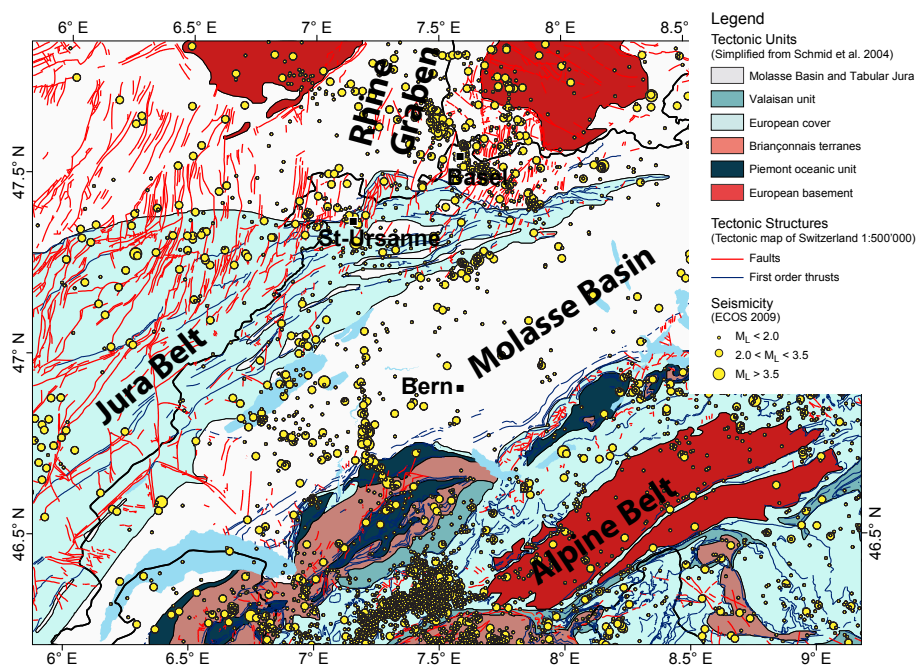


Abbildung 4.5: Stratigraphische Sequenz nach Hostettler et al. (2017), *Leioceras opalinum* ist das namensgebende Fossil des Opalinustones (Bild eingefügt, Breite ca 6 cm, Weissert und Stössel (2015)).



(a) Das Europäische-Känozoische Grabensystem teilt Mitteleuropa Weissert und Stössel (2015).



(b) Tektonik und Seismizität in der Region von Mont Terri auf einer geologischen Karte, vereinfacht nach Schmid et al. (2004) und Vouillamoz et al. (2012) (persönliche Kommunikation N. Vouillamoz 27.7.2016).

Abbildung 4.6: Übersicht der Grabensysteme und Tektonik im größeren Umfeld des Untersuchungsgebiets.

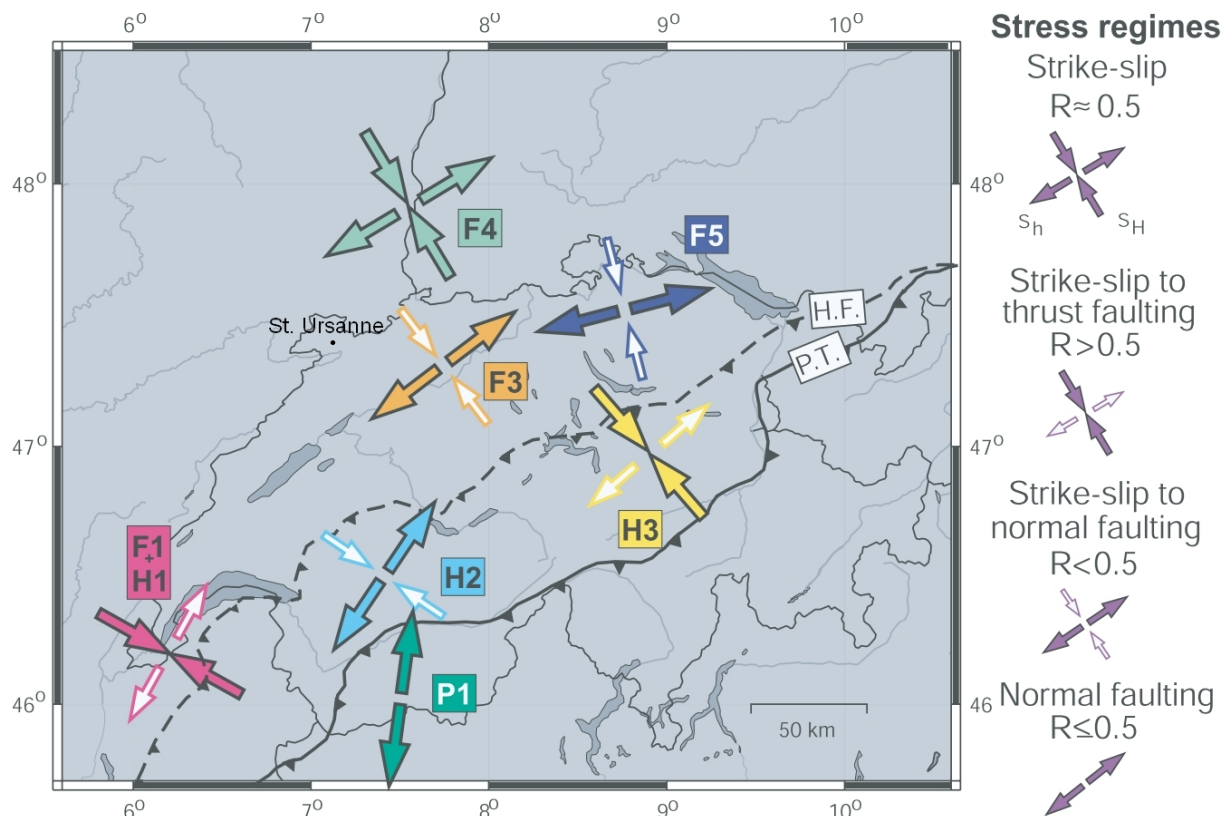


Abbildung 4.7: Zusammenfassung der Spannungsinversion in der Schweiz (modifiziert nach Kastrup et al., 2004a).

Tendenz zur Extension (Abbildung 4.7). Ein aktuelleres Beben, das Rigney Beben vom 23.2.2004, zeigt Überschiebungen (Kompression) im Grundgebirge mit einer Herdtiefe von 10 km und einer Momentenmagnitude von $M_w = 4,5$ (SED, 2016). Dieses Beben ereignete sich wahrscheinlich entlang der WSW-ENE verlaufenden Verwerfung angrenzend zum Permo-Karbondgraben. Diese Beobachtungen suggerieren, dass tektonische Aktivität im Juragürtel nach wie vor vorhanden ist.

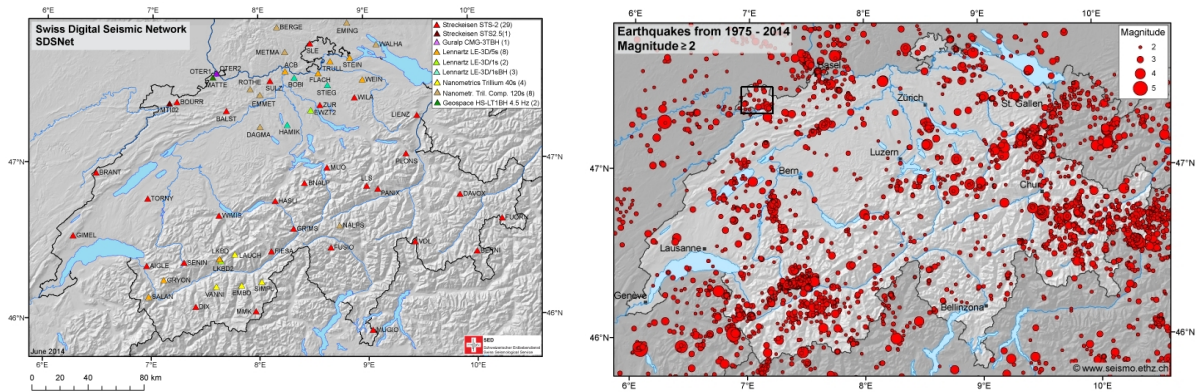
4.1.3 Hintergrundseismizität

Für die Bewertung des Messnetzwerkes sowie der rezenten Seismizität ist die Analyse der bisherigen Seismizität notwendig. Für die Untersuchung werden Ergebnisse des Erdbebenkatalogs ECOS09 (Fäh et al., 2011) des Schweizer Erdbebendienst (SED) bzw. dessen Homepage (SED, 2016) verwendet. Zusätzlich werden Bulletins anderer Erdbebendienste (Seismicportal (2016), Réseau National de Surveillance Sismique (Französischer Erdbebendienst, RéNaSS), Landeserdbebendienst Südwest (LED)) im betrachteten Bereich untersucht, sofern sie vom SED noch nicht bereits berücksichtigt sind. Diese Daten wur-

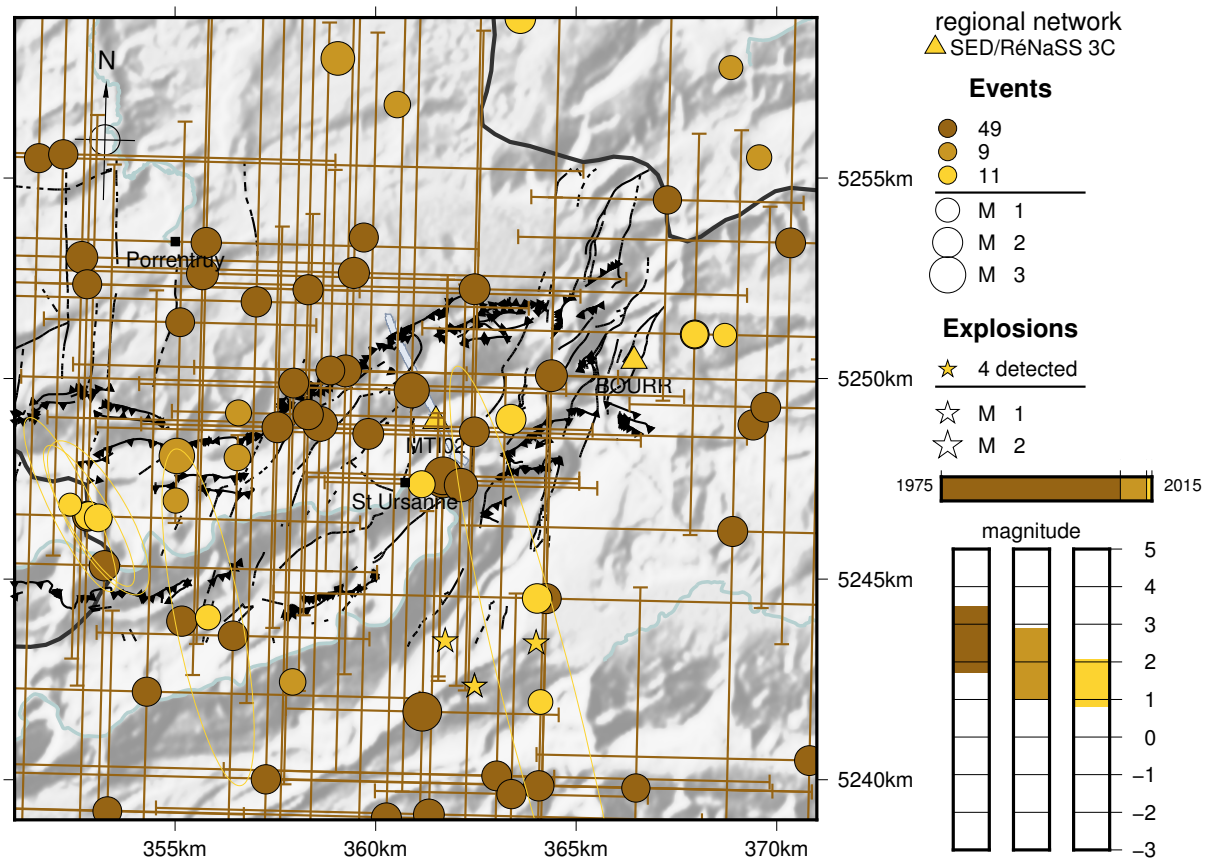
den vom SED hauptsächlich mit Hilfe des Schweizer Regionalnetzes erhoben (Abbildung 4.8(a)), ein Datenaustausch mit benachbarten Diensten findet statt.

Der SED betreibt bei der Stationssuche einen enormen Aufwand mit hohen Standards (geringes Störsignalniveau und geringe geologische Einflüsse (Landtwing et al., 2014)). Daher ist die Datenqualität und -verfügbarkeit der meisten zur Verfügung stehenden Stationen ausgezeichnet. Eine der Ausnahmen davon ist die für diese Studie verwendete Station Schützenmatte (MATTE, siehe Kapitel 4.2.1). Schützenmatte wurde im Zuge der Überwachung der hydraulischen Stimulation in Basel installiert und deren urbane Umgebung verursacht einen erhöhten Rauschpegel. Die Mehrzahl der installierten Seismometer sind Streckeisen STS-2 (Abbildung 4.8(a)). Abgesehen von Basel ist die Stationsdichte in der Nordwestschweiz gering. Die Vollständigkeitsmagnitude im Bereich Mont Terri beträgt $M_c \approx 2.0$ (Kraft et al., 2013). In Abbildung 4.8(b) sind die Erdbeben ab einer Magnitude $M = 2,0$ dargestellt, welche instrumentell zwischen 1975 und 2014 aufgezeichnet wurden. Das dargestellte Gebiet um Mont Terri (Markierung etwa $20 \times 20 \text{ km}^2$) ist seismisch aktiv, im Vergleich zu anderen Regionen in der Schweiz jedoch eher gering. Eine Vergrößerung des Inlets um Mont Terri herum zeigt Abbildung 4.8(c) bis Ende 2015. In dunkelbraun sind Ereignisse des ECOS09 mit deren Fehlerbalken dargestellt, in hellem braun sowie gelb diejenigen die den genannten Bulletins seit 2009 entnommen wurden. Die Trennung der Bulletins in zwei Gruppen erfolgt zur Installation von SNS1 am 8.4.2014. Für die aktuellste Gruppe (gelb) aus SED (2016) sind teilweise Fehlerellipsen dargestellt, sofern diese veröffentlicht wurden. Sprengungen sind durch Sterne dargestellt (ab Start SNS1). Lokalisierungsfehler reduzierten sich von anfangs $5 - 10 \text{ km}$ auf etwa 3 km . Dies geht im wesentlichen auf die Verdichtung des Netzwerks zurück (siehe Kapitel 4.2.1). Trotz des im internationalen Vergleich sehr engmaschigen Netzwerks in der Schweiz (Abbildung 4.8(a)) ist die Aussagekraft über lokale Verwerfungen auf Grund der relativ hohen Ungenauigkeit sowie der geringen Ereignisanzahl gering. Insgesamt wurden von Anfang Januar 1975 bis Ende September 2015 69 Ereignisse in einer Umgebung von 10 km lokalisiert. Bei einer Ereignisrate von etwa 1,7 pro Jahr insgesamt, mit Erhöhung seit Projektbeginn auf 7,2 pro Jahr können vorhandene sowie mögliche unkartierte Störungszonen nur nach längeren Zeiträumen (>100 Jahre) erfasst werden. Die in Kapitel 3.3 vorgestellten lokalen Netzwerke zur Überwachung der Seismizität könnten im Bereich des Labors die Empfindlichkeit erhöhen und damit den Beobachtungszeitraum verringern. Vouillamoz (2015) zeigte, dass allein durch die Verwendung von Detektionsalgorithmen, basierend auf Sonogrammen, für Daten der Regionalnetzstationen, die Vollständigkeitsmagnitude im Raum Fribourg, Schweiz um etwa eine Magnitude abgesenkt werden kann.

4.1. EINFÜHRUNG



(a) Breitbandstationsnetz des SED, Stand Juni 2014 (SED, 2016). (b) Epizentrenkarte der instrumentell aufgezeichneten Erdbeben in der Schweiz und Umgebung von 1975 – 2014 mit Magnituden $M \geq 2.0$ (SED, 2016).



(c) Vergrößerung der Markierung aus Abbildung 4.8(b). Hintergrundseismizität seit 1975 mit kartierten Verwerfungen und Autobahntunnel (hellblau). Kreisgröße skaliert mit der Magnitude, teilweise mit Fehlerbalken bzw. Fehlerellipsen, gelbe Dreiecke markieren die Standorte der Regionalnetzstationen. Sprengungen sind erst seit Beginn des Messnetzwerks gezeigt (gelbe Sterne). Für drei sehr unterschiedliche Zeitbereiche wurde die Gesamtzahl der Ereignisse sowie deren Magnitudenbereich auf der rechten Seite dargestellt. Details siehe Text.

Abbildung 4.8: Regionales Messnetzwerk und damit gemessene Hintergrundseismizität.

4.1.4 Relokalisierung

Seit 1975 ereigneten sich drei Erdbebensequenzen innerhalb von 24 Stunden mit mehr als zwei Ereignissen. Die Erste ereignete sich am 7.4.1996 mit vier Ereignissen mit Magnitu-

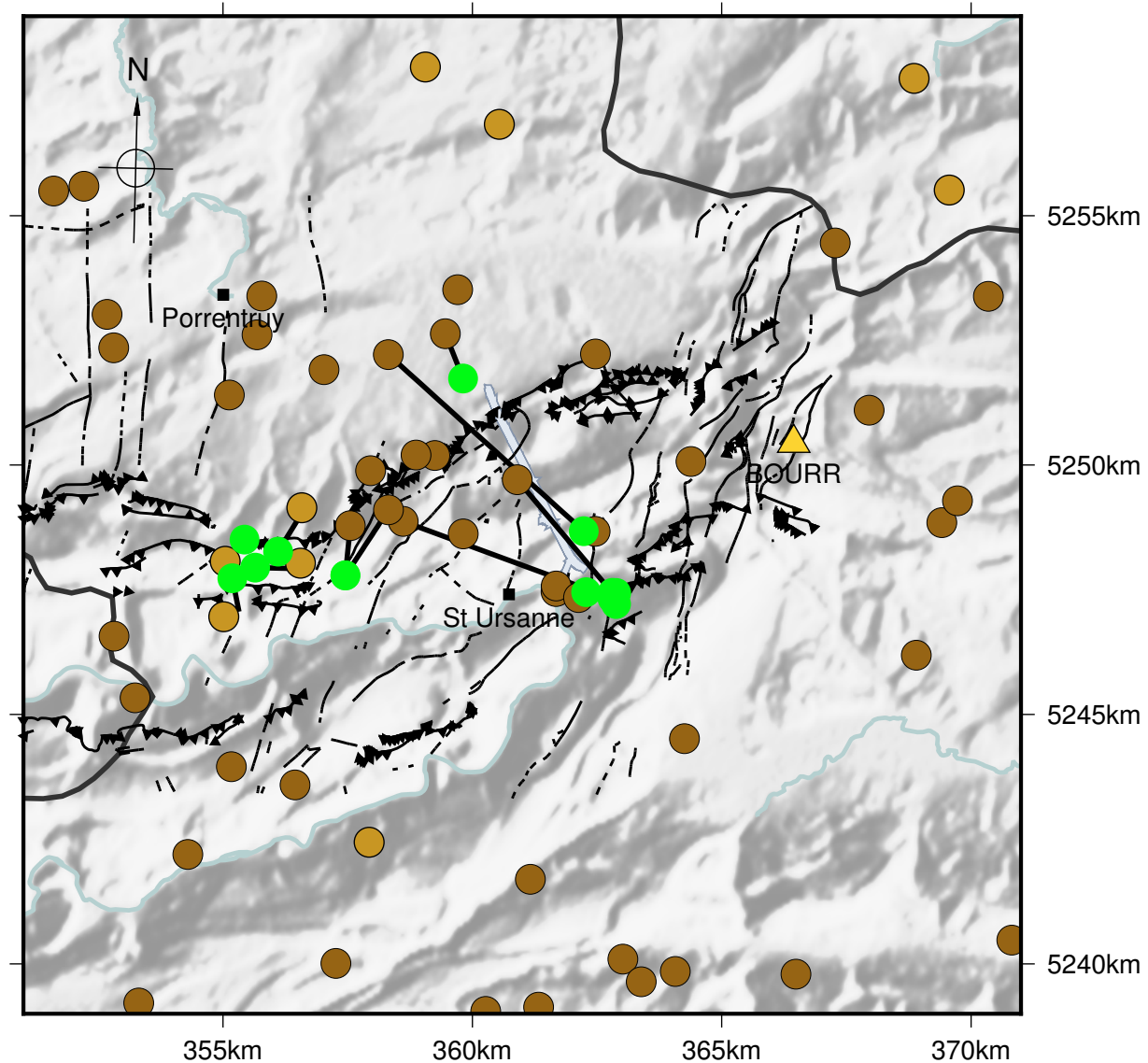


Abbildung 4.9: Relokalisierte Ereignisse (grün) aus (Deichmann et al., 2012), keine Größenskalierung der Magnituden.

den von $M_w = 1,8 - 2,3$, die dritte mit drei Ereignissen am 30.10.2010 ($M_w = 1,8 - 2,1$). Die höchsten Magnituden von $M_w = 1,7 - 2,9$ traten in der zweiten Sequenz am 28.3.2000 auf. Nur 10 Tage später folgte eines der stärksten Beben nahe St. Ursanne ($M_w = 3,26$). Die hohe Kohärenz der Wellenformen deutet auf sehr ähnliche Herdmechanismen und Hypozentren hin. Auf Grund der ausgeprägten Oberflächencodas wurde die Tiefe vom oberen Kristallin (6 – 7 km) ins Mesozoische Sediment (1 km) verschoben und fixiert. Eine Tie-

fenbestimmung, basierend auf den gepickten Einsatzzeiten, ohne zusätzliche Daten bzw. Methoden kann die Tiefe nur unzureichend genau bestimmen. Deichmann et al. (2012) untersuchten die Herdflächenlösung des stärksten Ereignisses und stellten eine Abweichung bei der Nord-Süd orientierten P-Achse von der üblichen NW-SO Ausrichtung anderer Beben in der Nordwestschweiz fest.

Die Ergebnisse der Relokalisierung von Deichmann et al. (2012) sind in Abbildung 4.9 gezeigt. Dafür wurden alle in der Nähe verfügbaren Stationen genutzt (Erdbebendienst übergreifend), ein einheitliches und aktuelles 3D-Untergrundmodell sowie ein Re-picking von einem Seismologen. Die Relokalisierung wurde nur für Beben nach dem Jahre 2000 durchgeführt, da vorher große azimuthale Lücken und große Abstände zwischen den Stationen vorhanden waren. Erschwerend kommt der Umbau von Kurzperioden- auf Breitband-Seismometer in den Jahren 1998 – 2002 hinzu in dem sich das Netzwerk stark veränderte. Deichmann et al. (2012) nehmen an, dass sich alle Ereignisse in weniger als 10 km Tiefe ereigneten und alle flacher als ihre ursprüngliche Bulletin Lokalisierung sind, auf Grund der ausgeprägten Oberflächencodas (s.o.). Insgesamt wurden 13 Ereignisse relokalisiert, diese gruppieren sich in zwei Bereichen, zum einen westlich des Felslabors, zum anderen am südlichen Tunnelausgang. Beim nördlichsten Ereignis wird auf Grund der Wellenform vermutet, dass es zum südlichen Cluster gehört. Aufgrund fehlender Daten einer nahen Station ergibt sich bei der Auswertung jedoch eine abweichende Lokalisierung. Innerhalb dieses Clusters gibt es wiederum ein singuläres Ereignis vom 19.5.2005 (das westlichste) welches sich in der Wellenform und der Polarisierung des Ersteinsatzes erheblich von den anderen unterscheidet und deshalb einem anderen Quellmechanismus zugeschrieben wird.

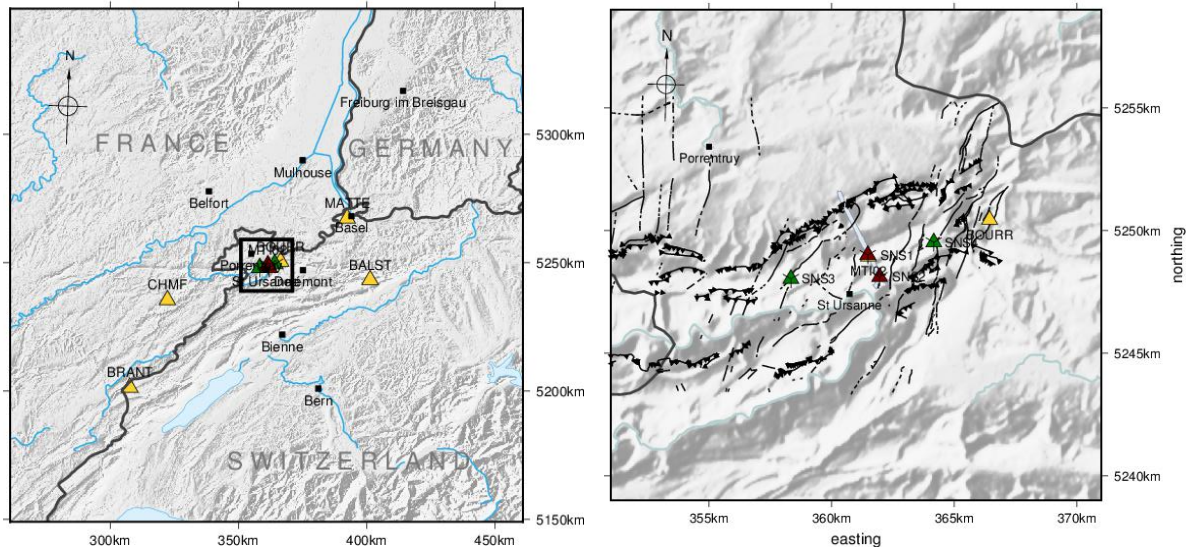
4.2 Seismisches Monitoring

Für die Untersuchung der Seismizität in der unmittelbaren Umgebung (bis 10 km) des Felslabors wurden seit 2012 vom Institut für Geophysik der Universität Stuttgart mehrere nanoseismische Messkampagnen durchgeführt. Seit April 2014 existiert ein permanentes Monitoring zur Überwachung und insbesondere zur Erfassung von Kleinstbeben. Die im Folgenden gezeigten Ergebnisse basieren auf der Auswertung der permanenten Überwachung bis Ende September 2015 sofern nicht anders vermerkt. Die Ergebnisse der Vorstudie wurden bereits publiziert (siehe Anhang A bzw. Blascheck et al. (2013)).

4.2.1 Permanentes Messnetzwerk

Sowohl der Schweizer SED als auch der Französische RéNaSS Erdbebendienst betreiben Seismometer in der Nähe von Mont Terri. Die Entwicklung des Schweizer Messnetzwerks

wird von Deichmann et al. (2014) ausführlich beschrieben. Für die Bewertung kleinskaliger und schwacher Seismizität werden Breitbandstationen in bis zu 50 km Entfernung einbezogen (Abbildung 4.10(a)). In Basel wurde mit MATTE (angegeben werden immer



(a) Siehe für den markierten Bereich Abbildung 4.10(b).
 (b) Eingezeichnet sind lokale kartierte Verwerfungen (Federal Office of Topography swisstopo; Wabern; Switzerland, 2000) sowie der Tunnel (hellblau).

Abbildung 4.10: Karten des Messnetzwerks aus Tabelle 4.1. Gelbe Dreiecke stellen externe Stationen dar, grüne (Oberfläche) und braune (Untergrund) eigene SNS.

die offiziellen Stationenkürzel) eine öffentliche, funktionierende Station ausgewählt, OTER1 ist defekt und OTER2 nicht öffentlich zugänglich. Die Geometrie des Netzwerks ändert sich fortlaufend, insbesondere kamen nach Beginn der Aufzeichnungen der Universität Stuttgart im April 2014 die Stationen MTI01 – 03 (Mai 2014) sowie SAIRA (Dezember 2015) hinzu. Weiterhin standen die Daten eines im Mont Terri Felslabor installierten STS2.5 von Edi Meier + Partner zur Verfügung. Auf diese hätte bei einem relevanten Ausfall von SNS1-E oder MTI02 zurückgegriffen werden können. Die azimuthale Stationsabdeckung ist in Richtung Nordosten Südwesten erheblich besser als senkrecht dazu. Im kleinskaligen Bereich weist diese eine Ostnordost Westsüdwest Ausrichtung auf. Um von Vorteilen der Arrayauswertung zu profitieren wurden zusätzlich zu den genannten 3C Seismometern Mini-Arrays (SNS) aufgebaut. Dieses lokale Netz der Universität Stuttgart umfasst insgesamt fünf SNS (Abbildung 4.10(b)), eines davon temporär (SNS5, Tabelle 4.1). Zwei permanente SNS wurden im Tunnel installiert (Abbildungen 4.11(a) und 4.11(b)), die anderen oberirdisch (Abbildungen 4.11(c) und 4.11(d)). Während für die unterirdischen SNS ein relativ simpler Aufbau genügte, musste für die Oberflächen SNS ein



(a) Schaltschrank SNS1.



(b) Schaltschrank SNS2.



(c) Schaltschrank SNS3 mit Solarpaneelen im Hintergrund (G) und Brennstoffzelle (H) sowie Methanoltanks (I) zusätzlich.



(d) SNS4, ausgestattet wie die unterirdischen Stationen. Die frischen Gräben der Kabel für die Satellitenseismometer sind sichtbar.

Abbildung 4.11: oben: Unterirdisch installierte permanente SNS. Links ist die Glasfaserkabeltrommel (A) sichtbar (später ersetzt durch ein kürzeres Kabel). Beide SNS sind ausgestattet mit Digitizer (B), Backupbatterie (C), Notstromanschaltkarte (D), Raspberry Pi (E) und externer Festplatte (F). unten: Oberirdisch installierte permanente SNS, die Datenübertragung erfolgt über das Mobilfunknetz.

Name	lat [°]	lon [°]	Höhe [m]	Standort	Start-datum	*	Kommentar
SNS1-C	47.379765	7.164838	516	unterirdisch	08.04.2014	97,12	
SNS1-W	47.379501	7.164281	516	unterirdisch	08.04.2014	96,96	
SNS1-N	47.380194	7.165048	515	unterirdisch	08.04.2014	96,88	
SNS1-E	47.379352	7.165311	515	unterirdisch	08.04.2014	96,99	
STS2.5	47.379266	7.165368	512	unterirdisch	14.9.2012	-	
MTI02	47.37927	7.16525	508	unterirdisch	19.05.2014	99,74	
SNS5-N	47.379223	7.165418	512	unterirdisch	26.05.2015	97,66	bis 10.11.2015
SNS5-C	47.378717	7.165812	512	unterirdisch	26.05.2015	97,66	bis 10.11.2015
SNS5-W	47.378958	7.164959	514	unterirdisch	26.05.2015	97,66	bis 10.11.2015
SNS5-E	47.378537	7.166300	511	unterirdisch	26.05.2015	97,66	bis 10.11.2015
SNS2-N	47.372451	7.171283	497	unterirdisch	06.05.2014	98,22	Global Positioning System (GPS) seit 1.7.2014
SNS2-C	47.371836	7.171487	497	unterirdisch	06.05.2014	98,21	GPS seit 1.7.2014
SNS2-W	47.371314	7.171195	500	unterirdisch	06.05.2014	98,15	GPS seit 1.7.2014
SNS2-E	47.371609	7.172338	496	unterirdisch	06.05.2014	98,18	GPS seit 1.7.2014
SNS4-W	47.384358	7.199475	690	oberirdisch	31.08.2015	86,18	
SNS4-C	47.384980	7.200350	723	oberirdisch	31.08.2015	91,70	
SNS4-N	47.385836	7.200431	753	oberirdisch	31.08.2015	87,41	
SNS4-E	47.384590	7.201398	728	oberirdisch	31.08.2015	89,47	
SNS3-E	47.370420	7.124863	753	oberirdisch	18.07.2015	99,16	
SNS3-C	47.370330	7.123671	743	oberirdisch	18.07.2015	100,00	
SNS3-N	47.370945	7.122872	751	oberirdisch	18.07.2015	99,16	
SNS3-W	47.369594	7.123197	732	oberirdisch	18.07.2015	99,27	
BOURR	47.39377	7.23018	843	oberirdisch	14.04.1998	99,96	
SAIRA	47.30267	7.08645	966	oberirdisch	22.12.2015	-	davor: 24.11.2011-4.10.2012
MATTE	47.55138	7.56944	-274	Bohrloch	31.10.2006	97,31	
BALST	47.33578	7.69498	863	oberirdisch	16.06.2000	100,00	
CHMF	47.2484	6.6517	868	oberirdisch	29.06.2009	86,61	
BRANT	46.93801	6.47298	1145	oberirdisch	10.10.2002	98,64	

Tabelle 4.1: Für die Auswertung wurden Daten von diesen Seismometern verwendet, sortiert nach Abstand zu SNS1-C, externe Informationen nach SED (2016). Die Spalte * zeigt die Datenverfügbarkeit auf Stundenbasis.

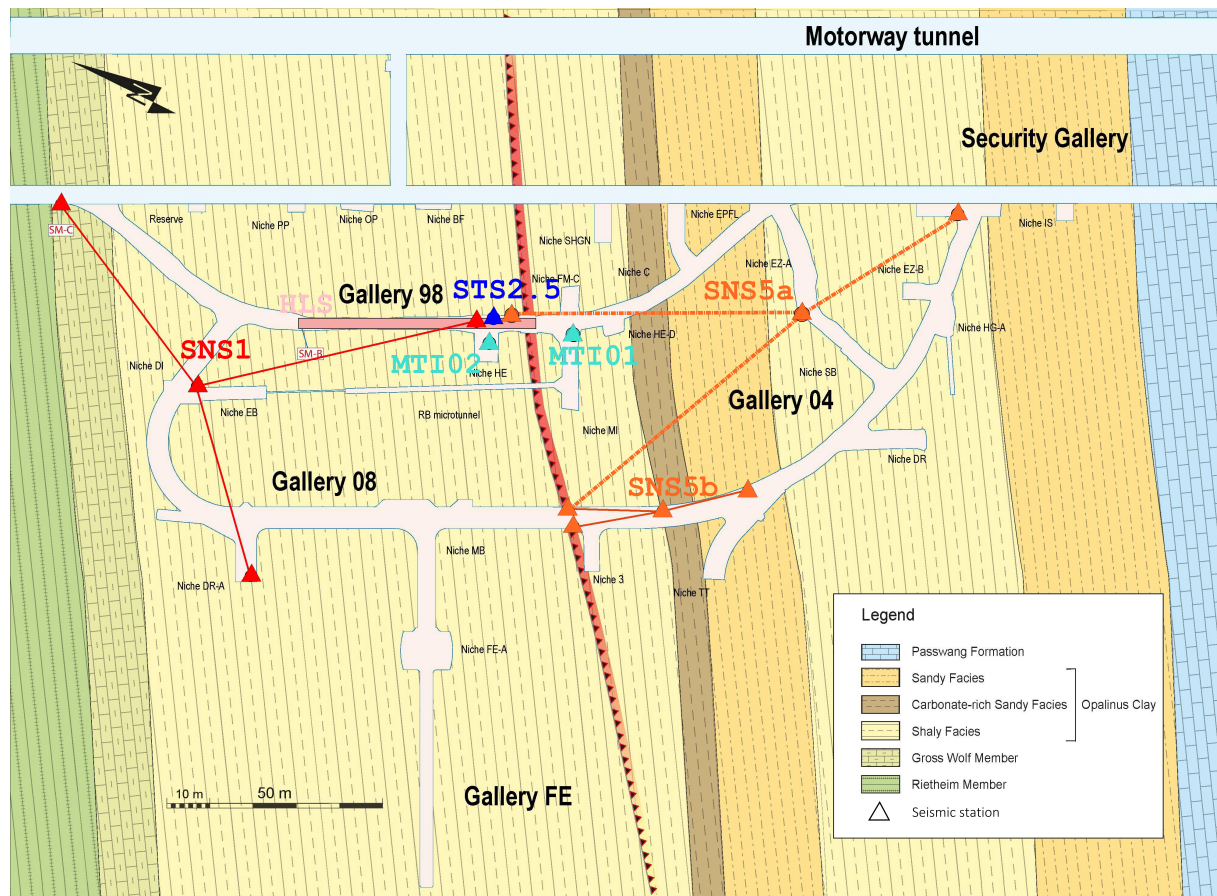


Abbildung 4.12: Schematischer Zoom von Abbildung 4.10(b) im Laborbereich. Editiert nach Schefer (persönliche Kommunikation, 8.2.16) basierend auf Mont Terri (2016). Zusätzlich zu den Standorten der Seismometer ist das HLS (Hydrostatic Leveling System) eingezeichnet.

höherer Aufwand betrieben werden um den geregelten Betrieb sicher zu stellen. Das temporäre SNS5 wurde mittels einer Autobatterie und einem Ladegerät betrieben. Letzteres wurde für die Überwachung einer hydraulischen Stimulation aufgebaut (SNS5a). Für eine weitere Testreihe wurde es 2 Wochen vor Beendigung der Messung an leicht abweichender Position aufgebaut (SNS5b, Abbildung 4.12). Abbildung 4.12 zeigt auch alle anderen permanent installierten Seismometer im Labor. Bei den permanent unterirdischen SNS wurde zusätzlich eine Notstromanschaltkarte verbaut um eine Tiefentladung der Backupbatterien zu verhindern, zusätzlich sind diese SNS an das Notstromsystem des Felslabors angeschlossen. GPS Empfang, für die Zeitsynchronisierung der Datenerfassung, wird über eine Faserbrücke gewährleistet, Internet ist per Ethernet im Labor verfügbar. Alle permanenten Seismometer wurden in etwa 30 cm tiefe Bohrlöcher versenkt. SNS4 konnte kurzfristig an eine dauerhafte Stromversorgung angeschlossen werden und ist ähnlich ausgestattet wie die permanent unterirdischen SNS. Zusätzlich wird ein Universal Mobile

Telecommunications System (UMTS)-Modem zur Datenübertragung verwendet. SNS3 ist vollständig autark. Es verfügt über eine Kombination aus Solarzellen und Brennstoffzelle zur Stromversorgung sowie einem UMTS-Modem. Bei den verwendeten Seismometern handelt es sich um LE-3D lite sowie LE-1D 1 Hz Seismometer von Lennartz Electronic. Erstere in der MKIII Ausführung (800 $V s/m$ Wandlungsfaktor), letztere in der MKII (400 $V s/m$). Für die Datenerfassung kommen Nanometrics 6-Kanal Centaur zum Einsatz. Die globale Samplerate beträgt 500 Hz, externe Daten weisen mit 100 bzw. 120 Hz eine niedrigere Samplerate auf und werden hochgesampled.

Diese Arbeit beschränkt sich auf Daten bis Ende September 2015. Für die Bewertung der Datenverfügbarkeit wurden zuerst die vollständigen Tage gewertet (siehe Anhang B), dabei werden für die SNS Datenverfügbarkeiten von mindestens 77% erreicht (SNS1: 87%, SNS2: 89%, SNS3: 100%, SNS4: 77%, SNS5: 97%). Gründe für den Datenausfall waren unter anderem Defekte des Digitizers oder menschliche Fehler, letztere insbesondere am Anfang des Projektes. Diese konnten im Laufe der Zeit erfolgreich verringert werden. Alle Ausfälle waren temporär oder konnten in weniger als einem Tag erfolgreich behoben werden. Wird daher die Datenverfügbarkeit von Stundendateien betrachtet, verbessert sich die Verfügbarkeit signifikant (SNS1: 97%, SNS2: 98% , SNS3: 100%, SNS4: 90%, SNS5: 98%). Zu 95% waren alle SNS funktionsfähig, bei einer durchschnittlichen Datenverfügbarkeit von 98%, jederzeit waren Daten von mindestens einem SNS verfügbar. Stärkere verpasste Ereignisse auf Grund der Datenbasis können somit ausgeschlossen werden.

4.2.2 Standortqualität

Für den Vergleich der Standorte bezüglich ihres Hintergrundrauschens werden die spektralen Leistungsdichten der gemessenen Bodenbeschleunigung verglichen. Vorab wird in Abbildung 4.13 das theoretische Optimum (Eigenrauschen) der Sensoren mit Daten eines außergewöhnlich ruhigen Standorts (Blackforest Observatory) betrachtet. Die dickeren, sehr unterschiedlichen, Linien stellen das Eigenrauschen verschiedener Kombinationen aus Seismometer und Digitizer dar, während als dünne Linien die spektralen Leistungsdichten einer zweitägigen Messung dargestellt sind. Die Unterschiede zwischen den Kurven des Eigenrauschens werden größer hinzu niedrigen Frequenzen. Bei den in dieser Studie aufgebauten Centaur mit Lennartz MKII (Satellitenseismometer) und MKIII (Zentralseismometer) lässt sich ein Unterschied von etwa 15 dB bei 10 Hz, bei 0,1 Hz von etwa 60 dB feststellen. Ein STS2.5 mit einem Quanterra Digitizer ist weitere 5 dB darunter, solche Daten sind von externen Quellen verfügbar. Die spektralen Leistungsdichten der verwendeten Standorte sind in Abbildung 4.14 dargestellt. Dafür wurde ein Sonntag ausgewählt an dem alle Stationen in Betrieb waren. Die stündlichen Werte sind entsprechend

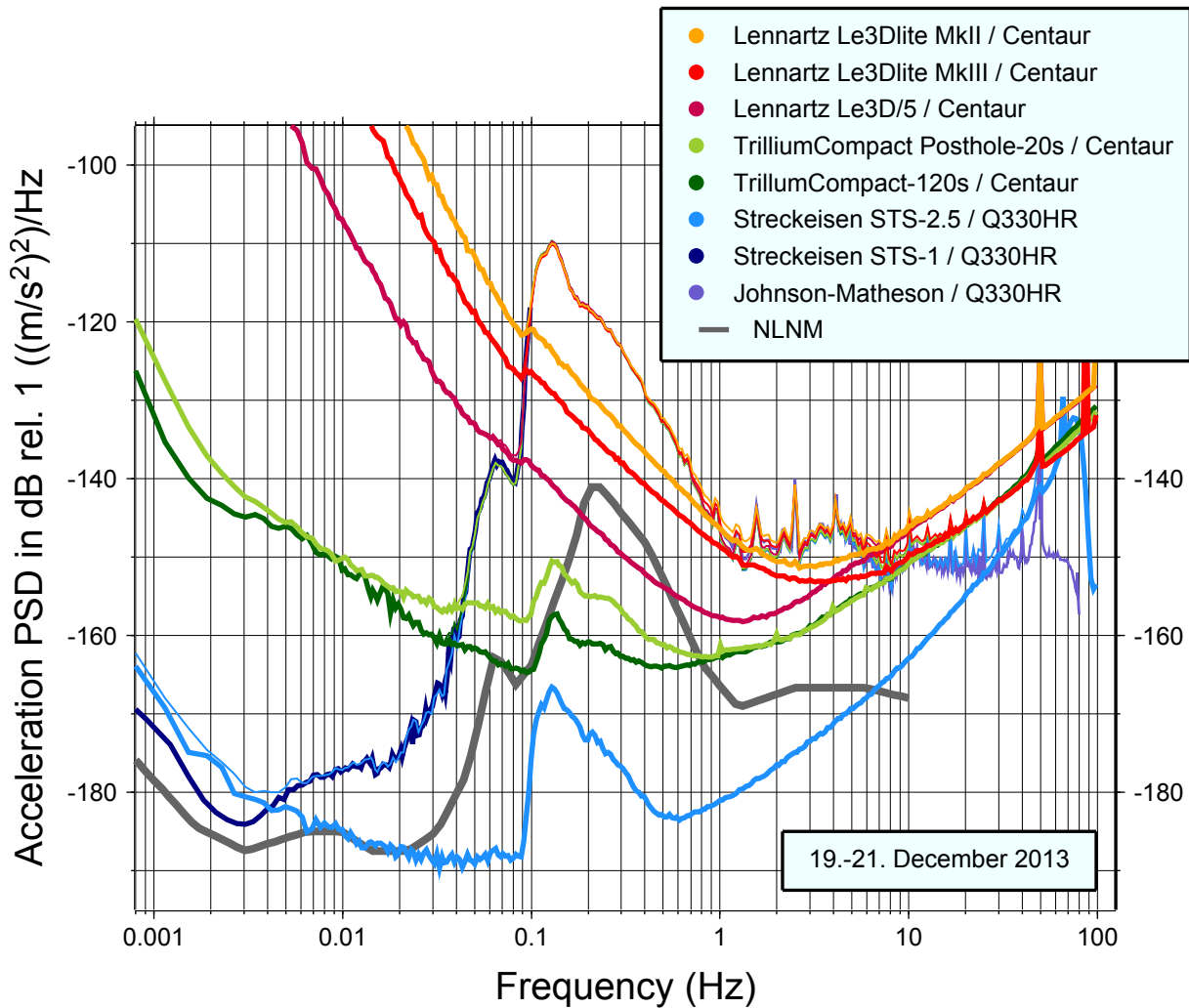


Abbildung 4.13: Für verschiedene Sensor/Digitizer Paare ist das Eigenrauschen sowie die spektrale Leistungsdichte in der selben Farbe gezeigt. Die zugrundeliegenden Daten wurden im Zeitraum 19 – 21.12.13 erhoben (Widmer-Schnidrig und Schwaderer, 2013).

ihres prozentualen Anteils farbkodiert. Im folgenden soll nur der Bereich oberhalb der Meeresmikroseismik diskutiert werden. Im Bereich 1 – 10 Hz zeigen die SNS1,2,4 und 5 sowie MTI02 ein Minimum bei etwa 2 Hz, zu höheren Frequenzen leicht unterschiedlich ansteigend. Bei SNS3 sowie BOURR, BALST, CHMF und BRANT ist dieses Minimum deutlicher ausgeprägt und steigt erst ab 30 – 80 Hz an. Vergleicht man nun SNS1 und MTI02 (Abbildung 4.14(k)) wird deutlich, dass in diesem Umfeld, für Frequenzen oberhalb der Meeresmikroseismik, die Unterschiede gering sind, bei erheblich niedrigeren Anschaffungskosten. Verpasste Ereignisse auf Grund der Messgeräteauswahl können daher ausgeschlossen werden.

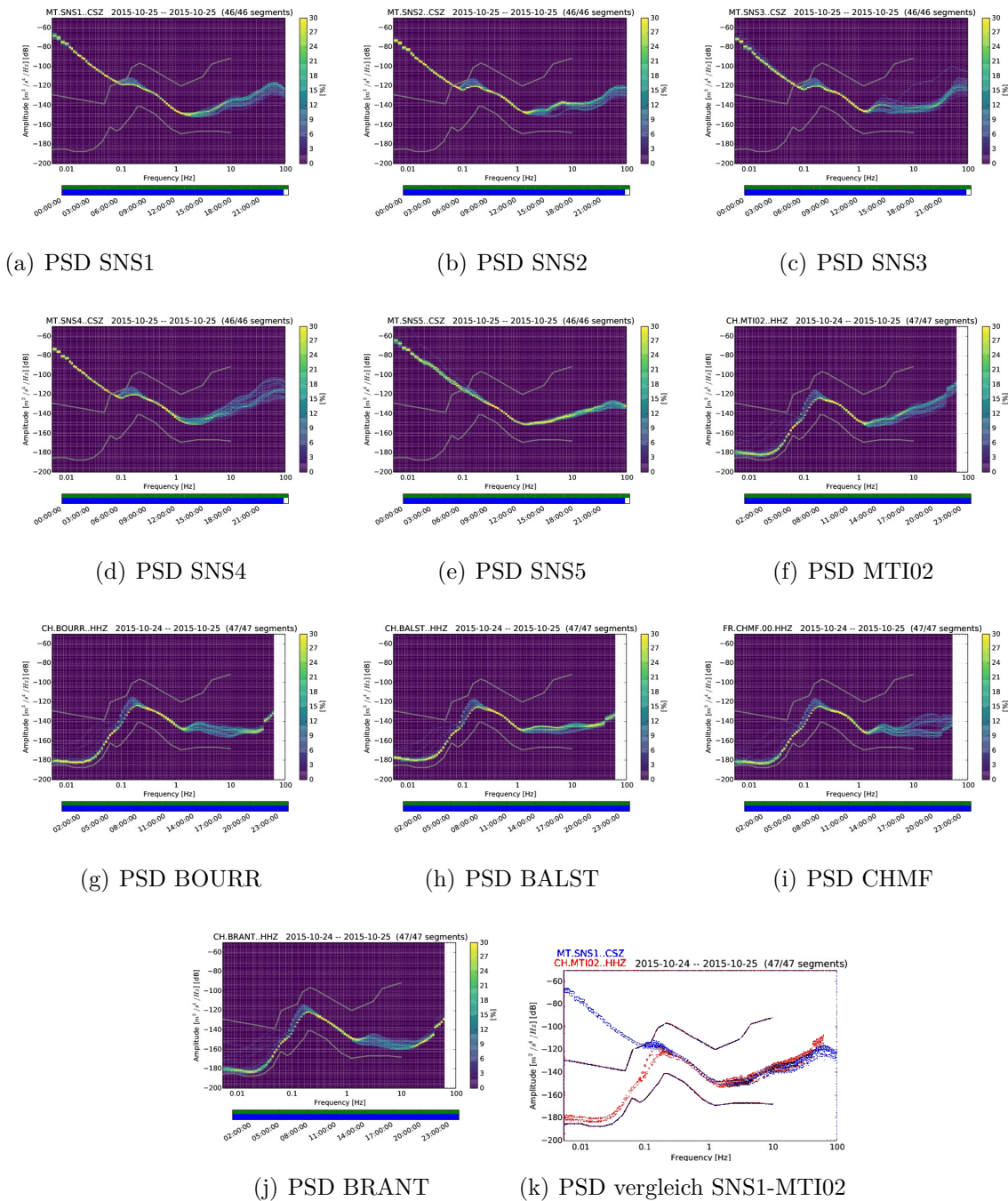


Abbildung 4.14: Spektrale Leistungsdichten der vertikalen Spuren (der Zentralseismometer) einzelner Standorte vom 25.10.15. und Vergleich von SNS1 mit MTI02 durch Überlagerung. Auf den Achsen ist die Amplitude in dB (-60 bis -200), über die Frequenz in Hz (0,005 – 100), aufgetragen.

4.2.3 Datenprozessierung

Die Daten werden nach dem folgenden Schema prozessiert: Zuerst wird in *SonoView* (Abbildung 3.10) eine Ereignisdetektion durchgeführt, bei der auch Sprengungen identifiziert werden. Das Scanning wird mit einem Downsampling von 1:8 wiederholt um tieffrequente teleseismische Ereignisse besser in SonoView, siehe Kapitel 3.3.1 (*SonoView*), erkennen zu können.

Ereignisdetektion

Ein Ereignis im Rahmen dieses Projekts wird als detektiert gewertet, wenn es in einem Bulletin weltweit (Seismicportal, 2016) oder lokal durch einen angrenzenden Erdbebedienst (SED (2016), RéNaSS (2016), LED (2016)) gelistet ist. Mittels TauP (Crotwell et al., 1999) werden theoretische Phaseneinsätze berechnet. Kann zu einem dieser Einsätze signifikante Energie in mindestens einem Supersonogramm der SNS, ohne Widersprüche zu den anderen, identifiziert werden, wird das Ereignis als „detektiert“ markiert und in das interne Bulletin aufgenommen. Für Ereignisse die nicht in Bulletins gelistet sind, wird eine Ereignislokalisierung in *HypoLine* versucht.

Ereignislokalisierung

Für mögliche seismische Ereignisse, die nicht in einem der genannten Bulletin gelistet sind, wird mit *HypoLine* eine Lokalisierung versucht. Durch die Bestimmung der P- und S-Phaseneinsatzzeiten werden grafisch t_p - t_p Hyperbeln sowie t_s - t_p Kreise im Lösungsraum dargestellt. Für SNS kann mittels visuell kontrollierter Kreuzkorrelation Backazimuth und Scheingeschwindigkeit bestimmt werden. Das Backazimuth wird zusammen mit den anderen Teillösungen (Hyperbeln und Kreise) dem Benutzer angezeigt. Interaktiv können gepickte Phaseneinsätze variiert werden und die Auswirkung auf die Gesamtlösung live nachverfolgt werden. Ebenso kann die Tiefe im 1D Tiefenmodell schrittweise verändert werden. Bei einer guten Übereinstimmung aller Constraints und den daraus berechneten Teillösungen kann das Hypozentrum selektiert werden. Daraus berechnete theoretische Phaseneinsätze geben direktes Feedback über die Qualität der gewählten Phaseneinsatzzeiten. Nachdem iterativ die optimale Lösung gefunden wurde, wird abschließend noch die Magnitude aus dem halben Peak-to-Peak Maximum beider Horizontalspuren in einer Wood-Anderson Simulation berechnet (für Details siehe Kapitel 4.2.4).

Schweizer Erdbebendienst

In Deichmann et al. (2014) wird die Auswerterroutine des SED ausführlich beschrieben und soll im Folgenden kurz zusammengefasst werden. Eine vorläufige Auswertung bietet ein automatischer Phasendetektor von Baer und Kradolfer (1987). Diese werden anschließend immer von einem Seismologen geprüft. Seit 2005 wird für die Lokalisierung *NonLinLoc* verwendet (Lomax et al. (2000), Kapitel C.2). Als Untergrundmodell verwendet es für P-Wellen ein dreidimensionales Geschwindigkeitenmodell, welches das Ergebnis einer tomographischen Inversion ist (Husen, 2003) und berechnet das Hypozentrum als probabilistische Dichtefunktion. Für die S-Welle wird aus Mangel an einem 3D S-Geschwindigkeitenmodell das P-Modell verwendet und ein v_p/v_s Verhältnis von 1,71 angesetzt.

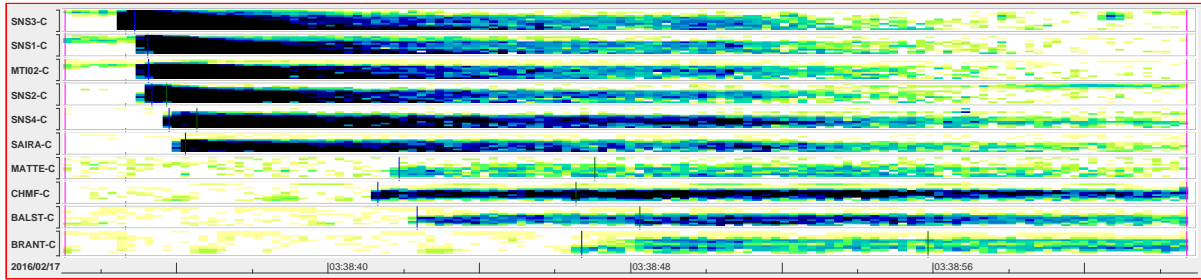
4.2.4 Lokalisierungs- und Magnitudengenauigkeit

Für die Vergleichbarkeit zwischen eigener Auswertung und Bulletininformationen soll im Folgenden zunächst exemplarisch ein Beispiel untersucht werden. Im Anschluß daran werden alle Lokalisierungen von Ereignissen aus der näheren Umgebung, die auch der SED lokalisiert hat, miteinander verglichen. Abschließend folgt eine Untersuchung der ermittelten Magnituden für Ereignisse die nach dem vollständigen Aufbau des Messnetzwerks auftraten.

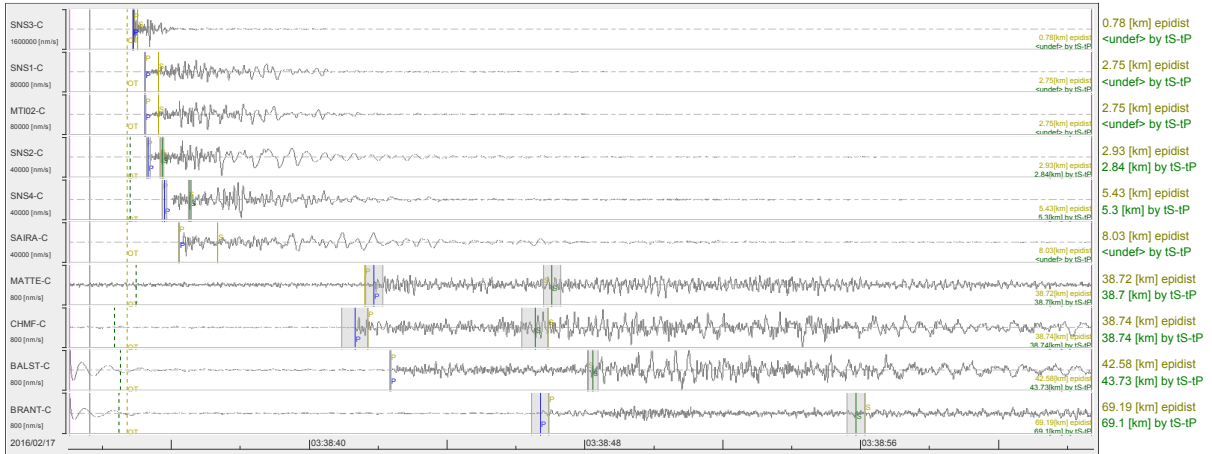
Das Monnat Ereignis

Am 17.2.16 ereignete sich das bislang stärkste, aufgezeichnete Ereignis in unmittelbarer Nähe (800 m zu SNS3, weniger als 3 km zu SNS1, MTI02 und SNS2) bei Monnat. Es wurde an fast allen Stationen registriert (nur BOURR lieferte in diesem Zeitraum keine Daten). An diesem soll im Folgenden exemplarisch die Genauigkeit der Auswertung diskutiert werden bevor diese in den folgenden Abschnitten statistisch untersucht wird. Abbildung 4.15 zeigt die Sonogramme (Abbildung 4.15(a)) der Vertikalspuren sowie deren Seismogramme (Abbildung 4.15(b)). Bei beiden sind die Phaseneinsätze gepickt, die P-Phase mit einem blauem Strich, die S-Phase mit einem grünem Strich markiert. Theoretische Herdzeiten sind durch t_s-t_p Kreise (nicht dargestellt) berechnet und als grün gestrichelte Linie dargestellt. Laufzeiten der theoretischen Phaseneinsatzzeiten, basierend auf dem gewählten Hypozentrum und Untergrundmodell, sind in gelb gezeigt. Die Herdzeit (gelb gestrichelt) basiert auf einer Referenzphase (hier P-Einsatz von SNS3-C als nächstes 3C Seismometer). Fehlerbereiche, die Abweichung von gewählter und theoretisch berechneter Einsatzzeit, sind in grau dargestellt. Diese werden für die probabilistische Lokalisierung

4.2. SEISMISCHES MONITORING



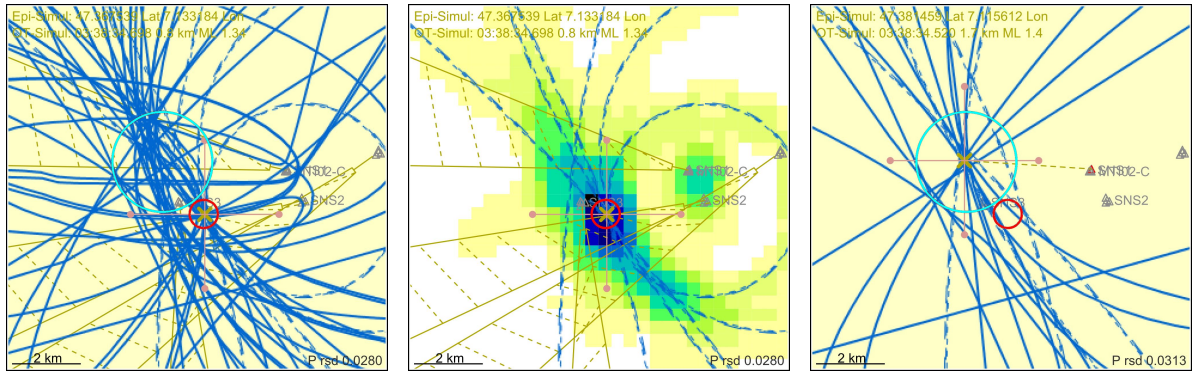
(a) Sonogramme der Vertikalspuren des Netzwerks mit Phasenpicks (p: blau, s: grün).



(b) Seismogramme der Vertikalspuren des Netzwerks individuell skaliert mit Phasenpicks und theoretischen Laufzeiten (grün gestrichelt: basierend auf $t_s - t_p$ Zeitdifferenzen, gelb gestrichelt: basierend auf gewähltem Hypozentrum) sowie Entfernung zum Sensor (rechts in gelb und grün). Teilweise gleiche Skalierung der Spuren (alle in (nm/s) SNS3: 1600000; SNS1 und MTI02: 80000; SNS2, SNS4 und SAIRA: 40000; andere: 800).

Abbildung 4.15: Stärkstes, unmittelbar nahes Ereignis zum Messnetzwerk vom 17.2.16 mit Magnitude $M_L = 1,9$ (SED, 2016).

in *NonLinLoc* verwendet. Am rechten Ende jeder Spur ist die berechnete Entfernung zwischen Station und Ereignis angezeigt, in grün und gelb berechnet entsprechend der oben beschriebenen Herdzeitberechnung. Die Abweichungen zur Lokalisierung des SED in den Phaseneinsatzzeiten betragen 20/1000, 34/1000 und 2/1000 Sekunden für MTI02, SAIRA und BALST, letztere entspricht einem Sample in der globalen Samplerate von 500 Hz. Für die Lokalisierung werden die individuellen Lösungsbeiträge ($t_p - t_p$ Hyperbeln, $t_s - t_p$ Kreise (beide blau) und Backazimuthbeams (gelb)) auf einem Tiefenschnitt dargestellt (Abbildung 4.16(a)). Die Tiefe kann variiert werden bis die beste Übereinstimmung zwischen den Schnittpunkten der genannten Lösungsbeiträge erzielt wird und die Abweichungen zwischen theoretischen und gewählten Phaseneinsatzzeiten möglichst klein ist. Mittels einer Patchmap (Abbildung 4.16(b)), welche die Anzahl der Lösungsbeiträge pro Fläche summiert darstellt, wird die Lösung ermittelt. Diese graphische Analogie zur „least squa-



(a) Lokalisierung (gelbes Kreuz) bei bester Übereinstimmung aller Lösungsbeiträge. (b) Patchmap der Hyperbolae-Lösungen, höhere Übereinstimmung bei dunklen Farben, Hyperbolen nicht dargestellt. (c) Limitierung der Auswertung auf die SED Daten mit denselben Hyper-Picks, anderer Tiefenschnitt.

Abbildung 4.16: Darstellung individueller Beiträge ($t_p - t_p$ Hyperbeln, $t_s - t_p$ Kreise und Backazimuthbeams) im Lösungsraum zur Lokalisierung, die beste Übereinstimmung ist deutlich in der Patchmap sichtbar, für die abgeschätzten Fehlerkreise siehe Text. Rechts ist die Lösung dargestellt die ohne SNS-Informationen ermittelt würde.

res Lösung“ bietet die Möglichkeit Nebenmaxima gezielt zu untersuchen und die optimale Lösung zu finden. Der Fehler kann über den Abstand der Schnittpunkte im Bereich der gewählten Lösung abgeschätzt werden. Abweichungen des Backazimuths (SNS1) sind hier bereits sichtbar und werden systematisch in Kapitel 4.2.4 untersucht. Limitiert man nun künstlich das Netzwerk auf die externen Breitbandstationen, welche der SED für seine Lokalisierung verwendet, so fällt auf, dass das Ereignis nun nordwestlich liegt (Abbildung 4.16(c)). Auch der Fehlerbereich zu anderen Häufungspunkten nahe der optimalen Lokalisierung wächst. Die Magnitude steigt leicht von $M_L = 1,34$ auf $M_L = 1,4$, die Tiefe wächst von $0,8 \text{ km}$ auf $1,7 \text{ km}$. Die jeweils anderen Fehlerkreise sind in beiden Abbildungen gezeigt, rot für das gesamte Netzwerk, cyan für die externen Stationen. Keine Lösungsbeitragshäufung ist in Abbildung 4.16(c) zu sehen für den Fehlerbereich aus Abbildung 4.16(a), dies begründet sich mit einem abweichenden Tiefenschnitt.

Die Differenz zwischen beiden Lokalisierungen beträgt 2 km , die Unterschiede in den Pickzeiten sind klein sowie die in der Magnitude vernachlässigbar (0,06). Den signifikantesten Unterschied zeigen die Tiefen ($0,8 \text{ km NSM}$ zu $1,7 \text{ km SED}$) mit entsprechend verschiedenen Tiefenschnitten in Abbildung 4.16. Letztlich wurde die *NSM* Lösung gewählt (dieses Ereignis liegt außerhalb des im weiteren diskutierten Betrachtungszeitraums), da durch die SNS mehr Daten sowie zusätzliche Informationen (Backazimuthbeams) zur Verfügung stehen.

Lokalisierungsgenauigkeit

Ereignisse: Für die weitergehende Betrachtung wird im Folgenden die Lokalisierungsgenauigkeit untersucht. Im Bereich 10 km um das Felslabor wurden seit Inbetriebnahme im Beobachtungszeitraum von April 2014 bis September 2015 des Messnetzwerks elf Ereignisse (Tabelle 4.2) seitens des SED gelistet. Dessen Lokalisierung beruht auf Daten des Regionalnetzes. Weiterhin liegt ein 3D Untergrundmodell für P-Geschwindigkeiten (Husen, 2003) zugrunde. Das Hypozentrum und die Fehlerellipse werden mit *NonLinLoc* bestimmt (Kapitel 4.2.3). Zum einen soll die Reduktion des Untergrundmodells auf 1D (Tabelle 4.3), wie es von *HypoLine* verarbeitet werden kann, untersucht werden, zum anderen die Limitierung der Regionalnetzstationen auf das Messnetzwerk (Tabelle 4.1) sowie

Bulletinlokalisierung										
#	date	time	(SED, 2016)				NSM			
			lat [°]	lon [°]	depth [km]	M _L	lat [°]	lon [°]	depth [km]	M _L
1	16.05.2014	04:21:39	47,47	7,19	10,4	2,1	47,4707	7,1859	9,0	1,7
2	31.05.2014	14:24:13	47,4	7,25	17,5	1,5	47,3253	7,2502	8,9	1,1
3	31.05.2014	15:44:55	47,4	7,26	17,3	0,9	47,3497	7,2667	13,1	0,5
4*	30.09.2014	17:27:15	47,3168	7,2019	17,9	1,1	47,2781	7,2018	13,8	0,8
5*	06.01.2015	23:31:21	47,334	7,0916	21,5	1,2	47,2903	7,1217	19,2	0,7
6	18.03.2015	15:03:28	47,365	7,161	7,0	1,5	47,3335	7,1726	2,0	1,1
7	11.06.2015	11:59:39	47,38	7,19	0,0	2,0	47,3299	7,172	0,6	1,1
8	14.07.2015	09:00:09	47,34	7,20	0,0	1,9	47,3297	7,1764	-0,3	1,2
9*	07.08.2015	05:12:13	47,3561	7,0515	6,2	1,7	47,3334	7,0647	4,7	1,1
10*	09.08.2015	12:31:21	47,3557	7,0546	6,1	1,6	47,3679	7,0541	5,4	1,0
11*	17.08.2015	23:31:45	47,3585	7,0452	3,7	0,8	47,3948	7,044	4,8	0,5

Tabelle 4.2: Absolutlokalisierung der Beben, die für die Untersuchung der Lokalisierungsgenauigkeit verwendet wurden. Ein * markiert Ereignisse für die detaillierte Ergebnisse vom SED (2016) mit Phaseneinsatzzeiten (GSE2 Dateien) zur Verfügung standen. Vergleich von *HypoLine* mit dem Bulletin des SED (2016).

später die Nutzung des vollständigen Messnetzwerkes.

In Abbildung 4.17 sind jene elf Ereignisse, die der SED lokalisiert hat, mit gelben Punkten dargestellt (Regionalnetzdaten, 3D Untergrundmodell, *NonLinLoc*). Soweit zum 1.6.2016 öffentlich verfügbar, wurden aus den Lokalisierungsdaten des (SED, 2016) (GSE2 Dateien) Phaseneinsätze und Fehlerellipsen (gelb) extrahiert. Erneut wurde die Lokalisierung in *NonLinLoc* mit den Phaseneinsatzzeiten der SED-Stationen (Tabelle 4.1) und einem 1D Untergrundmodell durchgeführt. Dessen Ergebnisse (Tabelle 4.4) sind die grauen Punkte (probabilistisches Maximum) sowie das 68% Konfidenzintervall (gelbe Punktwolken). Tabelle 4.5 (2. Spalte) zeigt die Abweichungen zwischen beiden Lokalisierungen. Diese Abweichungen beträgt maximal 4,6 km, im Durchschnitt etwa 3 km. Insgesamt lässt sich die größte Abweichung in NNW-SSO Richtung feststellen, die Fehlerbereiche sind überlappend. In der Tiefe liegen die Ereignisse, die der SED mit *NonLinLoc* erhält, im

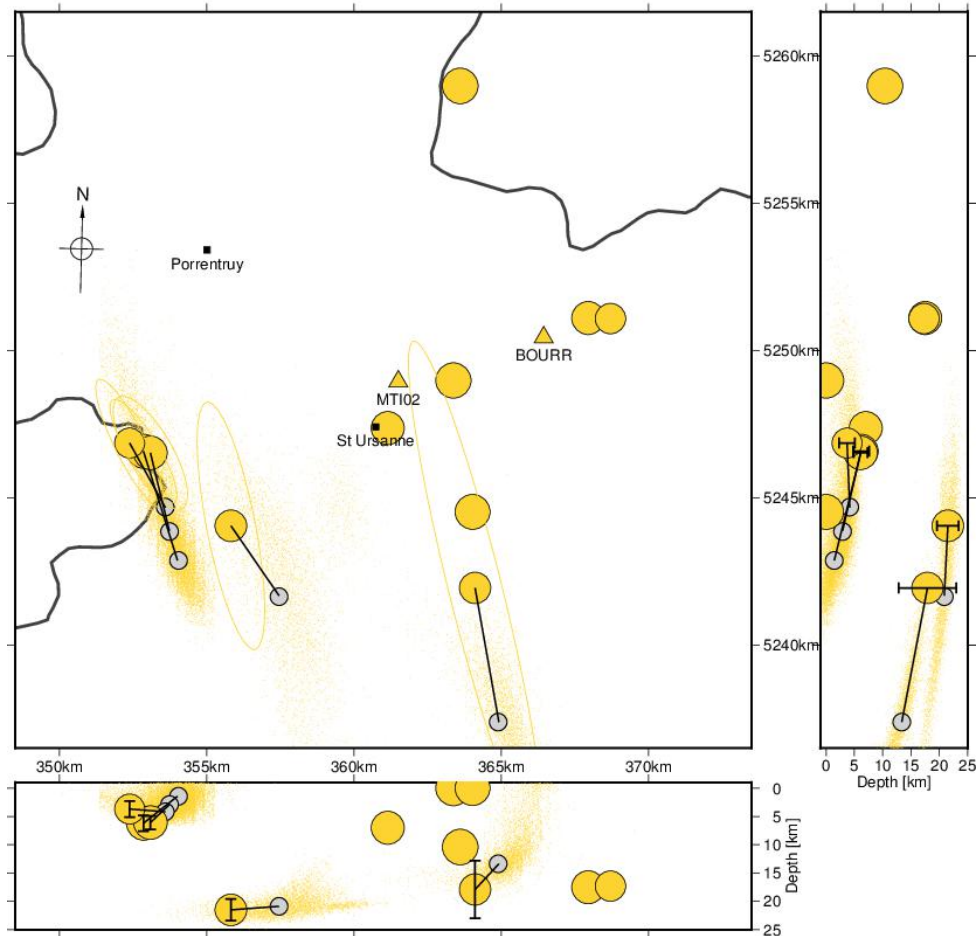


Abbildung 4.17: Kartenansicht mit Tiefenschnitten der vom SED (2016) lokalisierten Ereignisse (gelbe Punkte), mit Fehlerellipsen bzw. -balken der Auswertungsperiode. Zusätzlich die Lokalisierung mit den selben Phaseinsatzzeiten in *NonLinLoc*, reduziert auf das Messnetzwerk und 1D Untergrundmodell, jeweils verknüpft durch schwarze Linien, Details siehe Text.

Durchschnitt $2,5\text{ km}$ tiefer als mit *NonLinLoc* und den genannten Einschränkungen.

Abbildung 4.18 zeigt erneut die Lokalisierungen des SED als gelbe Punkte mit Fehlerellipsen (in gelb). Zusätzlich sind die Absolutlokalisierungen aus *HypoLine* als rote Punkte dargestellt. Deren Fehler werden, wie im Beispiereignis gezeigt, abgeschätzt (rote Kreise). Die Ergebnisse aus *NonLinLoc* (graue Punkte, rote Punktwolke) basieren für diese Abbildung auf den Picks und deren Fehler aus *HypoLine* für das Messnetzwerk. Für das nördliche Ereignis stimmen alle Lösungen sehr gut überein. Überwiegend sind die Lösungen im Rahmen ihrer Fehler gleich. Die lateralen Unterschiede zwischen SED- und *NSM*-Lösungen sind größer als die zwischen *NSM* und *NonLinLoc* (Spalten #1 und #3 Tabelle 4.5). Insgesamt kann die Abweichung zwischen *HypoLine* und SED bis zu $8,3\text{ km}$ betragen, im Durchschnitt etwa 4 km , zwischen *NonLinLoc* und *HypoLine* sind es maximal

4.2. SEISMISCHES MONITORING

3,3 km, im Durchschnitt etwa 1,3 km (Tabelle 4.5). *NSM* Epizentren liegen tendenziell eher südlicher als die *SED* Lokalisierungen, im Westen oder im Beispiereignis jedoch auch nördlicher. Auffällig sind die vergleichsweise großen Abweichungen in Nord-Süd-Richtung im Vergleich zu Ost-West sowohl bei den Ereignisvergleichen als auch bei den Punktwolken und Fehlerellipsen. In der Tiefe sind die *NonLinLoc* (1D Modell) Ergebnisse die flachsten, im Durchschnitt sind die *NonLinLoc* (3D Modell) Lokalisierungen des *SEDs* 2,5 km, die mit *NSM* erhaltenen Lokalisierungen 0,25 km tiefer, jeweils im Bezug auf das 1D Modell.

Abbildung 4.19 zeigt die *NonLinLoc* Ergebnisse mit 1D Modell im direkten Vergleich.

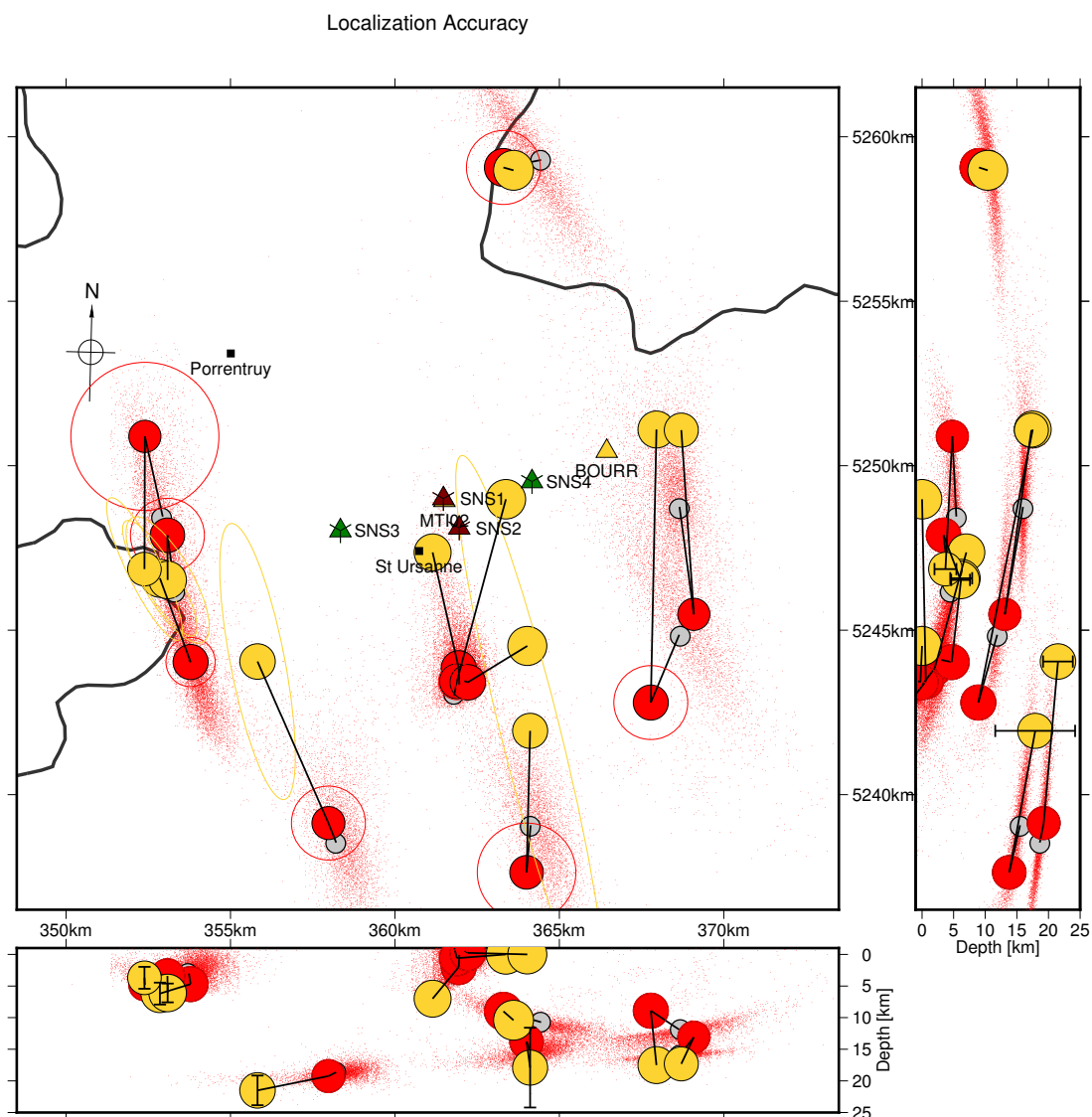


Abbildung 4.18: Absolutlokalisierungen mit *HypoLine* (rote Punkte) und Fehler (Kreise), probabilistische Lokalisierung (graue Punkte) und Fehlerbereich (gepunktet) und Lokalisierungen des *SED* (gelbe Punkte) mit Fehlerellipsen.

Die Punktwolken überschneiden sich deutlich. Die Abweichungen zwischen den Lokalisierungen des SED (Regionalnetz, 3D Untergrundmodell) und *NSM* (Messnetzwerk, 1D Untergrundmodell) sind im Wesentlichen in der Tiefe und in Nord-Süd-Richtung. Diese ist hauptsächlich der Stationsgeometrie zuzuschreiben, da das Untergrundmodell eine Auflösung von $15 \times 15 \text{ km}^2$ lateral und $2 - 3 \text{ km}$ in der Tiefe hat (oberhalb 10 km , Husen (2003)) sind Variationen im betrachteten Bereich ($20 \times 20 \text{ km}^2$) marginal. Die azimuthale Abdeckung hat sich mit der Inbetriebnahme von SNS3 und SNS4 verbessert. Letztere verbessern zusätzlich die Qualität und Stabilität der Lösung, da die angewendete Jackknifing-Methode robuster gegenüber Ausreißern wird.

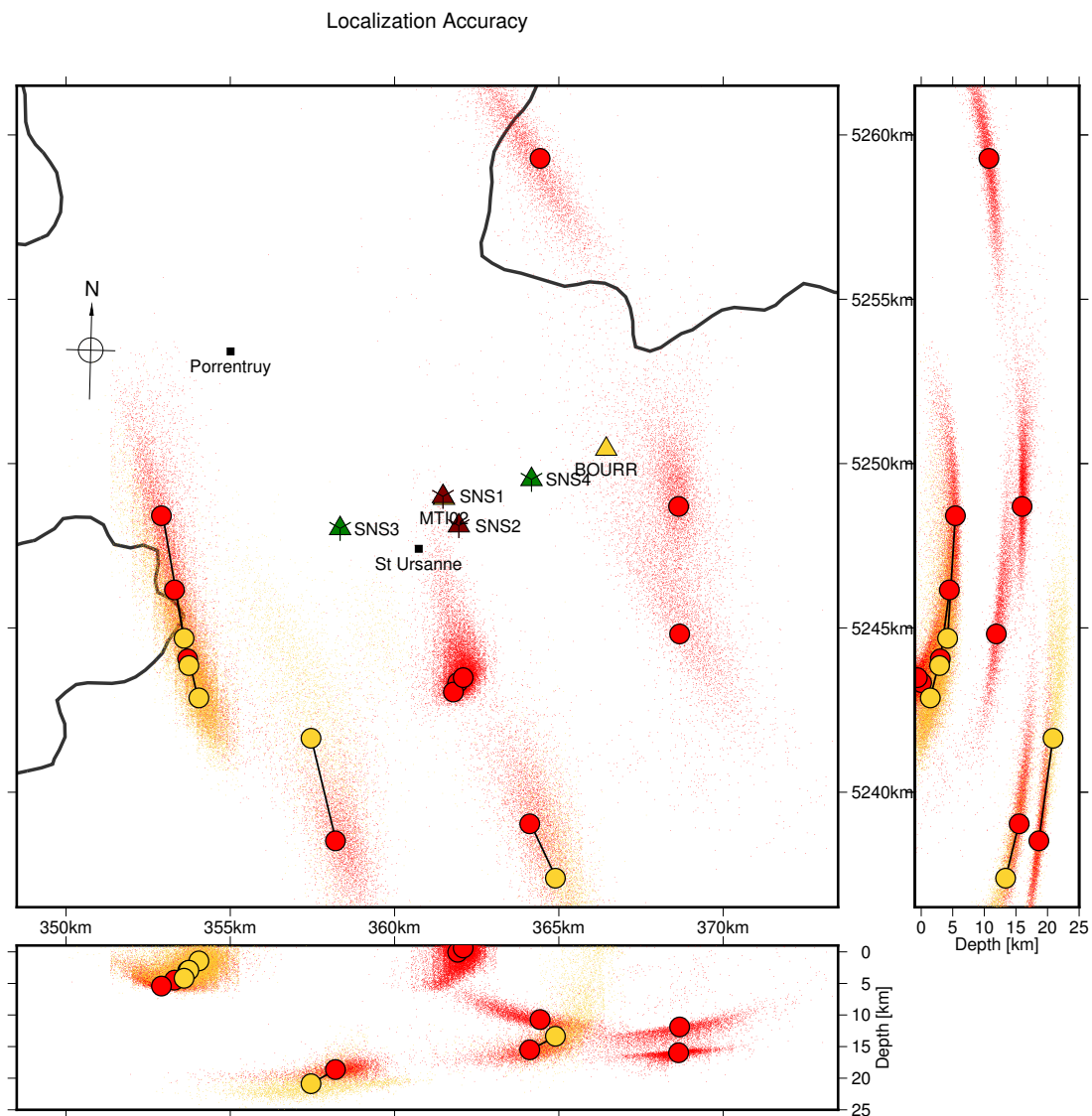


Abbildung 4.19: Probabilistische Auswertungen im Vergleich: Picks aus *HypoLine* (rote Punkte) und Picks vom SED (gelbe Punkte).

Tiefe [km]	-5,0	0,0	2,0	5,0	8,0	13,0	22,0	30,0	40,0	50,0	60,0
v_p [km/s]	5,38	5,53	5,80	5,83	5,95	5,96	6,53	7,18	7,53	7,83	8,15

Tabelle 4.3: Verwendetes Tiefenmodell nach Husen (2003).

<i>NonLinLoc</i>								
#	date	time	SED			NSM		
			lat [°]	lon [°]	depth [km]	lat [°]	lon [°]	depth [km]
1	16.05.2014	04:21:39				47,473	7,201	10,72
2	31.05.2014	14:24:13				47,344	7,261	11,89
3	31.05.2014	15:44:55				47,379	7,26	15,97
4*	30.09.2014	17:27:15	47,276	7,214	13,36	47,291	7,203	15,51
5*	06.01.2015	23:31:21	47,313	7,114	20,88	47,285	7,125	18,63
6	18.03.2015	15:03:28				47,329	7,173	0,08
7	11.06.2015	11:59:39				47,326	7,171	-1,12
8	14.07.2015	09:00:09				47,33	7,175	-0,61
9*	07.08.2015	05:12:13	47,323	7,068	1,44	47,334	7,064	3,03
10*	09.08.2015	12:31:21	47,332	7,064	2,91	47,352	7,058	4,47
11*	17.08.2015	23:31:45	47,339	7,062	4,18	47,373	7,052	5,42

Tabelle 4.4: Beben die für die Untersuchung der Lokalisierungsgenauigkeit verwendet wurden. * markieren Ereignisse für die GSE2 Dateien zu Verfügung standen. Ergebnisse, berechnet mit *NonLinLoc*, basierend auf GSE2 Files SED (2016) bzw. *HypoLine* Phasenpicks mit 1D Untergrundmodell.

	Lateral			Tiefe		
	SED- NSM	SED- NLL	NSM- NLL	SED- NSM	SED- NLL	NSM- NLL
	#1	#2	#3	#1	#2	#3
Durchschnitt	3,95	3,33	1,29	2,39	2,53	-0,25
Minimum	0,32	2,51	0,09	-1,10	-0,48	-2,99
Maximum	8,31	4,63	3,30	8,60	4,76	1,92

Tabelle 4.5: Abweichungen (alle in *km*) zwischen unterschiedlichen Lokalisierungen der selben 11 Ereignisse. Spalten #1: SED (3D *NonLinLoc*) und NSM (*HypoLine*), Spalten #2 SED (3D *NLL*) und SED (1D *NonLinLoc*) eingeschränkt auf unser Messnetzwerk und Spalten #3: NSM (*HypoLine*) und NSM (1D *NonLinLoc*).

Sprengungen: In der Umgebung existieren mehrere Steinbrüche. Durch den Abgleich von Sprengprotokollen (persönliche Kommunikation T. Theurillat 13.3.2017) mit der vorläufigen Ereignisliste können für jeden Steinbruch die Lokalisierungsfehler bewertet werden. Abbildung 4.20 zeigt die Lokalisierungen und die Verbindung (schwarze Linien) zum Ort des verursachenden Steinbruchs (gelbes Quadrat). In Tabelle 4.6 sind die Abweichun-

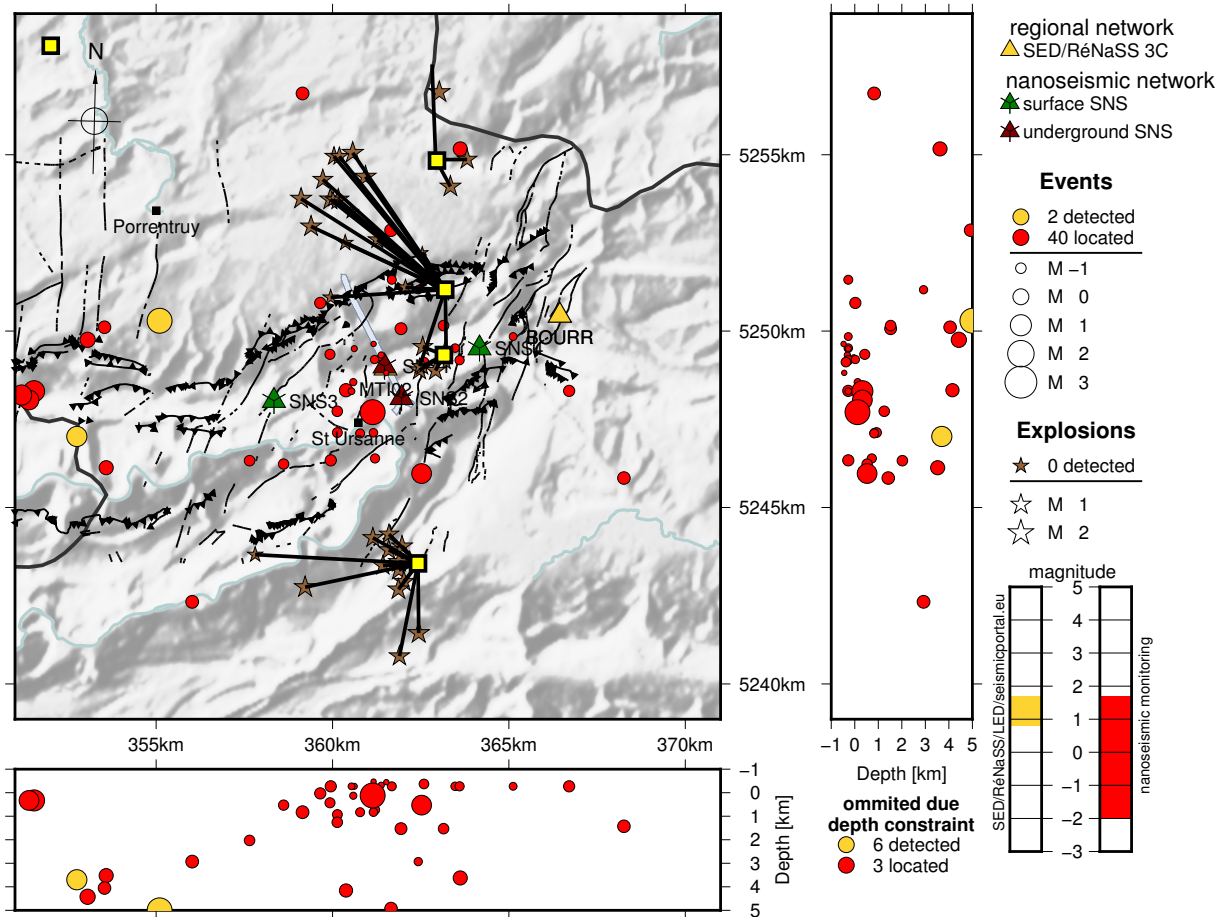


Abbildung 4.20: Sprengungen (braune Sterne) und ihre bestätigten Steinbrüche (von Norden nach Süden mit Ereignisanzahl: Décharge (0), Miécourt (3), Malcôte (18), Les Grangettes (4), Glovelier(14)), basierend auf SNS und externen Daten.

gen zusammengefasst. Die durchschnittliche Abweichung beträgt mit $2,33 \text{ km}$ lateral etwa die Hälfte der bisher diskutierten Fehler. Die Abweichungen zu den SED Lokalisierungen betragen 4 km im Durchschnitt (siehe Abschnitt 4.2.4). In der Tiefenbestimmung sind die durchschnittlichen Fehler gleich (Les Grangettes) oder geringer.

	Malcôte		Les Grangettes		Miécourt		Glovelier	
	xy	z	xy	z	xy	z	xy	z
Durchschnitt	3,51	1,93	0,66	0,05	1,48	2,37	1,48	1,94
Maximum	4,92	5,4	0,81	0,6	2,70	4,1	4,61	7,2
Minimum	1,13	-0,4	0,50	-0,7	0,87	0,8	0,24	-0,2
Anzahl	18		4		3		14	

Tabelle 4.6: Abweichungen (alle in *km*) zwischen den Lokalisierungen von Sprengungen und ihrem verursachenden Steinbruch, lateral und in der Tiefe.

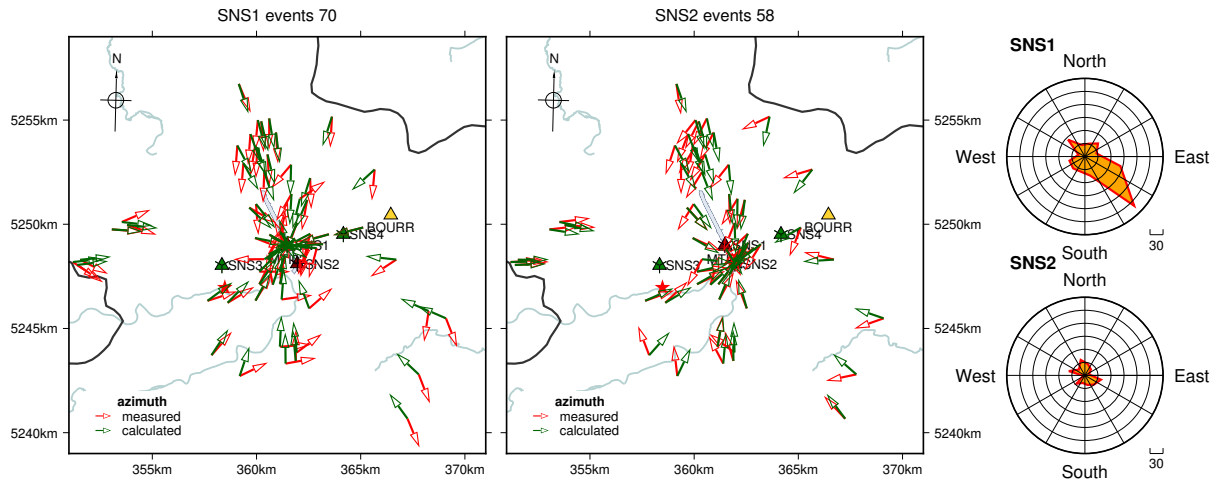
Backazimuthfehler von SNS1

Bei der Lokalisierung des Monnatereignisses (Abbildung 4.16) sowie der Vergleichsbeben (Backazimuth nicht dargestellt) fällt auf, dass der Beam von SNS1 mitunter stark vom erwarteten Azimuth abweicht. Mögliche Fehlerquellen wie Kabelkonfiguration bzw. -kanäle, Instrumentenfehler, Softwareparameter und -einstellungen oder Auswertefehler wurden mehrfach überprüft, z.B. durch künstlich erzeugte Referenzsignale im Tunnel oder Stimulation einzelner fraglicher Seismometer. Daher wird für alle lokalisierten Ereignisse der Backazimuth im Folgenden systematisch untersucht, indem der Azimuth zwischen SNS1 und Lokalisierung berechnet wird. Dargestellt werden diese theoretischen Backazimuthe als Pfeile, die an den Ort der Lokalisierung verschoben werden und dabei in Gegenrichtung zeigen (grüne Pfeile in den Karten von Abbildung 4.21). Eine Darstellung am SNS selbst, an dem sie berechnet werden, wäre zu unübersichtlich. Zusätzlich ist der gemessene Azimuth dargestellt (rote Pfeile, ebenfalls in Gegenrichtung am Ereignisort). Der Absolutwert der Differenz von theoretischem und ermitteltem Azimuth wird für jedes Ereignis errechnet. Diese werden dann in 30° bins, bezogen auf die theoretischen Azimuthe, gemittelt und rechts in Abbildung 4.21 exemplarisch, sowie in Tabelle 4.7 für alle Lokalisierungen gezeigt. Dabei fällt auf, dass SNS1 in Südost Richtung überdurchschnittlich

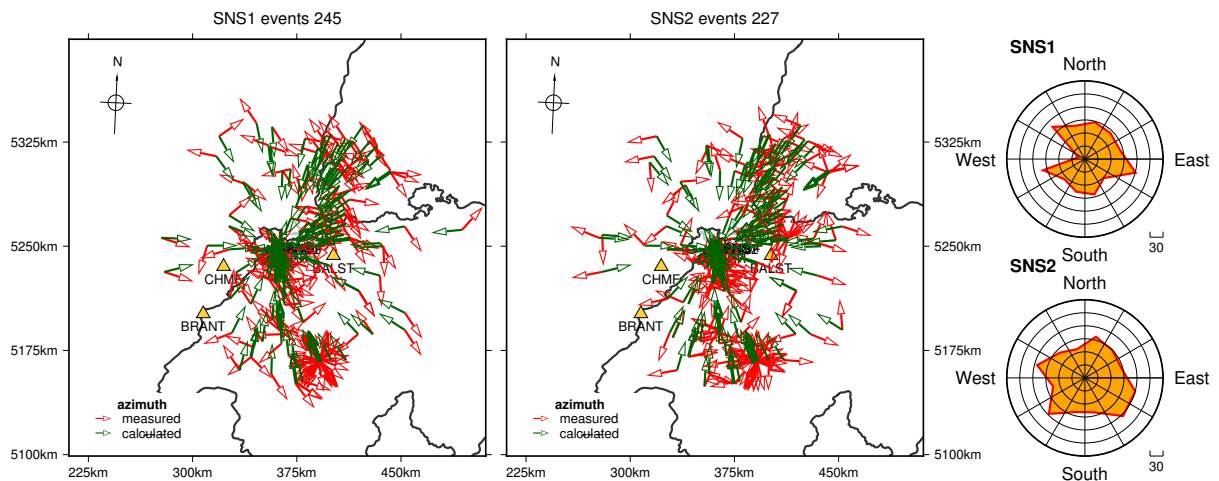
Azimuth [°]	15	45	75	105	135	165	195	225	255	285	315	345
Abweichung [°]	27	32	25	78	102	70	62	52	29	20	27	27
Anzahl	15	5	7	8	5	10	27	6	6	9	8	13

Tabelle 4.7: Durchschnittlicher Betrag der azimuthalen Abweichung pro 30° bin für lokalisierte Ereignisse von SNS1.

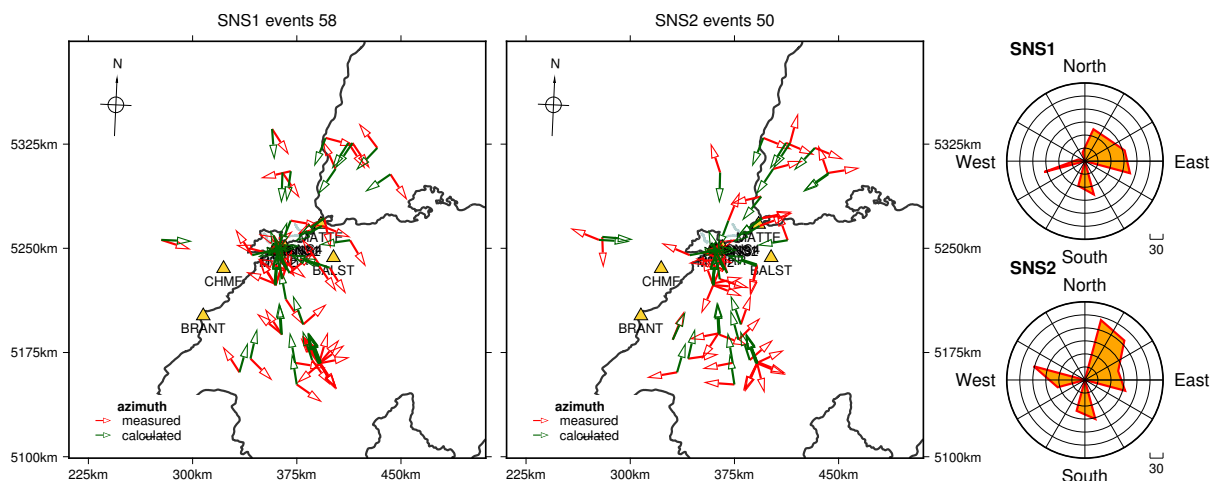
hohe Abweichungen aufweist. Zusätzlich wurde für alle Detektionen eine automatische Backazimuthbestimmung durch Fisherkorrelation nach Sick (2016) durchgeführt (Abbildung 4.21(b)). Der ermittelte durchschnittliche Fehler ist für beide SNS hoch und eine Vorzugsrichtung lässt sich hier nicht feststellen. Daher wurden in Abbildung 4.21(c) die



(a) Alle lokalisierten Ereignisse mit weniger als 10 km Entfernung. SNS1 zeigt überdurchschnittliche Fehler in Südost Richtung.



(b) Alle detektierten Ereignisse mit weniger als 150 km Entfernung.



(c) Alle detektierten Ereignisse mit sehr guter Signalqualität mit weniger als 150 km Entfernung.

Abbildung 4.21: Backazimuth an der Position der jeweiligen Ereignisse. In grün: theoretisch, in rot: gemessen. Jeweils einzeln für SNS 1 und 2. Rosendiagramm: Durchschnittliche Abweichung pro 30°bin.

detektierten Ereignisse auf die der höchsten Qualitätsklasse reduziert. Hier lassen sich drei Vorzugsrichtungen für Fehler erkennen, der Vergleich mit SNS2 zeigt jedoch, dass dieses eine ähnliche Fehlerverteilung zeigt. Die Gründe dafür liegen zum einen in der Verwendung der Fisherkorrelation, welche bessere Ergebnisse erzielt mit steigender Zahl der verfügbaren Seismometer. Die verfügbaren Kleinarrays (vier Seismometer) schneiden hier deutlich schlechter ab, als die in der Studie von Sick (2016) verwendeten zehn Seismometer. Zum anderen ist die Anzahl an Ereignissen in Süd-Östlicher-Richtung mit hoher Qualität sehr gering. Die Lokalisierungsgenauigkeit des SED spielt hier keine Rolle, speziell bei den weiter entfernten Ereignissen. Im Folgenden beschränkt sich die Diskussion daher auf die Abweichung der lokalisierten Ereignisse. Diese sind in Abbildung 4.22 im Vergleich mit SNS2 (Symbole) für verschiedene Distanzbereiche (Farben) gezeigt. SNS3, 4 und 5 sind auf Grund der kurzen Aufzeichnungsdauer und der entsprechend geringen Anzahl von Ereignissen (12, 1 und 3) nicht berücksichtigt. Auf mehreren Entfernungsstufen zeigt lediglich

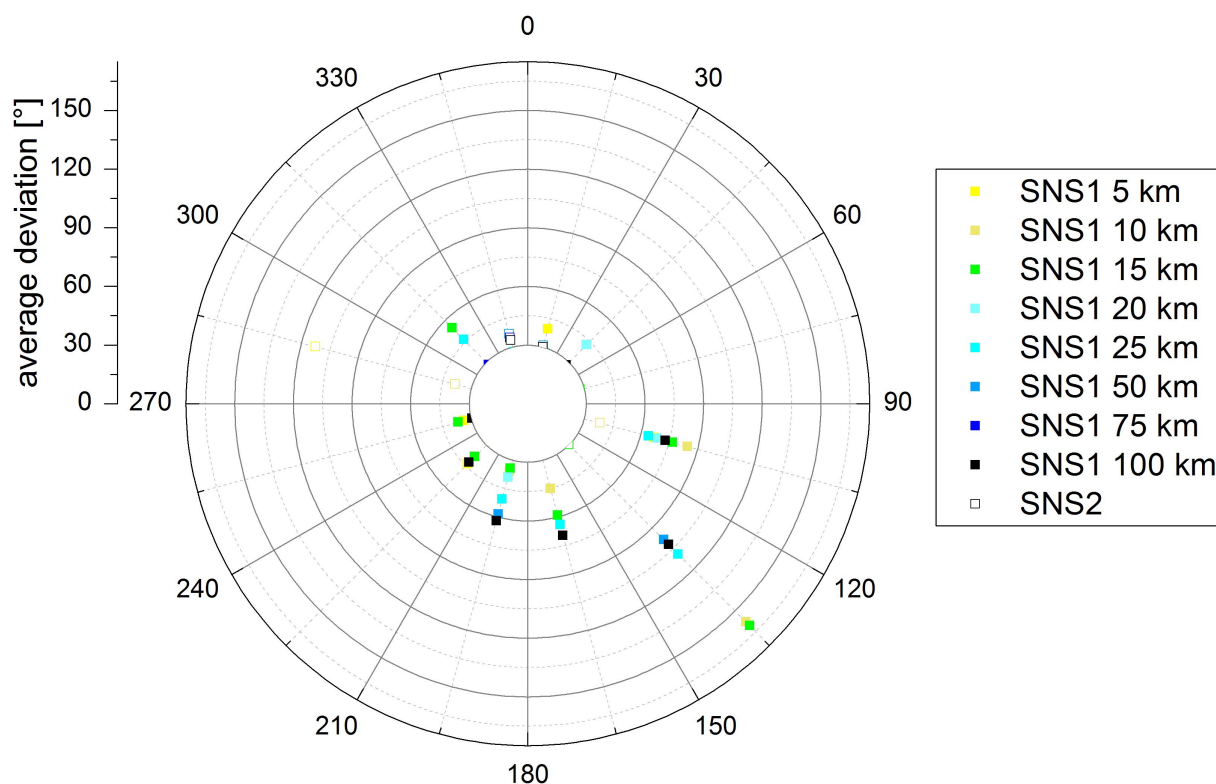


Abbildung 4.22: Alle durchschnittlichen Abweichungen pro 30° bin pro SNS (Symbole) und Entfernung (Farbe). Abweichungen werden erst ab 30° gezeigt. Nur SNS1 zeigt für eine Richtung starke Abweichungen.

SNS1 größere Abweichungen von bis zu 160° in Süd-Östlicher-Richtung. Diese steigen bei Azimuth 135° wie in Tabelle 4.8 gezeigt an und fallen ab 50 km wieder ab und verbleiben dort allerdings auf einem hohen Wert. Die benachbarten Bins verhalten sich ähnlich, bei

Entfernung [km]	10	25	50	75
Abweichung [°]	160,652	108,937	98,5345	102,059
Anzahl der Ereignisse	2	3	4	5

Tabelle 4.8: Durchschnittliche Abweichung bei 135° für SNS1.

etwas geringerer Abweichung jedoch höherer Ereignisanzahl (105°: 78°/8 Ereignisse, 165°: 70°/10 Ereignisse). Hinweise eines ähnlichen Missleads wurden bei einer Messkampagne der On-Site Inspection Division der Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty Organisation von Frank Stier im Rahmen eines Praktikums gemacht. Dabei beobachtete er, dass durch Aushub verursachte Hohlräume in Minen den Beam eines SNS ab- bzw. umlenken können (persönliche Kommunikation Ende 2007). Dieses Phänomen wurde jedoch auf Grund des Endes seines Praktikums nicht weiter untersucht. In Mont Terri existieren ge-

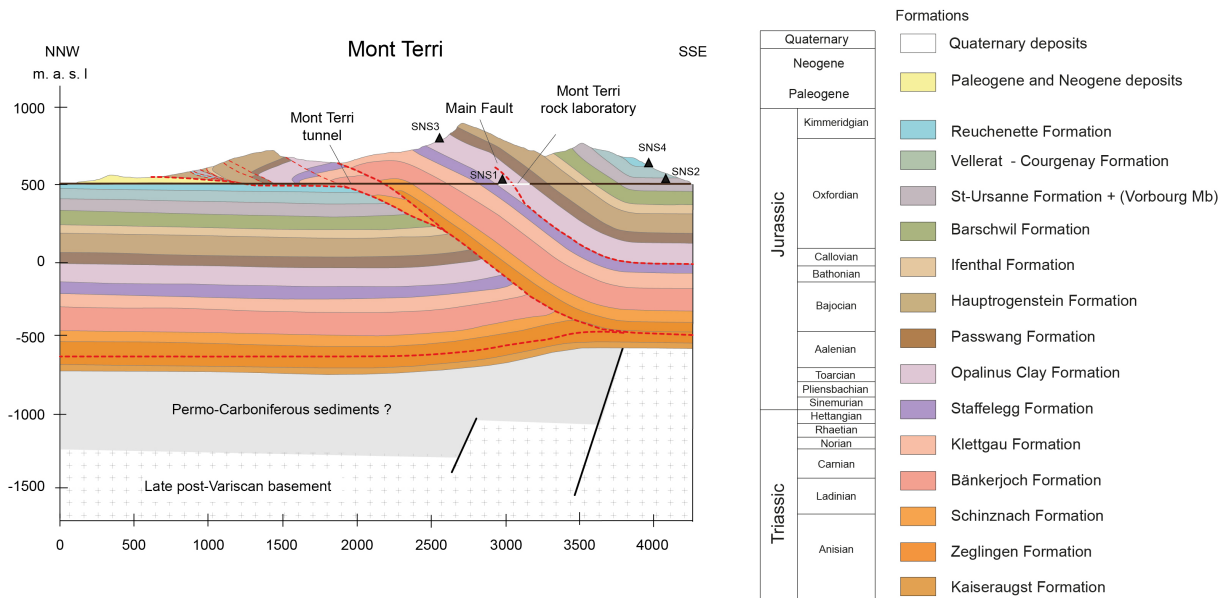


Abbildung 4.23: Standorte der unterirdischen SNS im geologischen Querschnitt. Die Standorte der oberirdischen Stationen wurden in die Schnittebene projiziert (persönliche Kommunikation C. Nussbaum 30.08.2016).

nügend große Hohlräume nicht. Jedoch fällt auf, dass die Schichtungsneigung bei SNS1 in die selbe Richtung zeigt, wie der Effekt der Missweisung (157,5° SSE). Dies ist ersichtlich auf einem Ausschnitt des Querschnitts von Abbildung 4.4, auf dem in Abbildung 4.23 die Standorte der SNS dargestellt sind. Eine verspätete Ankunft von Wellenenergie mit „richtigem“ Backazimuth konnte für einzelne, stärkere Ereignisse nachgewiesen werden. Für Signale aus der „Gegenrichtung“ und für SNS2, blieb dieser Effekt unbeobachtet. Eine Bestimmung der seismischen Wellengeschwindigkeit wurde lediglich im Felslabor für

den Opalinuston durchgeführt Bock (2008), für die anderen in Abbildung 4.23 gezeigten Schichten existieren keine lokalen Messwerte. Diese Geschwindigkeiten können jedoch je nach Orientierung (parallel oder senkrecht zur Schichtung), sowie abhängig vom Wassergehalt (1 – 9%), schon zwischen wenigen 100 m/s und 6000 m/s variieren Jaeggi et al. (2014). Weitere Untersuchungen, die über diese Arbeit hinausgehen, sind nötig um diesen Effekt vollständig zu beschreiben. Daher wurde bei der interaktiven grafischen Lokalisierung dieser Effekt bei der Ereignisauswertung richtungsabhängig berücksichtigt und gegebenenfalls auf den Beam von SNS verzichtet.

Magnitudendiskussion

Die Magnituden der Vergleichsbeben zwischen SED und *NSM* weichen im Schnitt um eine halbe Magnitude ab, wobei die vom SED ermittelten größer sind. Der Unterschied, verursacht durch Abweichungen in der Lokalisierung ist minimal, wie das Beispielergebnis (Kapitel 4.2.4) zeigt. Im Folgenden sollen daher die verschiedenen Berechnungsvorschriften für die Lokalmagnitude diskutiert werden. Alle wurden von Richter (1935) abgeleitet, der sie definierte als: “the magnitude of any shock is taken as the logarithm of the maximum trace amplitude, expressed in microns, with which the standard short-period torsion seismometer ($T_0 = 0,8 s$, $V = 2800 V s/m$, $h = 0,8$) would register for that shock at an epicentral distance of 100 km ” d.h. die Magnitude als Logarithmus der Maximalamplitude in Mikrometer auf dem Standardinstrument seiner Zeit (Wood-Anderson) geeicht auf einen Referenzwert in 100 km Entfernung. Im Folgenden sollen die bisher verwendeten Definitionen von SED (Kradolfer, 1984) und *HypoLine* (Wust-Bloch und Joswig, 2006) mit der vom LED Stange (2006) verglichen werden. Alle verwenden das Maximum einer Wood-Anderson Simulation der Horizontalspuren. Der LED verwendet dafür den Durchschnitt beider Horizontalspuren, der SED den Maximalausschlag (zero-to-peak), während *HypoLine* den halben maximalen Wellenzug (peak-to-peak) verwendet. Zusätzlich zu den Unterschieden in der Bestimmung des Maximalausschlags entstehen Abweichungen durch die Entfernungskorrekturen, die Ereignisse, welche nicht in der Referenzdistanz von 100 km auftreten, abbilden. Normalerweise wird diese Korrektur durch eine lineare Beziehung als $\log(\text{Entfernung})$ realisiert, wie z.B. beim LED in Gleichung 4.1 und *HypoLine* in den Gleichungen 4.4 – 4.6. Der SED (Gleichungen 4.2 und 4.3) hingegen wählt eine direkte Abhängigkeit der Entfernung, was zu einer nicht-linearen Kurve in Abbildung 4.24 führt.

LED

$$M_L = \log_{10}(A[mm]) + (1,11 \pm 0,1) \log_{10}(D[km]) + (0,95 \pm 0,2) * 10^{-3} D[km] + (0,69 \pm 0,05) \quad (4.1)$$

SED

$$M_L = \log_{10}(A[mm]) + 0,0180 * D[km] + 1,77 \quad \text{für } D \leq 60km \quad (4.2)$$

$$M_L = \log_{10}(A[mm]) + 0,0038 * D[km] + 2,62 \quad \text{für } D > 60km \quad (4.3)$$

HypoLine

$$M_L = \log_{10}(A[mm]) + 1 * \log_{10}(D[km]) + 0,25 \quad \text{für } D \leq 3km \quad (4.4)$$

$$M_L = \log_{10}(A[mm]) + 1,5 * \log_{10}(D[km]) \quad \text{für } D \leq 100km \quad (4.5)$$

$$M_L = \log_{10}(A[mm]) + 2,56 * \log_{10}(D[km]) - 2,12 \quad \text{für } D > 100km \quad (4.6)$$

Wie Abbildung 4.24 zeigt, stimmen diese Definitionen nur für bestimmte Entfernungsbereiche überein. Wust-Bloch und Joswig (2006) zeigen, dass für eine lineare Kurve, in einer Darstellung wie Abbildung 4.24, die Steigung angepasst werden muss, um im Nahbereich, für die Amplitudendämpfung eines Ereignisses für verschiedene Entfernungen, in der selben Magnitude zu resultieren. Diese Knicke wurden in 100 km und 3 km Entfer-

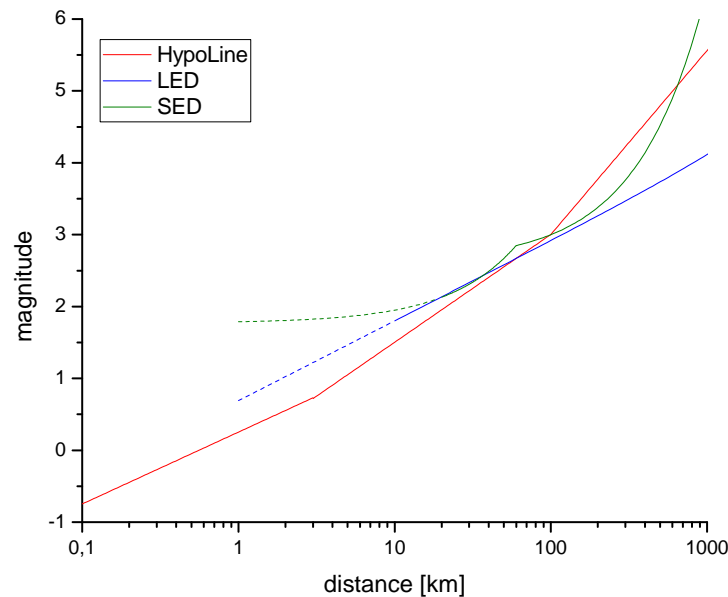


Abbildung 4.24: Entfernungskorrekturkurven für *HypoLine* (Wust-Bloch und Joswig, 2006), *SED* (Kradolfer, 1984) und *LED* Stange (2006).

nung eingeführt, letzterer ist entscheidend für die Ereignisse in Mont Terri. LED und SED passten ihre Entfernungskorrekturkurven den Gegebenheiten ihrer Überwachungsgebiete und den Wellenpfaden der Lokal- bzw. Regionalüberwachung in SW Deutschland oder der Schweiz mit Entfernungen von 20 – 200 km an. Die in Abbildung 4.24 angedeutete Extrapolation hin zu kleinen Entfernungen würde in Abweichungen von einer halben Magnitude (LED) bis hin zu mehreren Magnituden (SED) führen. Daher werden vom SED Stationen in Herdnähe von unter 20 km nicht für die Magnitudenbestimmung genutzt. Die Übereinstimmung für den Bereich 20 – 200 km soll im Folgenden diskutiert werden.

Abbildung 4.25 zeigt für verschiedene Beben im September 2015 (Netzwerk vollständig ausgebaut) die Bestimmung der Magnitude. Ein Auswahlkriterium war, dass SED-Netzwerkstationen seitens des SEDs für die Bestimmung der Magnitude berücksichtigt wurden. Die Lokalisierung des SED wurde in *HypoLine* übernommen und die Magnitude für jede Station des Netzwerks bestimmt. Diese sind über die Entfernung zum Epizentrum aufgetragen (Quadrate), zusätzlich zu den GSE2 Informationen des SED (Kreise). Die einzelnen Stationen sind farblich gruppiert, so sind die unterirdischen rötlich, die oberirdischen grünlich, sowie die des SED bläulich gehalten. Die Kurven geben die Magnitudenentfernungskorrekturkurven wieder, deren bester Fit zu den Messwerten die Magnitude bestimmt. In rot, die mittels *NSM* ermittelte, in blau die des SED, sowie in cyan die ausschließlich mit den SED-Netzwerkstationen berechnete Magnitudenentfernungskorrekturkurve. Tabelle 4.9 listet alle bestimmten Magnituden und durchschnittlichen Abweichungen auf.

Die Reduktion der SED Stationen auf das Messnetzwerk haben nur geringe Auswirkungen auf die für das jeweilige Beben bestimmte Magnitude. Die vom SED ermittelte Magnitude ist im Durchschnitt um 0,33 größer als die *NSM* Magnitude. Als Abweichung ergeben sich im Einzelnen für die SED Stationen MTI02 (0,34), BOURR (0,14), BALST (0,25), MATTE (0,13) und CHMF (0,3). Die verwendeten Beben traten in Entfernungen von 15 – 115 km zu SNS1 auf. Für die als Referenzereignisse (Kapitel 4.2.4, Tabelle 4.2) verwendeten Ereignisse mit Entfernungen <10 km, sowie Lokalisierung in *HypoLine* sind die Magnitudenunterschiede durchschnittlich 0,52. Die in Abbildung 4.24 gezeigten Kurven von SED und *NSM* haben im Bereich 20 – 200 km eine Abweichung von -0,4 bis +0,2. Folglich sind die in Tabelle 4.9 ermittelten Fehler im Rahmen der unterschiedlichen Magnitudenberechnungen. Bei den Vergleichsbeben kommen zusätzlich noch leicht unterschiedliche Lokalisierungen hinzu, die zum Magnitudenunterschied beitragen. Vouillamoz (2015) bestätigt die Eignung der Entfernungskorrekturkurven nach Wust-Bloch und Joswig (2006) für schwache Ereignisse und kleine Distanzen. Eine umfassende Diskussion der Lokalmagnitude ist dort gegeben.

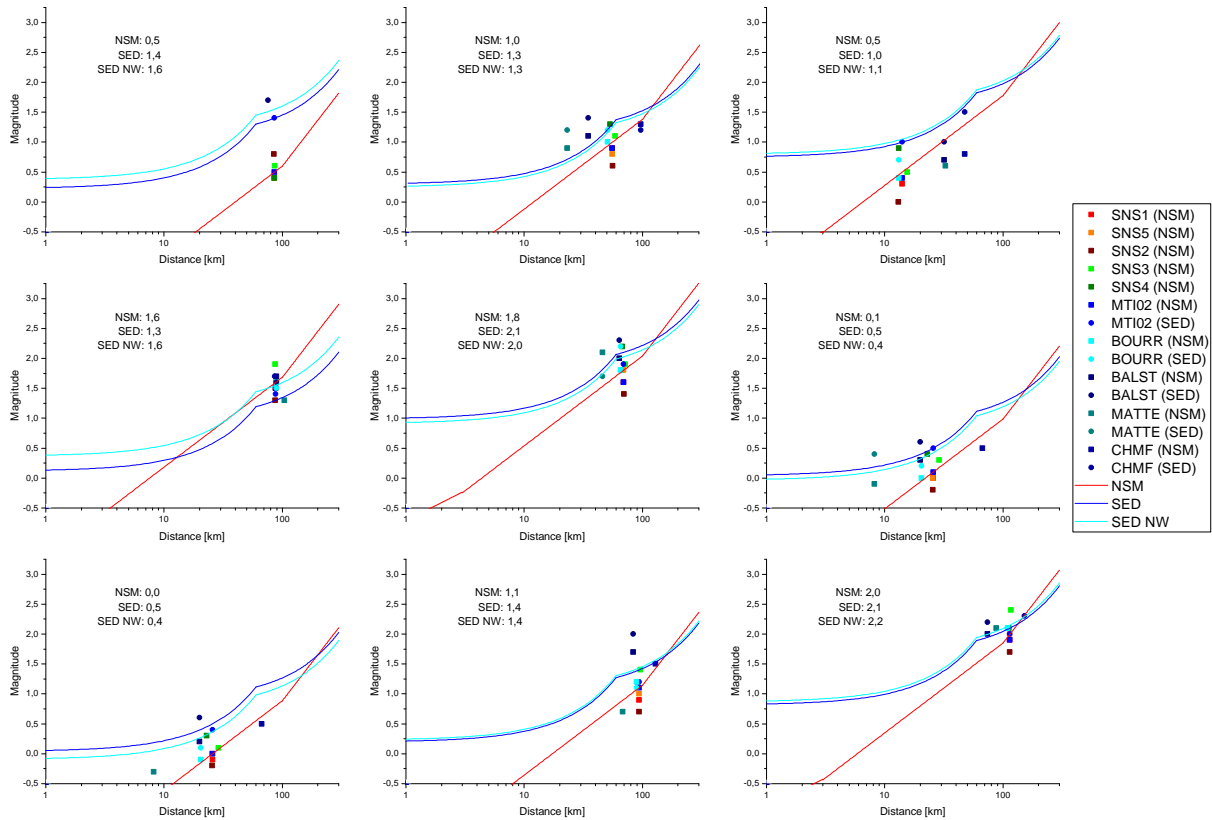


Abbildung 4.25: Magnituden aller Stationen für ausgewählte nahe Beben im September 2015, Quadrate mittels *NSM* ermittelt, Kreise vom *SED* übernommen.

Ereignis			<i>NSM</i>	<i>SED</i>	<i>SED</i>	<i>NSM-</i>	<i>NSM-</i>	<i>SED-</i>
Tag	Zeit	Ort			NW	SED	SED NW	SED-NW
03	00:15:18	Diemtigen BE	0,5	1,4	1,6	-0,9	-1,1	-0,2
04	05:33:15	Rheinfelden AG	1,0	1,3	1,3	-0,3	-0,3	0,1
09	03:01:48	Moutier BE	0,5	1,0	1,1	-0,5	-0,6	-0,1
15	13:03:20	Jaun FR	1,6	1,3	1,6	0,3	0,1	-0,3
15	14:38:10	Muellheim D	1,8	2,1	2,0	-0,3	-0,2	0,1
20	21:48:37	Laufen BL	0,1	0,5	0,4	-0,4	-0,3	0,1
20	21:50:31	Laufen BL	0,0	0,5	0,4	-0,5	-0,4	0,1
22	23:11:30	Freiburg i.B. D	1,1	1,4	1,4	-0,3	-0,3	0,0
28	02:42:06	Waedenswil ZH	2,0	2,1	2,2	-0,1	-0,2	0,0
Durchschnitt						-0,33	-0,35	0,02

Tabelle 4.9: Magnituden für Erdbeben im September 2015 und Abweichungen zwischen verschiedenen Bestimmungen.

Zusammenfassung

Die Genauigkeit von Lokalisierung und Magnitude wurde zuerst anhand eines der stärksten Ereignisse ermittelt. Anschließend wurden die Auswertemethoden vorgestellt (Seite 84). Weiterhin wurden elf Ereignisse im unmittelbaren Bereich des Messnetzwerks (10 km Abstand) untersucht und mit den Lokalisierungen des SED verglichen. Insgesamt wurde eine gute Übereinstimmung festgestellt. Dies gilt auch für die Bestimmung der Magnitude. Beim Vergleich mit 39 Sprengungen, mit bestätigtem Ground Truth, betrug der laterale durchschnittliche Fehler nur etwa die Hälfte, verglichen mit den Abweichungen zum SED. Durch die lokale Verdichtung des Regionalnetzes verbessert sich die Lokalisierungsgenauigkeit. Für Ereignisse mit einem Abstand von bis zu 10 km zum Felslabor beträgt der laterale Fehler, berechnet nach der auf Seite 83 vorgestellten Methode, im Durchschnitt 1,27 km und in der Tiefe 2 km. Durch die Vervollständigung des Messnetzwerks durch SNS3 und SNS4 verbessern sich die Fehler auf 425 m lateral und 800 m in der Tiefe.

4.3 Seismizität in Mont Terri

4.3.1 Lokale Seismizität

Im Überwachungszeitraum wurde der Bereich $200\text{ km} \times 200\text{ km}$ näher untersucht (Abbildung 4.26). Es wurden in den Wellenformen des Datensatzes aus eigenen sowie externen Daten fast 600 seismische Ereignisse registriert. Mit Hilfe von Bulletins konnten 114 Sprengungen sowie 344 Erdbeben identifiziert werden. Ein geringer Teil davon wurde für Vergleiche herangezogen (siehe Kapitel 4.2.4), bei den meisten die Lokalisierung des Bulletins übernommen. Nur im unmittelbaren Umfeld ($10\text{ km} \times 10\text{ km}$) wurden alle Ereignisse lokalisiert (siehe Kapitel 4.3.3). Zusätzlich zu den genannten Detektionen wurden weitere 140 Ereignisse lokalisiert. Die Erhöhung der Anzahl lokalisierter Ereignisse um etwa 40% sowie die Erweiterung des Magnitudenbereichs von $0,4 < M_L < 3,3$ auf Magnitude $-2 < M_L < 3,3$ zeigen die erzielte Verbesserung durch vier zusätzliche Kleinarrays und den Einsatz sonogrammbasierter Auswertungsmethoden. Die Vollständigkeitsmagnitude (nach Woessner und Wiemer, 2005) konnte von $M_c = 2$ (Kraft et al., 2013) auf $M_c = 1,2$ gesenkt werden, es ergibt sich ein b-Wert von $0,75 \pm 0,09$ (Abbildung 4.27). Bei der lateralen Ereignisverteilung lässt sich ein Nord-Süd-Trend im zentralen Bereich erkennen. Im Radius von 10 km wurden 89 seismische Ereignisse registriert. Davon konnten 38 Explosionen sowie acht Erdbeben mittels Bulletins identifiziert werden. 43 zusätzliche Erdbeben konnten lokalisiert werden. Der SED listet für diesen Zeitraum mehr als die genannten acht Ereignisse, diese konnten jedoch als Sprengung vom Verursacher verifiziert werden

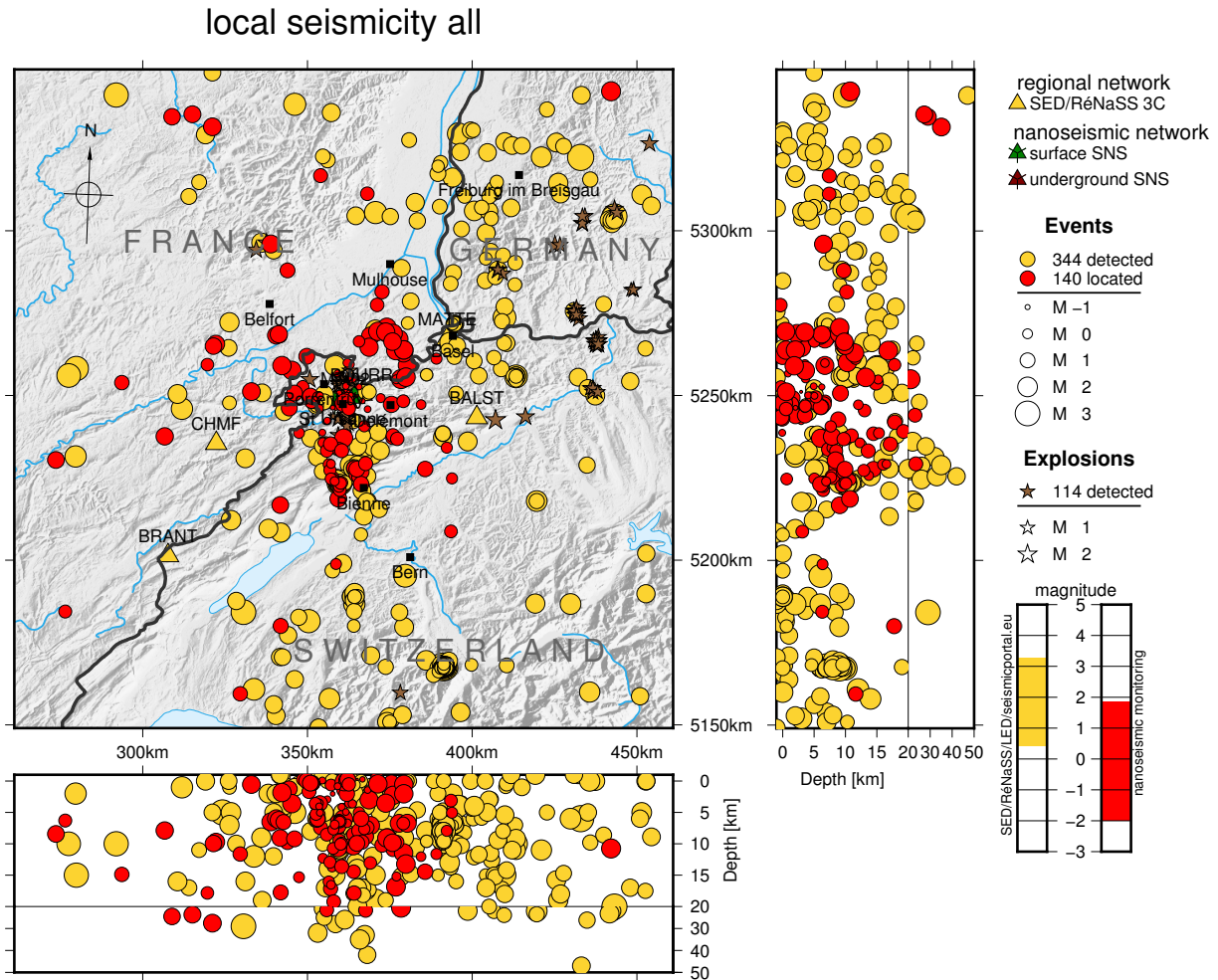


Abbildung 4.26: Lokale Seismizität im 100 km Radius und Tiefenschnitte mit sich ändernder Skalierung.

(siehe 4.2.4). Drei lokalisierte bzw. sechs detektierte Ereignisse sind wegen einer Tiefe von mehr als 5 km nicht dargestellt (Abbildung 4.28). Das sehr dichte Netz aus mehreren SNS in diesem Kernbereich erhöht die Empfindlichkeit erheblich. Seismizität wurde überwiegend an bekannten und vermuteten Störungen lokalisiert. Fünf Ereignisse treten im unmittelbaren Bereich des Tunnels auf. Im, in Abbildung 4.28, gezeigten Ausschnitt verbessert sich die Vollständigkeitsmagnitude auf $M_c = 0,5$, der b-Wert wird auf Grund der geringen Anzahl vorhandener Ereignisse (<50) nicht ermittelt. Häge et al. (2013) untersuchen Änderungen im b-Wert und der Vollständigkeitsmagnitude für jeweils mindestens 150 Ereignisse. Abbildung 4.29 zeigt die Magnitude aller Ereignisse, aufgetragen über die Distanz Ereignis zum nächsten SNS. Als untere Einhüllende wurden die Magnitudenentfernungskorrekturkurven (Gleichungen 4.4 – 4.6) angefitet, jeweils getrennt für Detektionen und Lokalisierungen. Der Unterschied in der Amplitude beträgt Faktor

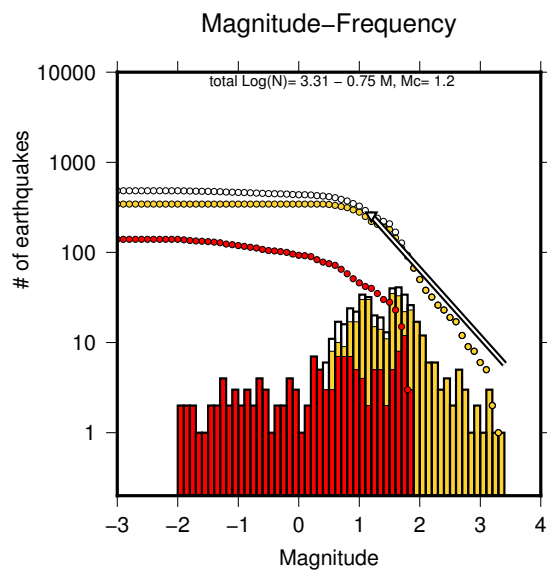


Abbildung 4.27: Lokales ($200 \times 200 \text{ km}^2$) Magnituden-Frequenz Diagramm. Gelbe Balken basieren auf Bulletindaten, rote sind zusätzlich lokalisierte Erdbeben und weiß die Summe beider.

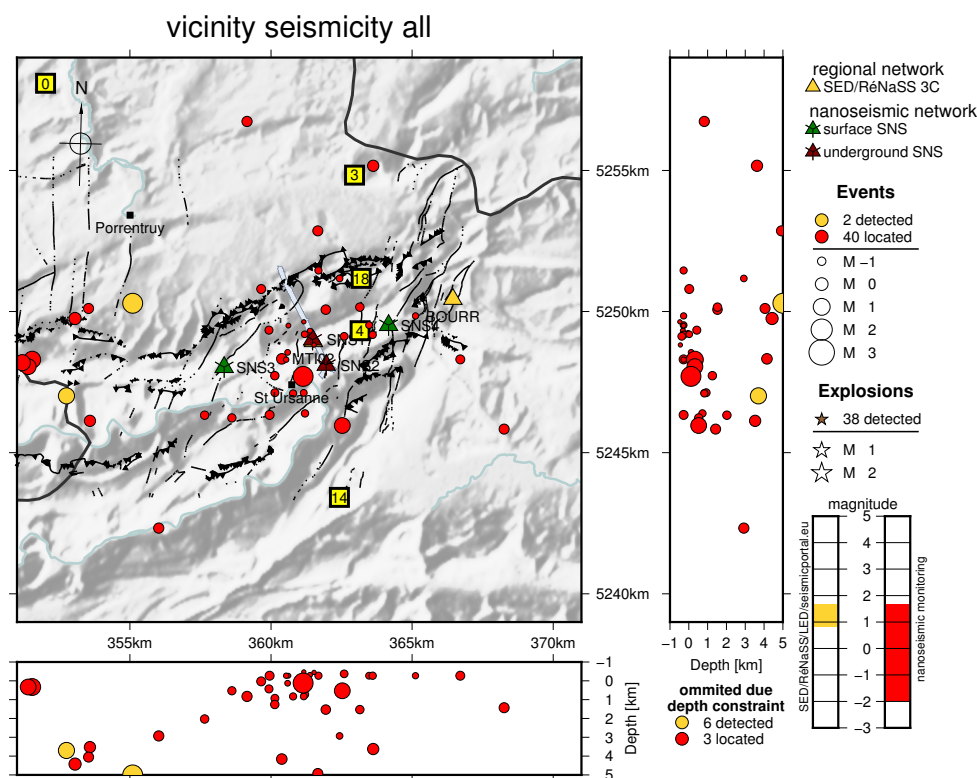


Abbildung 4.28: Zoom von Abbildung 4.26 mit 10 km Radius und 5 km Tiefenbeschränkung. Die Anzahl der Ereignisse sind in den Symbolen der Quellen (gelbe Quadrate) vermerkt.

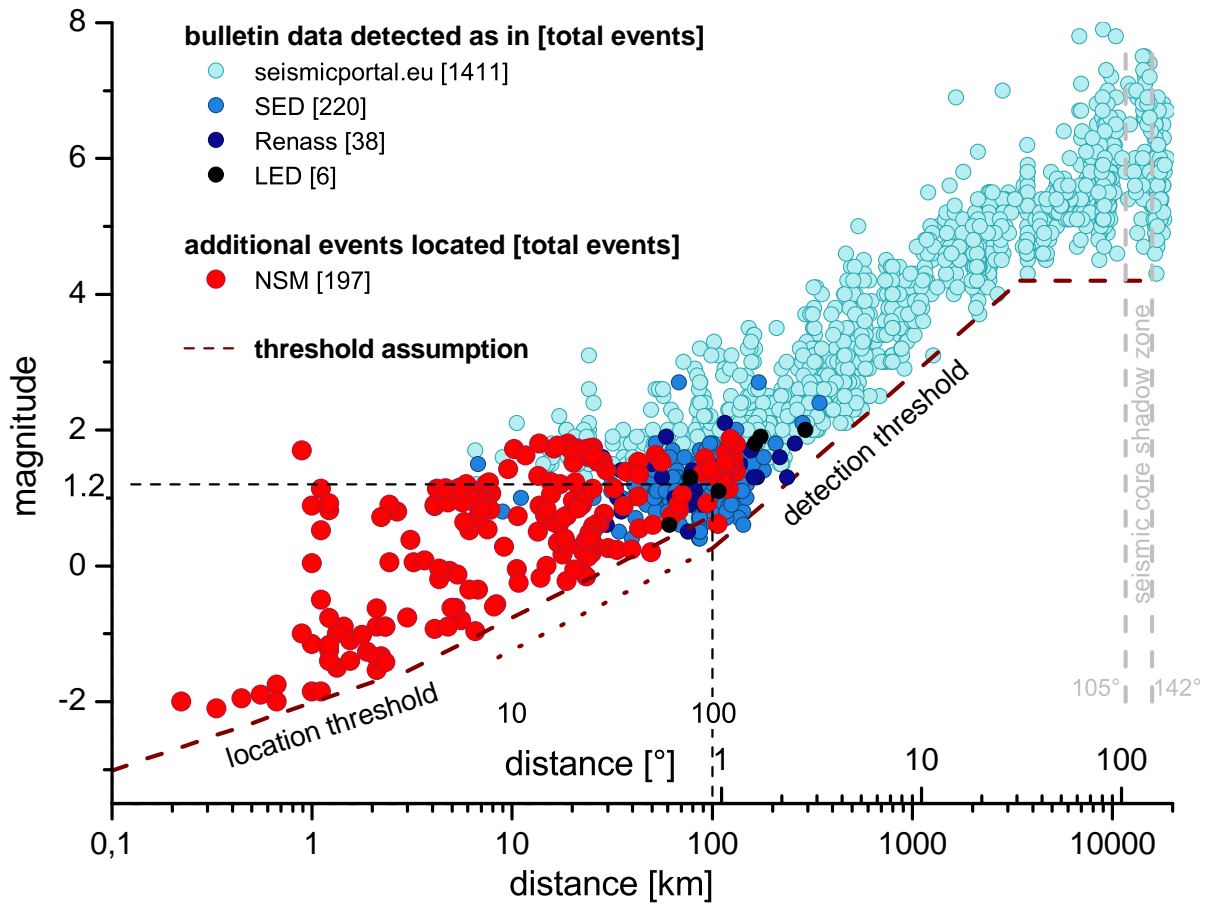


Abbildung 4.29: Alle aufgezeichneten Erdbeben mit ihrer Magnitude über ihre Epizentraldistanz zum nächsten SNS geplottet. Die Ereignisschwellen stellen die untere Hüllkurve an die Ereignisse dar.

3 und zeigt den Unterschied zwischen der Verifikation bekannter Phasen im Sonogramm und dem erfolgreichen Picken im Seismogramm.

Abbildung 4.30 zeigt die probabilistische Analyse der Lokalisierungen aus Abbildung 4.28. Wahrscheinlichkeitsbereiche zeigen kreisförmige bis stark Nordsüd verzerrte Ellipsen. Diese Nord-Süd-Unsicherheit wurde bereits bei der Betrachtung der Lokalisierungsgenauigkeit beobachtet. Auffällig ist die geringe Tiefe (bis 3 km) vieler Ereignisse. Diese zeigt sich sowohl in der absoluten, als auch in der probabilistischen Lokalisierung (Abbildung 4.31). Ohne Berücksichtigung des Fehlers in der Tiefenbestimmung liegen bei der Absolutlokalisierung zwischen 46% und 67% der Ereignisse oberhalb des Basements (Oberkante zwischen 600 und 1200 m , Abbildung 4.4). Mit Berücksichtigung liegen zwischen 0% und 79% bzw. probabilistisch zwischen 22% und 35% der Ereignisse oberhalb des Basements. Oberflächennahe Seismizität im Basement kann daher nicht ausgeschlossen werden, sondern ist im Gegenteil sehr wahrscheinlich.

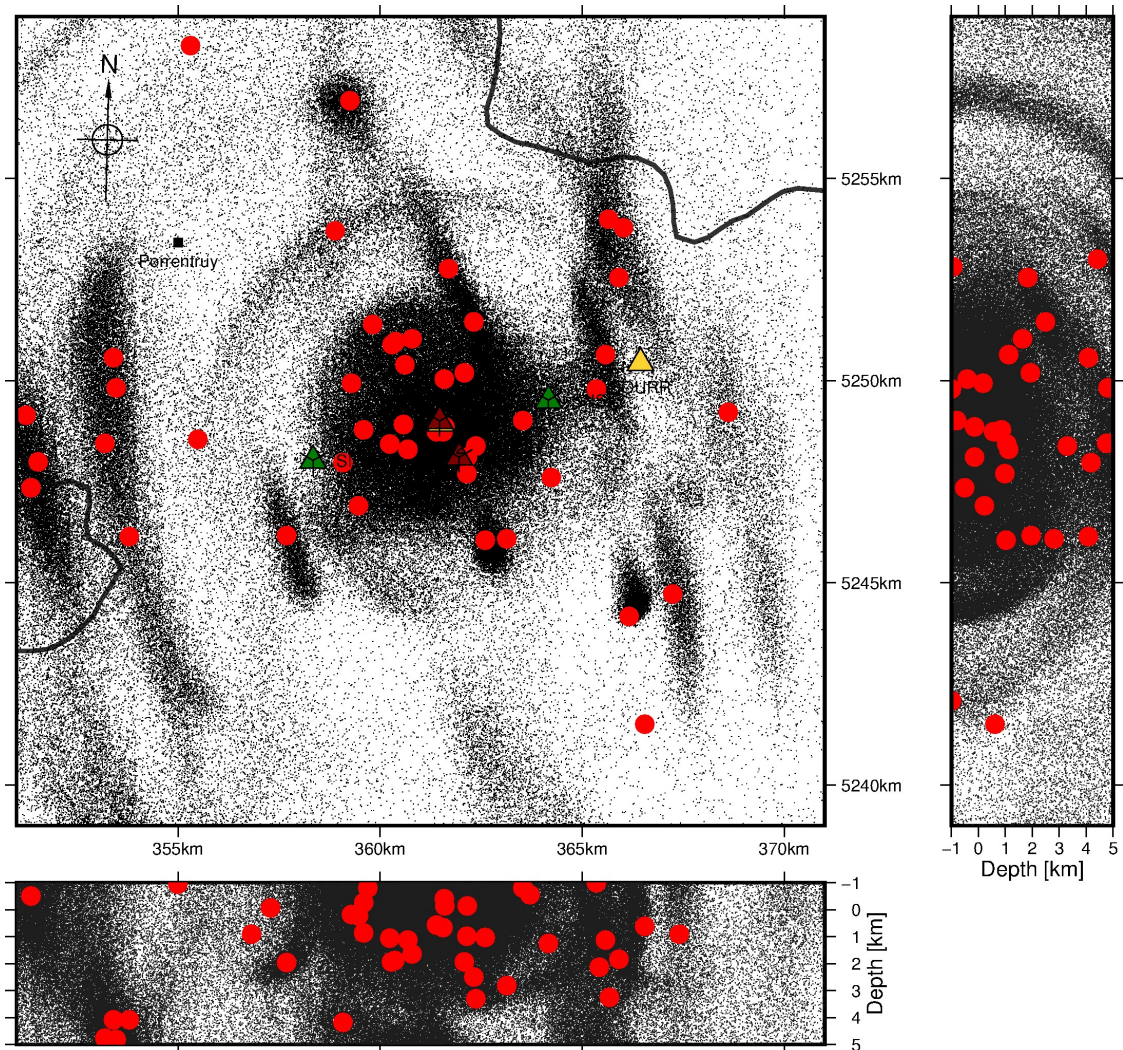
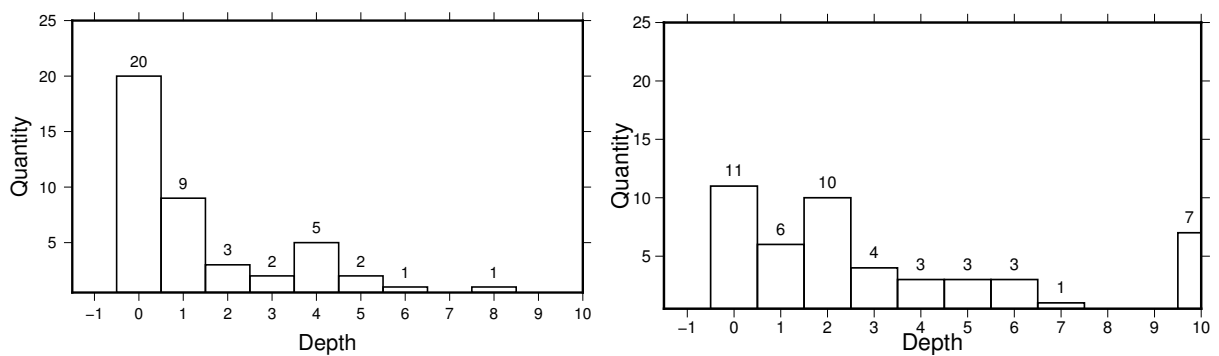


Abbildung 4.30: Probabilistische Lösungen der Ereignisse aus Abbildung 4.28.



(a) Histogramm der Ereignistiefen für die Absolutlokalisierung (Abbildung 4.28).

(b) Histogramm der Ereignistiefen für die probabilistische Lokalisierung (Abbildung 4.30)

Abbildung 4.31: Tiefen der Ereignisse im Bereich von Abbildung 4.28, die unterschiedliche Ereignisanzahl (78 absolut, 77 probabilistisch) resultiert aus dem geografischen Filter.

4.3.2 Clustering

Deichmann et al. (2012) identifizierten zwei Cluster im 10 km Radius (Kapitel 4.1.4) basierend auf der Neubewertung von Daten und Wellenformvergleichen. Im Folgenden sollen die bisher diskutierten Messdaten auf Clusterungen untersucht werden. 91 (von 92) Ereignisse und Sprengungen aus Abbildung 4.28 wurden dafür berücksichtigt. Ein Ereignis wird nicht berücksichtigt, da die Coda des vorangegangenen Ereignisses die Wellenform überlagert, zusätzlich allerdings noch das Ereignis #11 aus Deichmann et al. (2012, Wellenform: persönliche Kommunikation Deichmann 12.3.2015), im Folgenden als „historisch“ bezeichnet und mit „hist“ abgekürzt. Für die Kreuzkorrelation wurde zum einen die 1 – 60 Hz bandpassgefilterte Wellenform zwei Sekunden vor und acht Sekunden nach dem P-Einsatz verwendet, zum anderen ein Bandpass von 2-10 Hz (Vouillamoz, 2015) und in Abbildung 4.32 jeweils ober- (1 – 60 Hz) bzw. unterhalb (2 – 10 Hz) der Diagonale dargestellt. Dieses Zeitfenster deckt in den meisten Fällen die gesamte Wellenform ab (siehe Anhang D). Zusätzlich wurde der P-Einsatz besonders gewichtet, mit den selben Filtern, aber einem Vorlauf von nur 0,2 s und einer Länge von einer Sekunde (Abbildung 4.33). Die Kreuzkorrelationstabellen sind jeweils für die vier Vertikalspuren von SNS1-C, SNS2-C, MTI02 und BOURR gezeigt. Diese Stationen haben die Mehrheit der Ereignisse störungsfrei aufgezeichnet. Die Ereignisse in den Tabellen sind jeweils in der Reihenfolge der Entdeckung der Ereignisse sortiert und benannt, was zu 98% einer chronologischen Sortierung entspricht und mit zunehmendem Koeffizienten von weiß bis schwarz eingefärbt ist. In Abbildung 4.32 sind vereinzelt Gruppierungen von 2×2 bis 4×4 bzw. bei BOURR im letzten Viertel auch eine größere Gruppe zu erkennen. BOURR zeigt auf Grund der Lage am Rand des betrachteten Gebiets eine etwas erhöhte Korrelation. Im verkürzten Zeitfenster (Abbildung 4.33) nimmt die allgemeine Ähnlichkeit zu, größere Gruppierungen treten allerdings auch hier nicht auf.

Um Gruppierungen besser identifizieren zu können, wird eine hierarchische Sortierung, basierend auf der Ähnlichkeit der Wellenformen, angewandt. Anstatt diese auf jede der Stationen für jede der Filterungen und Zeitfenster einzeln zu betrachten, wird aus allen Korrelationskoeffizienten zweier Ereignisse der Mittelwert gebildet. Verschiedene Gewichtungen wurden getestet, um die steigende Ähnlichkeit bei schmalerem Bandpass auszugleichen, brachten aber keine signifikanten Verbesserungen. Das resultierende Dendrogramm ist in Abbildung 4.34 gezeigt (berechnet mit der Differenz von 1-Kreuzkorrelationskoeffizient, entspricht der Verschiedenheit), die sich daraus ergebende Einteilung in Tabelle 4.10, die dazugehörigen Wellenformen und Sonogramme, sortiert nach Cluster, sind in Anhang D dargestellt.

Bei der Definition der Cluster wurden Ereignisse bis 50% Verschiedenheit gruppiert. Über-

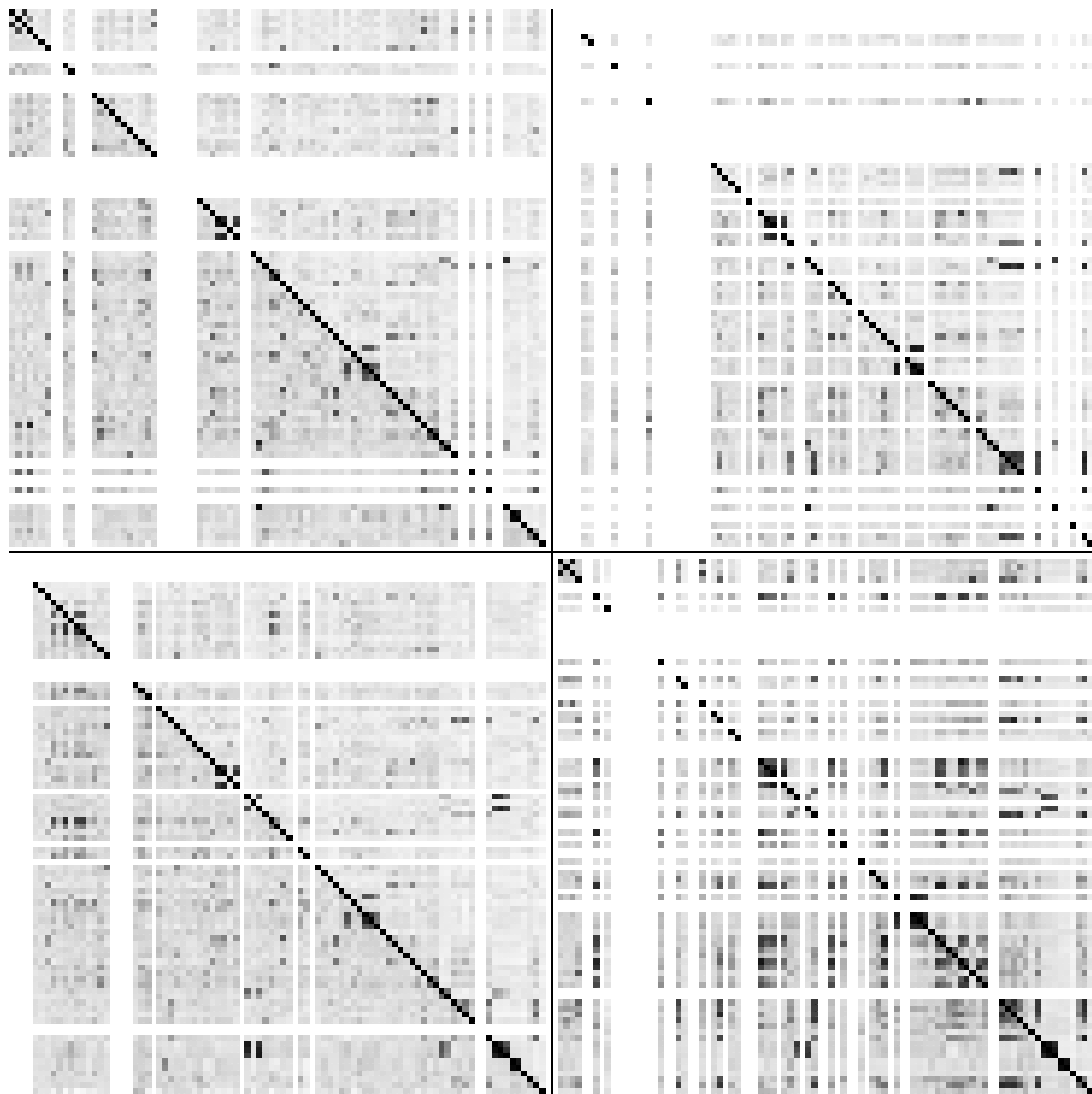


Abbildung 4.32: Kreuzkorrelationsmatrix naher Ereignisse chronologisch sortiert für SNS1, SNS2 (beide obere Reihe) und MTI02, BOURR (untere Reihe), Fensterlänge 10 s, beginnt 2 s vor dem P-Einsatz. Oberhalb der Diagonalen: 1 – 60 Hz bandpassgefiltert, unterhalb 1 – 10 Hz. Weiße Zeilen und Spalten: Ereignis nicht berücksichtigt (nicht aufgezeichnet oder Signal gestört).

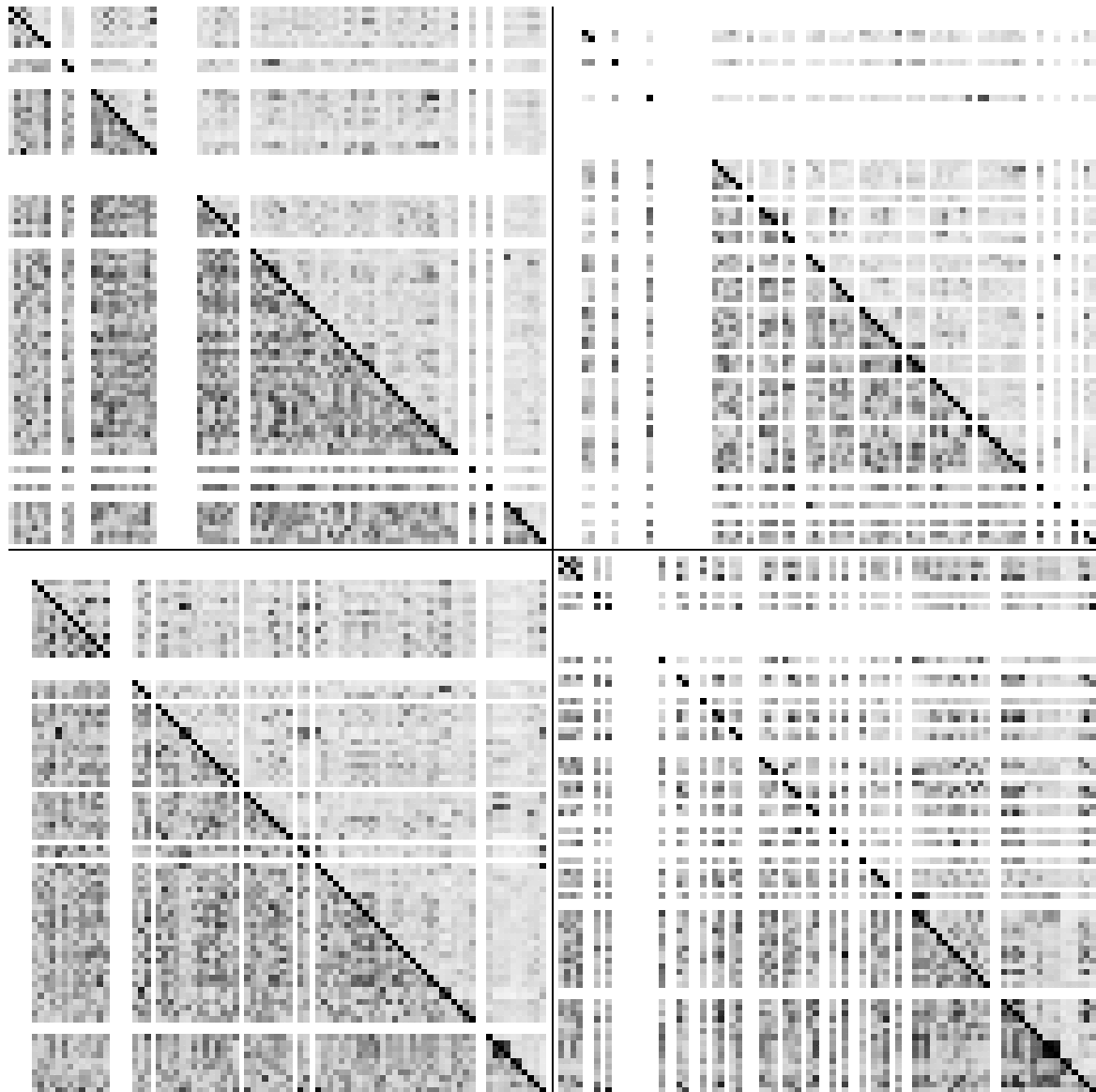


Abbildung 4.33: Kreuzkorrelationensmatrix naher Ereignisse chronologisch sortiert für SNS1, SNS2 (beide obere Reihe) und MTI02, BOURR (untere Reihe), Fensterlänge 1 s, beginnt 0,2 s vor P-Einsatz. Oberhalb der Diagonalen: 1 – 60 Hz bandpassgefiltert, unterhalb 1 – 10 Hz. Weiße Zeilen und Spalten: Ereignis nicht berücksichtigt (nicht aufgezeichnet oder gestört).

4.3. SEISMIZITÄT IN MONT TERRI

gruppen lassen sich sowohl für North (2,3,4), South (1,2,3) oder AF1 und Center (2,3) erkennen (Abbildung 4.34). Tabelle 4.11 gibt eine Übersicht über die einzelnen Cluster und einige ihrer Eigenschaften. Dort sind die Uhrzeiten zwischen denen die Ereignisse tagsüber auftreten (Spalten 3 und 4), der zeitliche Abstand in Tagen vom ersten bis letzten Ereignis innerhalb des Clusters (Spalte 5 und Abbildung 4.36) sowie der Tiefenbereich (Spalten 6, 7 und 8) gelistet. Bei entsprechender Ereigniszahl liegt für Cluster die tagsüber, sowie in geringer Tiefe auftreten, der Verdacht nahe, dass es sich um Sprengungen handelt. In der lateralen Darstellung in Abbildung 4.35 sind daher zusätzlich bekannte, aktive Steinbrüche verzeichnet (persönliche Kommunikation T. Theurillat 27.2.2017), die genannten Übergruppierungen sind auch hier ersichtlich. Bei der Betrachtung der South

Name	Anzahl	Mitglieder
North1	3	14Apr10, 14Apr20, 14May5
North2	7	14Dec10, 15Jan26, 15Mar46, 15Apr23, 15Jun86, 15Jun89, 15Jul35
North3	5	14May10, 14Jul18, 15May41, 15May69, 15May78
North4	3	15Apr26, 15Apr52, 15Apr60
South1	5	Expl1, 14Oct11, Expl3, vgl8, vgl10
South2	5	14Apr2, 14May3, Expl2, 15Aug46, Expl4
South3	3	14Apr29, 15Apr85, 15May60
East1	2	vgl2, vgl3
East2	2	15Jan4, 14Dec15
AF1	8	14Dec11, 14Dec24, 14Dec25, 14Dec27, 14Dec20, 15Jan11, 15Jan20, 15Jun34
AF2	4	15Jun17, 15Jun50, 15Jun68, 15Jun80
West1	7	vgl11, 15Aug18, vgl12, 15Aug41, vgl13, 15Sep75, 15Sep76
Center1	2	14Oct20, 14Jun35
Center2	3	14May40, 14Nov10, 15Apr17
Center3	2	14Oct4, 15Apr57
Other	30	hist, 14May12, 14May13, vgl1, 14May37, 14May39, 14Aug10, 14Aug46, 14Sep8, vgl5, 14Oct25, 14Oct34, 14Nov9, 14Dec26, 14Dec23, 15Jan3, vgl9, 15Jan30, 15Jan39, 15Jan40, 15Jan42, 15Mar11, 15Mar17, vgl6, 15Jun4, 15Jun83, 15Jul13, 15Jul29, 15Jul63, 15Aug28

Tabelle 4.10: Übersicht und finale Klassifizierung der hierarchischen Clusterungen. Die Ereignisbenennung ist in Abbildung 4.34 erklärt.

Cluster fällt auf, dass sich die meisten der Ereignisse um einen Steinbruch (Glovelier) gruppieren. Zusätzlich sind alle vier Sprengungen des SED in diesen Clustern enthalten, allerdings auch zwei vom SED als Erdbeben klassifizierte Ereignisse. Weiterhin ereigneten

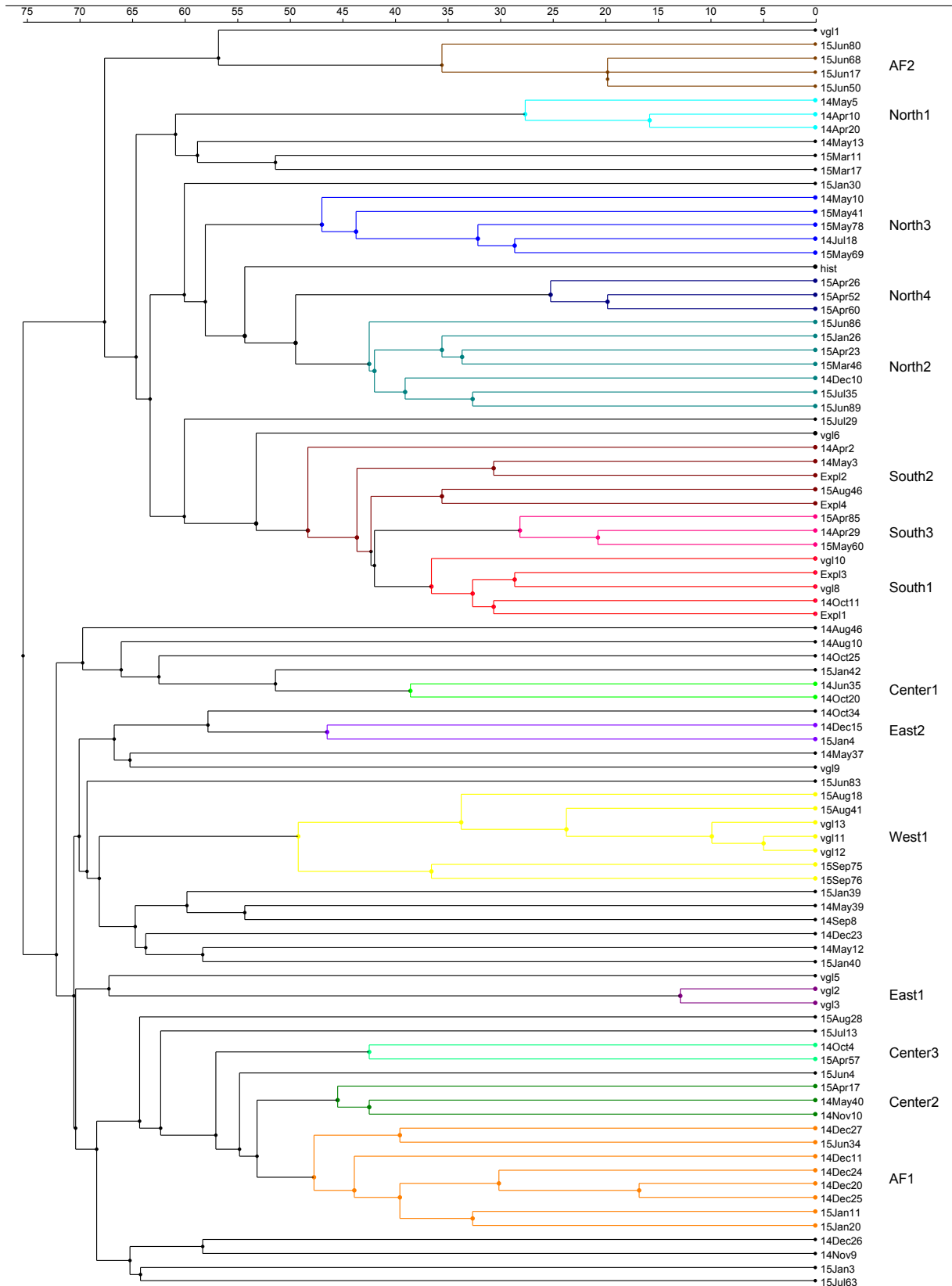


Abbildung 4.34: Dendrogramm der gemittelten Kreuzkorrelationskoeffizienten. Die Ereignisbenennung erfolgt nach dem Muster: Jahr+Monat+fortlaufende Nummer oder vgl+fortlaufende Nummer (aus dem SED Bulletin) oder Expl+fortlaufende Nummer (aus dem SED Bulletin für Sprengungen).

4.3. SEISMIZITÄT IN MONT TERRI

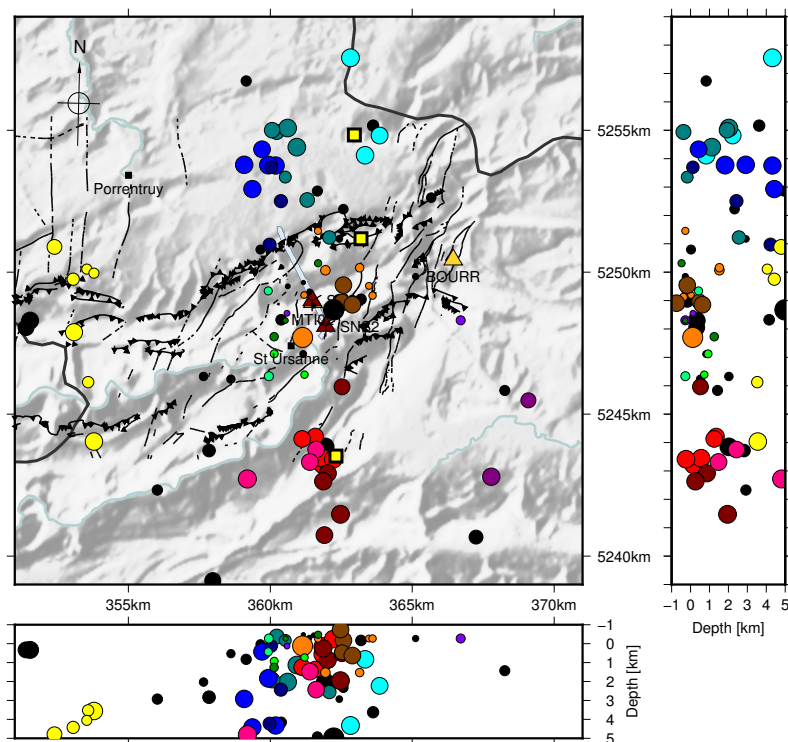


Abbildung 4.35: Abbildung 4.28 ohne Tiefenbeschränkung in der Draufsicht, eingefärbt in Cluster. Zusätzlich sind bekannte aktive Steinbrüche eingezeichnet (gelbe Vierecke).

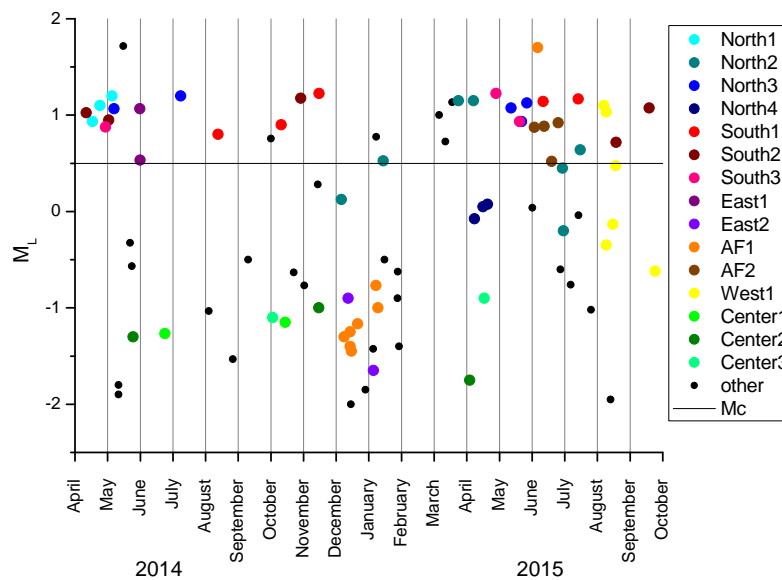


Abbildung 4.36: Zeitliche Verteilung der in Abbildung 4.35 gezeigten Ereignisse sowie die Vollständigkeitsmagnitude von $M_c = 0,5$.

Name	#	früheste Uhrzeit	späteste Uhrzeit	Dauer [Tage]	Tiefe		
					Min [km]	Max [km]	∅ [km]
North1	3	13:07:37	14:23:08	18	0,8	4,3	2,5
North2	7	07:33:20	14:37:02	223	-0,4	5,4	1,8
North3	5	11:28:41	15:36:28	385	0,4	4,4	2,8
North4	3	11:27:41	16:22:16	12	0,1	4,2	2,3
South1	5	10:01:10	14:40:49	336	-0,2	1,4	0,6
South2	5	13:18:09	16:16:37	525	0,3	7,2	2,2
South3	3	14:16:28	16:41:13	386	1,5	4,8	2,9
East1	2	16:24:15	17:44:56	0	8,9	13,1	11,0
East2	2	07:32:06	16:28:56	24	-0,3	0,1	-0,1
AF1	8	02:07:49	18:59:06	180	-0,4	1,5	0,3
AF2	4	11:48:33	16:41:33	22	-0,7	0,6	0,0
West1	7	01:31:45	14:31:21	48	3,5	5,4	4,4
Center1	2	00:40:19	01:13:36	112	0,7	0,9	0,8
Center2	3	06:11:28	10:52:22	314	-0,5	1,3	0,2
Center3	2	12:21:59	14:58:07	197	-0,3	0,4	0,1
Other	30	00:31:21	23:31:13	459	-0,5	19,2	3,0

Tabelle 4.11: Statistiken der einzelnen Cluster. Uhrzeiten sind Lokalzeiten.

sich alle Ereignisse zwischen 10:01 Uhr und 16:41 Uhr Lokalzeit. Letzteres gilt allerdings auch für die North Cluster (7:33 Uhr bis 16:22 Uhr). Bei der Tiefenverteilung lässt sich nur für East1 und West1 eine oberflächennahe Quelle ausschließen. Es ist daher davon auszugehen, dass es sich bei den South Clustern um Sprengungen handelt. Für die North (2 – 4) Cluster gelten ähnliche Argumente. Ein Abgleich mit dem Bulletin von T. Theurillat (persönliche Kommunikation 13.3.2017) bestätigt diese Annahmen.

Alle bisher diskutierten Ereignisse wurden zusätzlich gegen einen erweiterten Datensatz verglichen. Dieser umfasst alle bisher diskutierten Ereignisse, sowie alle Markierungen möglicher Ereignisse, die aus verschiedenen Gründen nicht ausgewertet wurden. Dazu zählen: mit hoher Wahrscheinlichkeit als Störsignal identifiziert (z.B. über die Scheingeschwindigkeit), zu schwach um Phaseneinsätze zu picken, Überlagerungen während der Phaseneinsätze oder signifikante Widersprüche in der Auswertung und entsprechend große Fehler. Das erweiterte Dendrogramm ist im Anhang D in Abbildung D.26 gezeigt. Einzelne Cluster können bei Anwendung der selben Kriterien (Ähnlichkeit >50%) um weitere Ereignisse ergänzt werden (Center1 10 Stück, Center2 3, AF1 8, East1 1, South1,2&3 je 1), teilweise auch um Ereignisse aus dem Cluster Other. Dies liegt an der leicht abweichenden Berechnung ohne das kurze Zeitfenster von einer Sekunde um den P-Einsatz, da dieser für die zusätzlichen potentiellen Ereignisse nicht zur Verfügung steht. Die gesamte

Wellenform wird daher stärker gewichtet als bisher. Den größten Zuwachs erhalten jene zentralen Cluster mit überwiegend kleinen Magnituden wie Center1 und Center2 oder AF1. Zusätzlich bilden sich 10 neue Cluster aus mindestens 3 Ereignissen („misc“ Abbildung D.19 und D.20). Bei einigen könnte es sich um weiter entfernte Ereignisse handeln (tieffrequente Energie), bei anderen ist Phasen picken auf Grund des schlechten SNR oder emergenter Einsätze nicht möglich.

Ereignis vom 28.3.2000 3:16 Uhr (hist)

Bei der Diskussion der Relokalisierung in Deichmann et al. (2012) wird der Verdacht geäußert, dass das Ereignis Nummer 11 vom 28.3.2000 3:16 Uhr wegen eines Ausfalls der nächsten Station (BOURR) abseits von den anderen Ereignisse aus dem selben Zeitraum liegt (4 weitere, 3 davon am selben Tag, eines 9 Tage später). Eine Relativlokalisierung von T. Diehl (persönliche Kommunikation 16.2.17) mit HypoDD brachte keine räumliche Annäherung. Daher wurde die Wellenform in der bisherigen Analyse berücksichtigt,

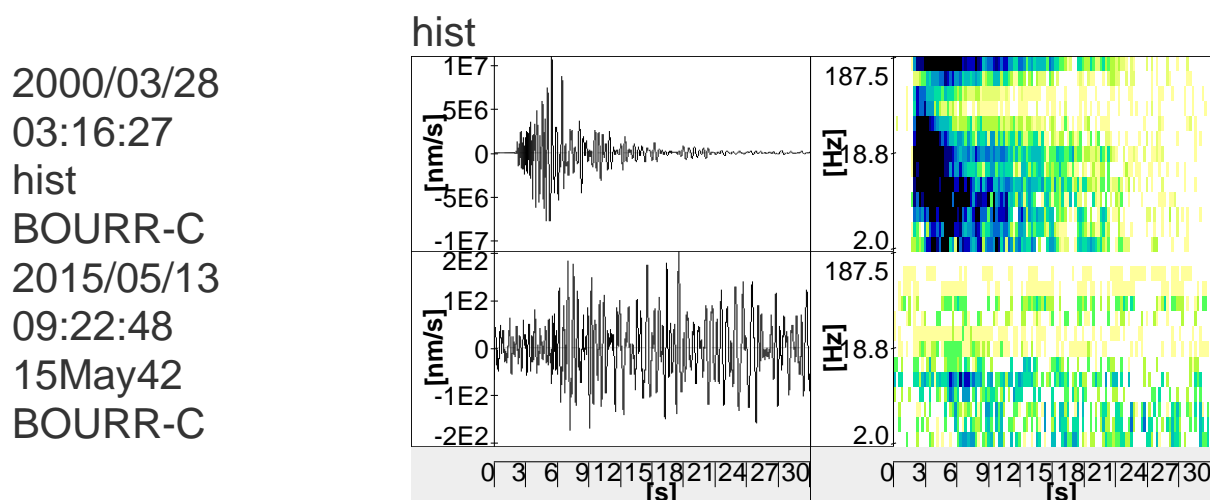


Abbildung 4.37: Seismogramm und Sonogramm von hist und 15May42, letzteres das Ereignis welches die geringste Unähnlichkeit zu hist hat. Der Amplitudenunterschied beträgt ungefähr Faktor 100.000. Es konnte im Datensatz kein Ereignis identifiziert werden, dass die Deutung von hist verbessert.

um ähnliche Ereignisse zu identifizieren und bessere Aussagen über die Zugehörigkeit des historischen Ereignisses zu treffen. Im Dendrogramm der lokalisierten Ereignisse (Abbildung 4.34) wird es zwischen die North Cluster 2 – 4 sortiert. Diese Sprengungen liegen jedoch mehrere Kilometer nördlich der bisherigen Lokalisierung. Im Dendrogramm aller möglichen Ereignisse (Abbildung D.26) gibt es ein Ereignis (15May42) welches eine sehr schwache Ähnlichkeit zu hist zeigt (etwa 50%), allerdings bei einem Amplitudenun-

terschied von Faktor 100 000. Dieses ist in Abbildung 4.37 gezeigt, konnte jedoch nicht lokalisiert werden. In beiden Dendrogrammen ist eine generelle Nähe zu den South1 – 3 und North2 – 4 Clustern (alles Sprengungen) festzustellen. Erschwerend zu einer fundierten Bewertung kommt hinzu, dass die Station Bourr im April 2000 umgebaut wurde. Es bleibt daher vorerst unklar, ob dieses Ereignis zum St. Ursanne Cluster im selben Zeitraums zugeordnet werden kann.

Self Organizing Maps

Zusätzlich zur Kreuzkorrelation wurde eine Clusterung, basierend auf Sonogrammen, versucht. Dazu wurde analog zu Sick (2016) vorgegangen und alle 92 Ereignisse nach einer Principal Component Analysis mittels Self Organizing Maps gruppiert. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.38 dargestellt. Gleiche Cluster sind in gleichen Farben gezeigt und lassen

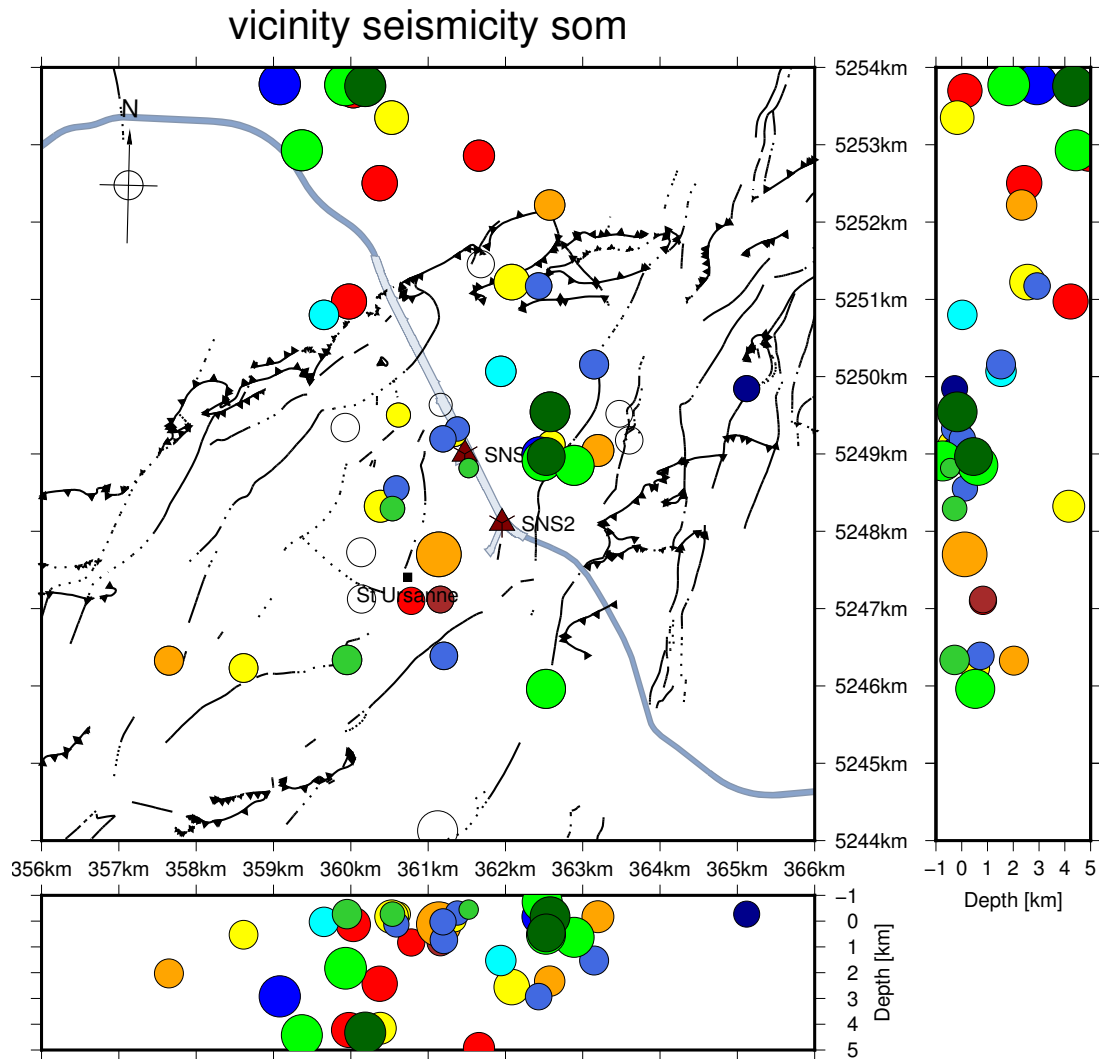


Abbildung 4.38: Ergebnis der Principal Component Analysis und Self Organizing Maps.

keine größeren Gruppierungen erkennen, weder räumlich noch in der Ereignisanzahl. Das Verfahren scheint daher nicht geeignet die Ergebnisse von Sick (2016), die sich auf einen Regionalbebenkatalog beziehen, auf ein kleinskaliges Monitoring zu übertragen, da sich die Sonogramme in den Hauptkomponenten zu wenig unterscheiden (SNR, t_s - t_p Zeiten, Form der Energieverteilung).

4.3.3 Seismizität am Felslabor

Betrachtet man nur noch die Seismizität in der unmittelbaren Nähe des Felslabors und beschränkt die Tiefe bis zum Anstehen des Basement (ca 600 – 1200 m) so nimmt die Anzahl der Beben deutlich ab und es bleiben 26 Lokalisierungen (Abbildung 4.39). Auffällig sind drei Bereiche. Der erste davon entlang des Tunnels in Richtung Nordnordwesten folgend. Dabei handelt es sich höchstwahrscheinlich um Effekte, die mit dem Bauwerk Tunnel zusammenhängen. Durch Wetter, Jahreszeiten und Verkehr ergeben sich Temperatur-

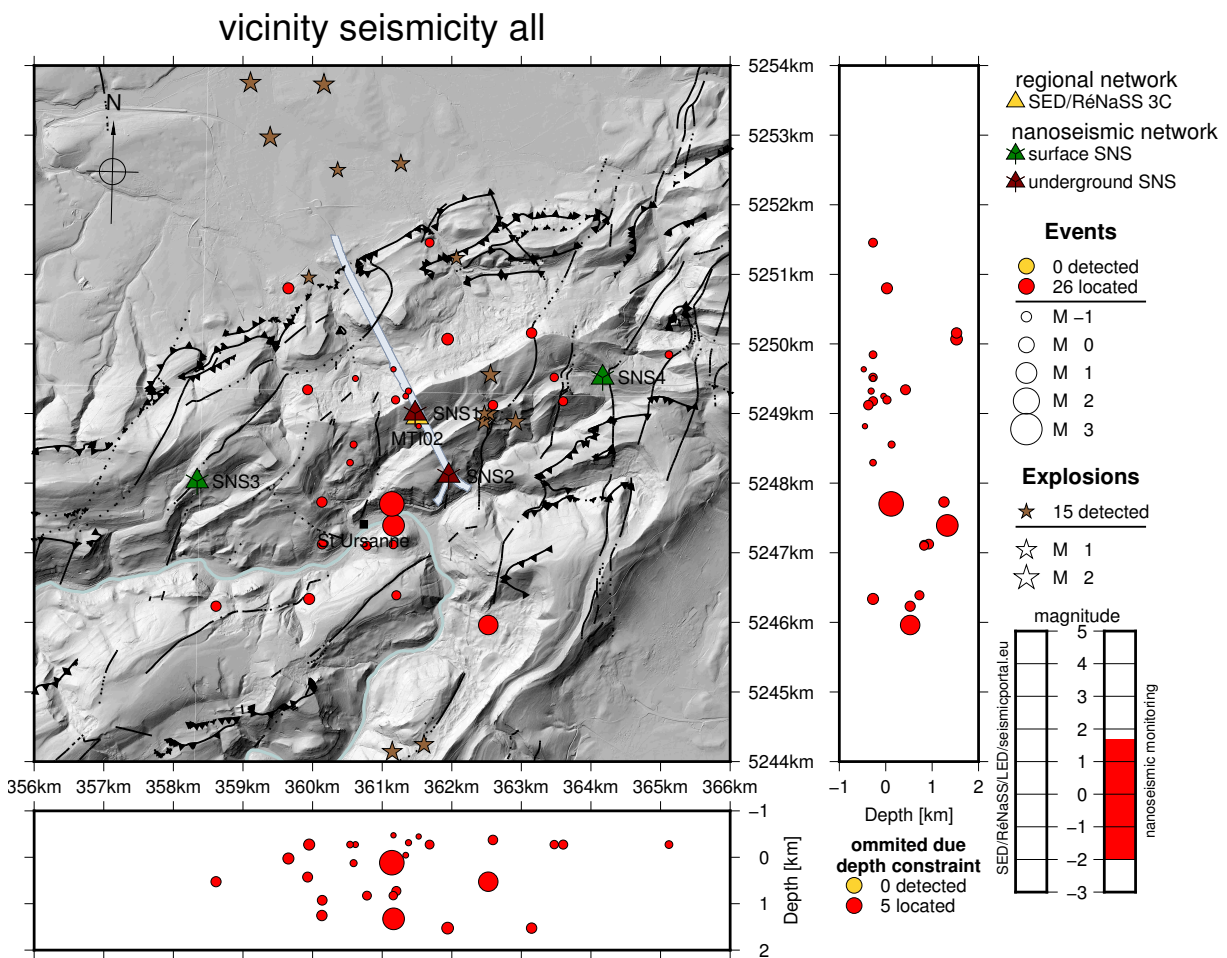


Abbildung 4.39: Zoom von Abbildung 4.28 mit 5 km Radius und Tiefenbeschränkung.

und Druckschwankungen sowie Erschütterungen. Zusätzlich können Setzungserscheinungen oder Spannungsabbau Auslöser der seismischen Signale sein. Verwechslungen, mit z.B. LWKs die über Schlaglöcher fahren, kann auf Grund der Sonogrammsignatur sowie der erfolgreichen Phasenidentifikation ausgeschlossen werden. Im zweiten Bereich deutet sich Aktivität an entlang zweier (vermuteter) Verwerfungen im Bereich zwischen Labor und SNS4. Die meisten dieser Ereignisse gehören zum AF2 Cluster, sind sich ähnlich ($> 65\%$) und ereigneten sich innerhalb von 22 Tagen oberflächennah (Tiefe zwischen $-0,7$ und $0,6$ km). Die Vermutung einer Verwerfung wird dadurch bestärkt. Beim dritten Bereich handelt es sich um die Center Cluster die in der unmittelbaren Umgebung von St. Ursanne an verschiedenen Verwerfungen lokalisiert wurden. Andere Verwerfungen konnten bisher auf Grund der geringen Ereigniszahl nicht genauer untersucht werden.

Relativlokalisierung

In Abbildung 4.40 wurde eine Relativlokalisierung mit *HypoDD* durchgeführt. Drei Bereiche gruppieren sich dabei. Innerhalb der Gruppe im Norden (Clusterung: North2 – 4) verringern sich die Abstände vereinzelt. Ebenso verhält es sich mit den Ereignissen im Süden (Clusterung: South1-3). Die dritte Gruppe (Clusterung: AF1 und AF2) ist in Abbildung 4.41(a) vergrößert. Die dazugehörigen Verschiebungsvektoren sind in Abbildung 4.41(b) gezeigt.

Betrachtet man die südlichen Cluster (South1 – 3) in Abbildung 4.42(a) getrennt, so gibt es auch hier für die zentralen Ereignisse geringe Änderungen der Lokalisierungen, während die weiter entfernten Ereignisse nicht berücksichtigt werden. Ebenso zeigt die Relativlokalisierung von Cluster AF2 kleinere Änderungen der Lokalisierungen. *HypoDD* wird üblicherweise auf Cluster angewandt, welche Kreuzkorrelationskoeffizienten im Bereich 95% aufwärts aufweisen, davon sind die hier diskutierten Cluster zu weit entfernt (1 Ereignispaar mit 95% Ähnlichkeit, alle anderen unter 90%). Die Untersuchungen mit *HypoDD* konnten im Rahmen dieser Studie daher nur vorbereitend und exemplarisch durchgeführt werden. Für die individuelle Bewertung der Verwerfungszonen sind weitere eingehende Untersuchungen und Optimierungen der Parameter nötig.

relocation

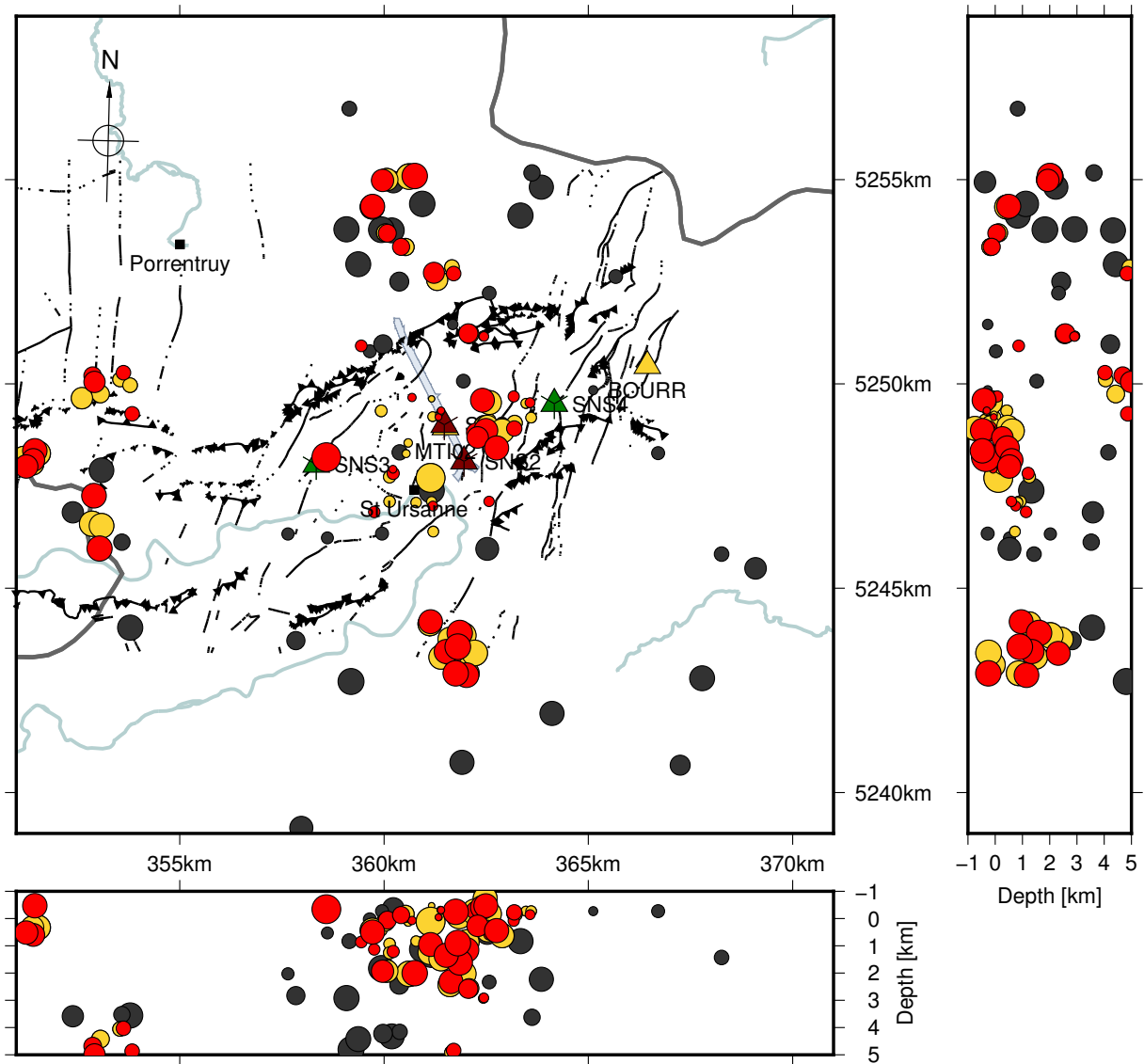


Abbildung 4.40: Relativlokalisierung der Ereignisse aus Abbildung 4.28 mit *HypoDD*. Grau: Alle Ereignisse, Gelb: relokalisierte Ereignisse (Start), Rot: relokalisierte Ereignisse (Final).

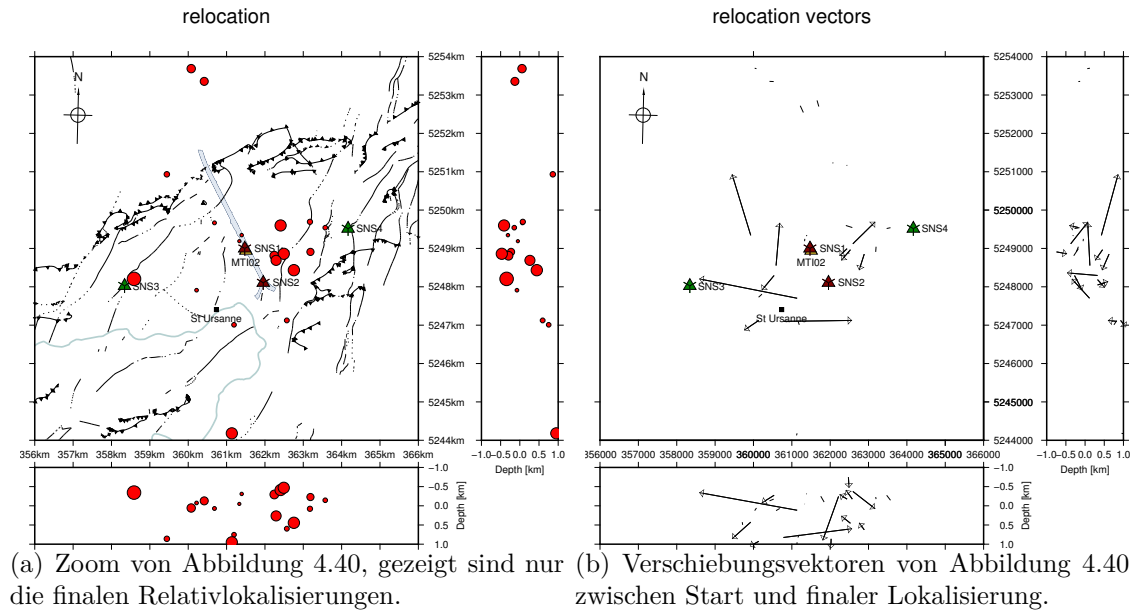


Abbildung 4.41: Relativlokalisierung im Bereich 5 km um das Felslabor.

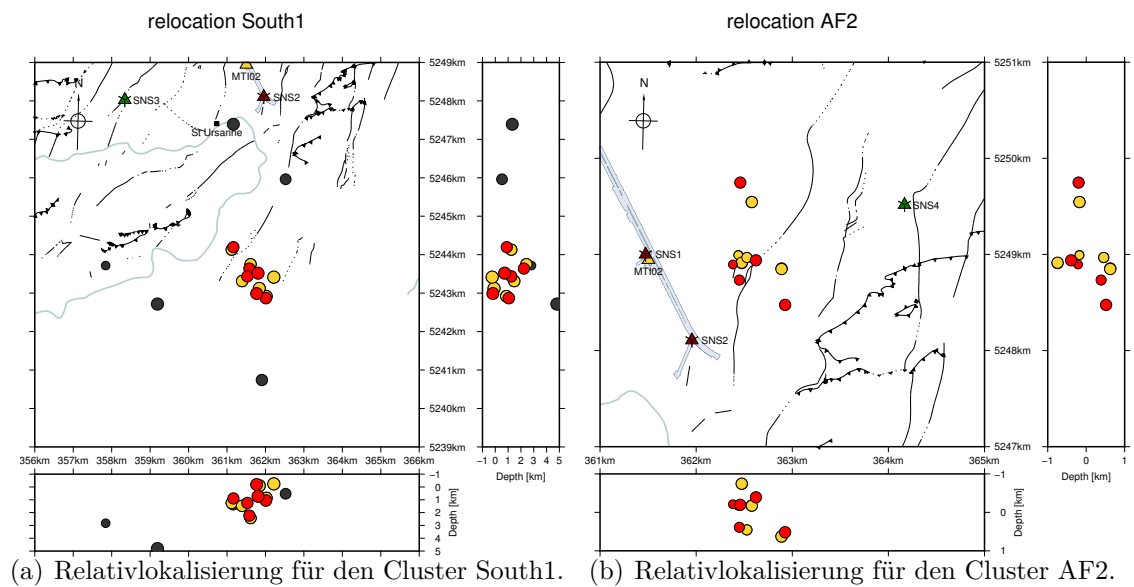


Abbildung 4.42: Relativlokalisierung von Clustern.

Kapitel 5

Zusammenfassung

Im April 2014 wurden zwei SNS im Felslabor Mont Terri (Schweiz) unterirdisch aufgebaut. Diese wurden im Sommer 2015 durch zwei weitere SNS an der Oberfläche ergänzt. Die damit erhobenen Daten wurden durch die von Stationen benachbarter Erdbebendienstleistungen (SED und RéNaSS) ergänzt. Insgesamt wurden Daten aus 18 Monaten ausgewertet, mit einer Datenverfügbarkeit von 98%, sowie im gesamten Zeitraum mindestens einem funktionsfähigen SNS. Die Lokalisierungsgenauigkeit wurde anhand des stärksten aufgezeichneten Ereignisses aus der unmittelbaren Umgebung (außerhalb der 18 Monate) untersucht. Zusätzlich wurden alle 11 vom SED registrierten Ereignisse im Umfeld (10 km) für die Genauigkeitsuntersuchung berücksichtigt. Mittels bestätigten Steinbruchsprengungen konnte die Genauigkeitsuntersuchung verbessert werden. Für die Magnitudengenauigkeit wurden neun Ereignisse untersucht, die sich ereigneten, als das Netzwerk vollständig aufgebaut war (September 2015). Ein Missweisung des Backazimuthbeams konnte in Richtung der Schichtorientierung beobachtet werden, diese betrug bis zu 165° für lokale Ereignisse. Dies stellt bei der komplexen Untergrundstruktur eine erhebliche Limitation für das beschriebene Verfahren dar. Durch den schrittweisen Ausbau des Netzwerks konnte die Genauigkeit von anfänglich lateral 1,27 km, sowie in der Tiefe von 2 km, auf lateral 425 m, sowie in der Tiefe auf 800 m verbessert werden. Bei der Magnitudenbestimmung mittels *NSM* ergaben sich Abweichungen von durchschnittlich 0,33 Magnitudeneinheiten, welche die ermittelte Magnitude unter der vom SED angegebenen lag. Im weiteren Umfeld (100 km) konnte die Anzahl lokalisierter Ereignisse um 40% erhöht werden, im Nahbereich (10 km) wurde die Anzahl verfünffacht im Vergleich zum kombinierten öffentlichen Bulletin von SED, RéNaSS und LED für diese Region. Der Magnitudenbereich konnte um mehr als zwei Größenordnungen nach unten erweitert werden (bis $M_L = -2,0$).

Die in dieser Arbeit erreichten Empfindlichkeiten entsprechen denen, die beim ersten im Bau befindlichen Endlager (Olkiluoto, Finnland) für das seismische Monitoring vorgege-

ben wurden. Sie sind ausreichend um Brüche im Meterbereich zu detektieren und damit Hinweise auf existierende aktive Verwerfungen, bei der Standortsuche, zu liefern. Die im Rahmen dieser Arbeit erreichte Lokalisierungsgenauigkeit muss für die Ortung und Überwachung möglicher Rissausbreitungen weiter verbessert werden. Einen Teil dazu trägt der Umstand bei, dass ein mögliches Endlager nicht in einer solch komplex gefalteten und überschobenen Geologie gebaut werden würde. Die Vorgaben verlangen eine auf mehrere Kilometer horizontal geschichtete Untergrundbeschaffenheit. In einer solchen Umgebung sind die Backazimuthbeams als Beitrag der optimalen Lokalisierung wesentlich zuverlässiger. Weiterhin würden die SNS an der Oberfläche in einem geringeren Abstand gebaut werden und damit die Genauigkeit im Zentrum des Netzwerks verbessern. Die Kombination aus Oberflächen- und Untertagestationen erwies sich als vorteilhaft, letztere sollten, auf Grund der nicht möglichen Wartbarkeit nach Verschluss, so lange wie möglich betrieben werden. Speziell im Zeitraum zwischen Bauende und Anfang der Einlagerung können sie, durch ihr sehr geringes Umgebungsrauschen, wertvolle Erkenntnisse ermöglichen und die Kalibrierung des Untergrundmodells unterstützen.

Die lokale Seismizität in der Umgebung des Felslabors ist überwiegend flach, annähernd die Hälfte der Ereignisse trat im Bereich des Basements auf. Neben der Absolutlokalisierung in HypoLine, siehe Kapitel 3.3.1 (*HypoLine*), wurden die Daten mit anderer Software bzw. anderen Methoden ausgewertet. Die mit HypoDD, siehe Kapitel C.1 (*HypoDD*), erzielten Ergebnisse waren auf Grund der Unähnlichkeiten der Wellenformen ($< 95\%$) wenig aussagekräftig, jedoch wurde eine Datenschnittstelle geschaffen. Eine Bestätigung der Aussagen konnte mit NonLinLoc, siehe Kapitel C.2 (*NonLinLoc*), erreicht werden. Sowohl die lateralen Gruppierungen, als auch die geringe Tiefe konnte verifiziert werden. Für die Verarbeitung der Daten mittels Self Organizing Maps erwiesen sich die Unterscheidungsmerkmale der Ereignisgruppierungen als unzureichend. Dies kann auf die geringen Signallaufzeiten zurückgeführt werden. Eine erfolgreiche Clusterung konnte mittels hierarchischer Sortierung von Kreuzkorrelationsdurchschnitten erreicht werden. Sowohl räumlich, als auch zeitlich, bestätigen sich die so ermittelten Gruppen. Zusätzlich konnte ein Sprengungsbulletin erstellt werden, basierend auf dem des SEDs, verifiziert durch die Verursacher, die Steinbruchbetreiber der näheren Umgebung.

Die schwächsten Ereignisse wurden entlang des Autobahntunnels lokalisiert und diesem zugeordnet. Somit wäre es ebenfalls möglich sich ausbreitende Risse in einem Endlagerbergwerk zu detektieren und lokalisieren, um zeitnah Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Nach den Lehren von Gorleben wird dies dank einem Endlager mit Reversibilität, zumindest in Deutschland, ermöglicht.

Kapitel 6

Diskussion

Zur sicheren Verwahrung hoch-radioaktiver Abfallstoffe werden derzeit fast ausschließlich unterirdische Endlagerbergwerke in Betracht gezogen. Die geologische Barriere durch das Deckgebirge ist die “technisch” einzig zuverlässige Möglichkeit um eine wirksame Abgrenzung zur Biosphäre über den geforderten Zeitraum von einer Millionen Jahren zu gewährleisten. Je nach natürlichem Vorkommen in den einzelnen Ländern werden unterschiedliche Wirtsgesteine in Betracht gezogen.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Überwachung dieser geologischen Barriere. Es können durch Wärmeentwicklung oder natürliche Seismizität Wegsamkeiten geschaffen werden welche die Wirksamkeit der Barriere beeinträchtigen. Vom damit einhergehenden Spannungsaufbau und -abbau eignet sich letzterer um mittels seismischer Methoden überwacht zu werden. Etwaige Wegsamkeiten die rein durch Lösungsvorgänge und ohne Änderungen am Spannungsfeld entstehen, seien hiervon ausgenommen. Ein mögliches Monitoring hat dabei vielfältige Anforderungen möglichst gut zu erfüllen:

- Detektionsvermögen
- Lokalisierungsgenauigkeit
- Optimale Installation und Wartbarkeit
- Zeitnahe Ergebnisse und möglichst geringe Investitionen für Standortvoruntersuchungen
- Anschaffungskosten
- Kosteneffizienz der Datenauswertung

Die in dieser Arbeit angewendete Methode *NSM* bezieht sich auf einen Bereich von $10\text{ km} \times 10\text{ km}$, während die zu überwachende Fläche eines Endlagers nur etwa einen Quadratkilometer beträgt, und erfüllt diese Erforderungen wie folgt:

- Detektionsvermögen: Es konnten Ereignisse mit einer Magnitude von $M_L = -2$ lokalisiert werden. Dies entspricht einer Bruchfläche im einstelligen Meterbereich.
- Lokalisierungsgenauigkeit: Für das vollständig ausgebaute Netzwerk ergibt sich ein Fehler von 425 m lateral und 800 m in der Tiefe. Ein hochauflösendes seismisches Monitoring ist für die permanente Überwachung eines Endlagers nötig, um Migrationen von Verwerfungen zu erkennen.
- Optimale Installation und Wartbarkeit: Die Integrität der geologischen Barriere kann von der Oberfläche aus beobachtet werden. Der Verzicht auf tiefe Bohrlöcher vermeidet eine aufwändige Abdichtung dieser künstlich geschaffenen Wegsamkeit. Durch den Einsatz oberflächennaher Messstandorte ist der Zugang, Austausch und Wartung der Messgeräten jederzeit gegeben. Die Instandhaltung von Sensoren innerhalb des Endlagers kann spätestens nach dem Verschluss nicht mehr gewährleistet werden.
- Zeitnahe Ergebnisse und möglichst geringe Investitionen für Standortvoruntersuchungen: Durch die hohe Genauigkeit und den geringen Installationsaufwand eignet sich *NSM* zur Datenerhebung bei Standortvoruntersuchungen. Ein wesentlicher Punkt ist hierbei die rechtzeitige Identifikation vorhandener tektonischer Verwerfungen sowie deren Aktivität. Dadurch kann die üblicherweise durchgeführte 3D Seismik an einem möglichen Standort eines Endlagers für radioaktive Abfallstoffe durch eine zeitliche Entwicklung ergänzt werden. Regionalnetze sind für eine derart kleinräumige Überwachung nicht ausgelegt, daher sind Informationen bezüglich der Hintergrundseismizität vorab nur eingeschränkt vorhanden. Zusätzlich können aktive Verwerfungen, die nicht durch einen sichtbaren Versatz in der 3D Seismik auflösbar sind, erkannt werden.
- Anschaffungskosten: Die verwendeten Messgeräte zeigten in Voruntersuchungen sowie im Betrieb eine für das Hintergrundrauschen gute Empfindlichkeit. Oberhalb von 10 Hz könnten sich in einer vergleichbaren Rauschumgebung hochwertigere Sensoren lohnen.
- Kosteneffizienz der Datenauswertung: Durch den Einsatz von Sonogrammen kann die Effizienz der Datenanalyse erheblich verbessert werden. Die durch manuelles

Screening gefundener Ereignisse können anschließend mittels Kreuzkorrelations- und Sonogrammdetektoren automatisiert im gesamten Datensatz gesucht werden (letzteres ist nicht Teil dieser Arbeit).

Nanoseismic Monitoring kann daher sowohl durch die Zeitersparnis bei der Standortsuche bzw. einem Mehrgewinn bei längerer Messung, als auch bei der permanenten Überwachung von Endlagern, einen Beitrag zur Sicherheit leisten, vorausgesetzt das Untergrundmodell ist hinreichend horizontal geschichtet.



Kapitel 7

Ausblick

Das im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Messnetzwerk wird insgesamt für mindestens 10 Jahre betrieben. Innerhalb dieses Zeitraums können zusätzlich jahreszeitliche Effekte untersucht werden. Weiterhin können Schwankungen in den Aktivitäten sowie neu auftretende Verwerfungen registriert werden. Eine verbesserte Relativlokalisierung würde die Bewertung der Verwerfungen verbessern. Die Ergebnisse fließen bereits in weitere Projekte ein. Sie werden innerhalb des Mont Terri Projekts weiterverarbeitet. Martinus Abednego entwickelte Methoden um den Ereignissen, mittels Ähnlichkeitsanalyse zu bekannten Bruchmechanismen, eine wahrscheinliche Herdflächenlösung zuzuordnen (Abednego et al., 2018). Extern werden die Daten von Marie Luyet genutzt. Sie untersucht die Erdbebenserie im 30 km entfernten Biel (Luyet, 2017). Mit dem in 5 – 9 km Entfernung (zu den SNS) geplanten Geothermieprojekt „Haute-Sorne“ der Geo Energie Suisse haben bereits Diskussionen über die Nutzung von Synergieeffekten stattgefunden.

Verbesserungen in der Lokalisierungsgenauigkeit können durch ein besseres lokales Untergrundmodell erreicht werden. Dieses sollte die geeigneten Strukturen im Bereich des Tunnels berücksichtigen und präzise abbilden. Das im Rahmen dieser Arbeit aufgebaute Messnetzwerk ergab sich durch die Faktoren Standortqualität, azimutale Abdeckung sowie der Apertur der Kleinarrays. Die azimutale Abdeckung ist abhängig vom Zugang zu Grundstücken, die Apertur von unterirdisch existierenden Stollen. Im Falle eines Endlagers sollten die ersten beiden Faktoren (Standortqualität, azimutale Abdeckung) eine wesentlich höhere Gewichtung erfahren. Für mögliche unterirdische Stationen sollten Standorte bereits in der Planungsphase berücksichtigt werden.



Anhang A

Mont Terri research rock laboratory (Switzerland): Pilot project for assessing the seismic impact on a deep geological disposal for radioactive wastes

Submitted manuscript for EUROCK 2015 & 64th Geomechanics Colloquium. Schubert (ed.) ©ÖGG

Patrick Blascheck, Institute for Geophysics Universität Stuttgart, Stuttgart
Christophe Nussbaum, Federal Office of Topography swisstopo, Wabern, Switzerland
Manfred Joswig, Institute for Geophysics Universität Stuttgart, Stuttgart, Germany

ABSTRACT: Choosing an appropriate site for a radioactive waste repository is one of the major challenges for the nuclear power community and their respective governments. Knowledge about local fault zones is important as they are a possible source of earthquakes and pose a threat to safety and security of repositories and their dangerous content. Nanoseismic Monitoring decreases the time required for first hints and mapping of active fault zones from decades to the scale of months and years.

The rock laboratory at Mont Terri (Switzerland) is the Swiss research test site to evaluate the suitability of Opalinus Clay as a host rock for a radioactive waste repository. We have conducted measurement campaigns of over eight weeks total duration. 19 earthquakes were found additionally to the bulletins of earthquake services. We identified nine earthquakes with a magnitude range of $M_L = -0.8$ to -1.8 in the vicinity of 4 km of the rock laboratory.

A.1 Introduction

A.1.1 The Mont Terri Rock Laboratory

The Mont Terri Underground Rock Laboratory is placed in the Opalinus Clay, a rock formation consisting mainly of incompetent, silty and sandy shales, deposited around 175 Ma ago (Aalenian/ Toracian). Opalinus Clay has become a formation of major importance since it has recently been chosen as host rock for high-level nuclear waste in Switzerland (Bundesamt für Energie BFE, 2011). Argillaceous formations are widely considered as favorable host rock formations for radioactive waste disposal. These formations typically show very suitable conditions for radioactive waste confinement as they are characterized by an extremely low hydraulic conductivity, low diffusion coefficients and a good retention capacity for radionuclides. Since 1996 up to 130 experiments have been carried out at the Mont Terri Underground Rock Laboratory to investigate the confinement properties of Opalinus Clay Bossart und Thury (2008, for a review see). The major aims of the international Mont Terri research project are to investigate and analyze the hydrogeological, geochemical and rock mechanical properties of argillaceous formations, in this case the Opalinus Clay. The Federal Office of Topography (swisstopo) is responsible for the operation of the facility and directs the Mont Terri project. Fifteen organizations from Belgium, Canada, France, Germany, Japan, Spain, Switzerland and the USA, which are all considering clay formations as potential host rocks for deep geological disposal of radioactive waste, are involved in the underground (in situ) experiments. Various other countries worldwide are also investigating argillaceous formations as potential repository host rocks. More recently, the Opalinus Clay are also studied as reference caprock analog in the context of the geological storage of CO₂.

The underground rock laboratory is located at St-Ursanne (Canton of Jura, North-Western Switzerland). The research facilities are located at a depth of around 300 meters below the Earth's surface and are accessed by the security gallery of the Mont Terri tunnel of the A16 motorway, which passes through the Jura Mountains. The research galleries in the Opalinus Clay layer have a total length of around 600 meters. The rock laboratory is located entirely in the Opalinus Clay formation, which has an apparent thickness of 160 m and a true thickness of 130 m.

A.1.2 Tectonic Setting

The Mont Terri Underground Rock Laboratory has been excavated in the southern limb of the Mont Terri anticline (Figure A.1). This anticline developed at the junction between the frontal part of the Jura thrust-and-fold belt and the Rhine-Bresse transfer zone, near the Southern border of the Rhine Graben. The cross-section shown in Figure A.1 follows the Mont Terri motorway tunnel, which is sub-parallel to the NNW direction of thrusting. The Mont Terri anticline is generally regarded as a fault-bend fold (Freivogel und Huggenberger, 2003) or as shear fault-bend fold (Nussbaum et al., 2011), but has been recently reinterpreted as a detachment fold which was then cut by a ramp leading to a complex pattern characterized by an overturned forelimb (Caer T. et al., 2014).

The Mont Terri area is located along the Northwestern edge of the Jura, where the internal

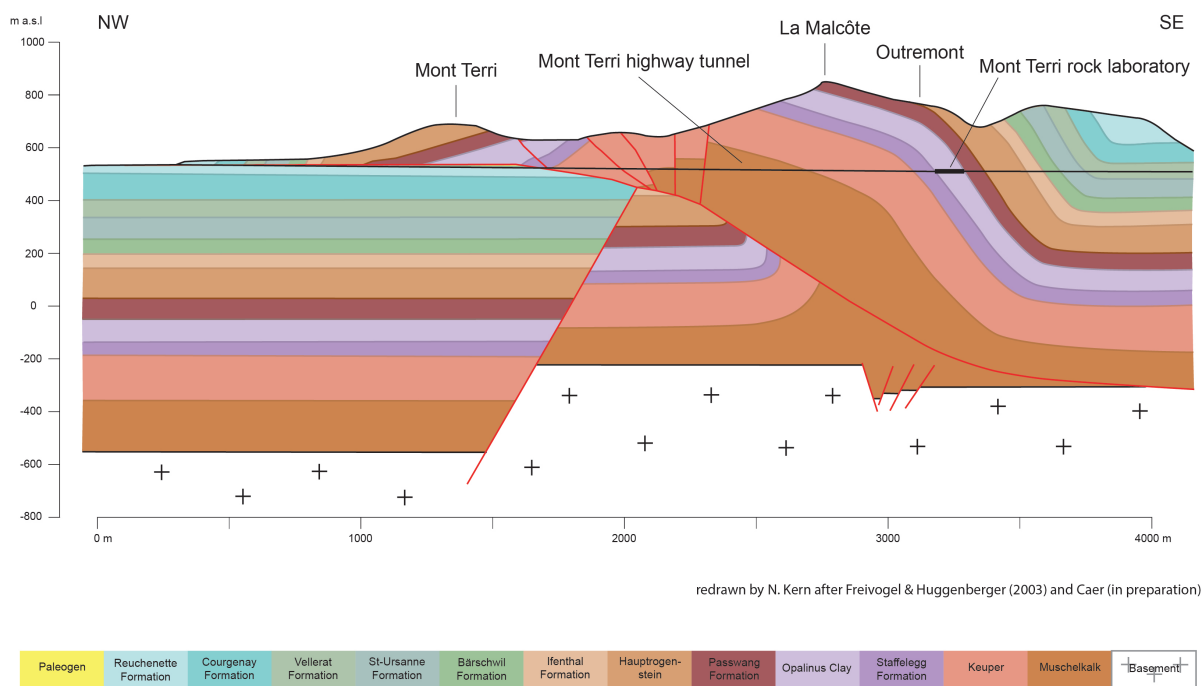


Abbildung A.1: Geological cross-section through the Mont Terri anticline including location of the Mont Terri Rock Laboratory (modified after Caer T. et al., 2014, submitted).

Jura is thrust over the tabular Jura. In this zone, the deformation front follows more or less the Rhine-Bresse transfer zone and is adjacent to the southern border of the Rhine Graben. Due to this particular position, the pre-existing crustal discontinuities NNE-SSW or WSW-ENE trending may be responsible for forced folds, sinuous folds and segmentation by strike slip faults during the Mio-Pliocene compressive phase. Recent seismicity could be related to these deep structures. The neotectonic activity is, to some extent, confirmed by the occurrence of earthquakes predominantly in the basement. Focal mechanisms indicate a strike-slip regime with a slight tendency towards extension (Kastrup et al., 2004b). More recently, the focal mechanism of the Rigney Earthquake (23 February 2004) indicated reverse faulting (compression) in the basement with a focal depth of 10 km and a moment magnitude $M_w = 4.5$ (SED, 2016). This earthquake probably occurred along an inherited WSW-ENE-striking fault bordering a Permo-Carboniferous Graben. These observations collectively suggest that the activity of the Jura belt has not completely ceased but rather continues at a moderate rate.

A.1.3 Background Seismicity

The SED operates one station (BOURR) near the laboratory (5 km, Figure A.2). The other next closest broadband stations are in a distance of at least 30 km. 37 earthquakes are listed in the ECOS-09 bulletin (SED, 2016) since 1960 within the vicinity of the laboratory with magnitudes in the range of $M_L = 1.79 - 3.2$ (Figure A.2). On 28th March

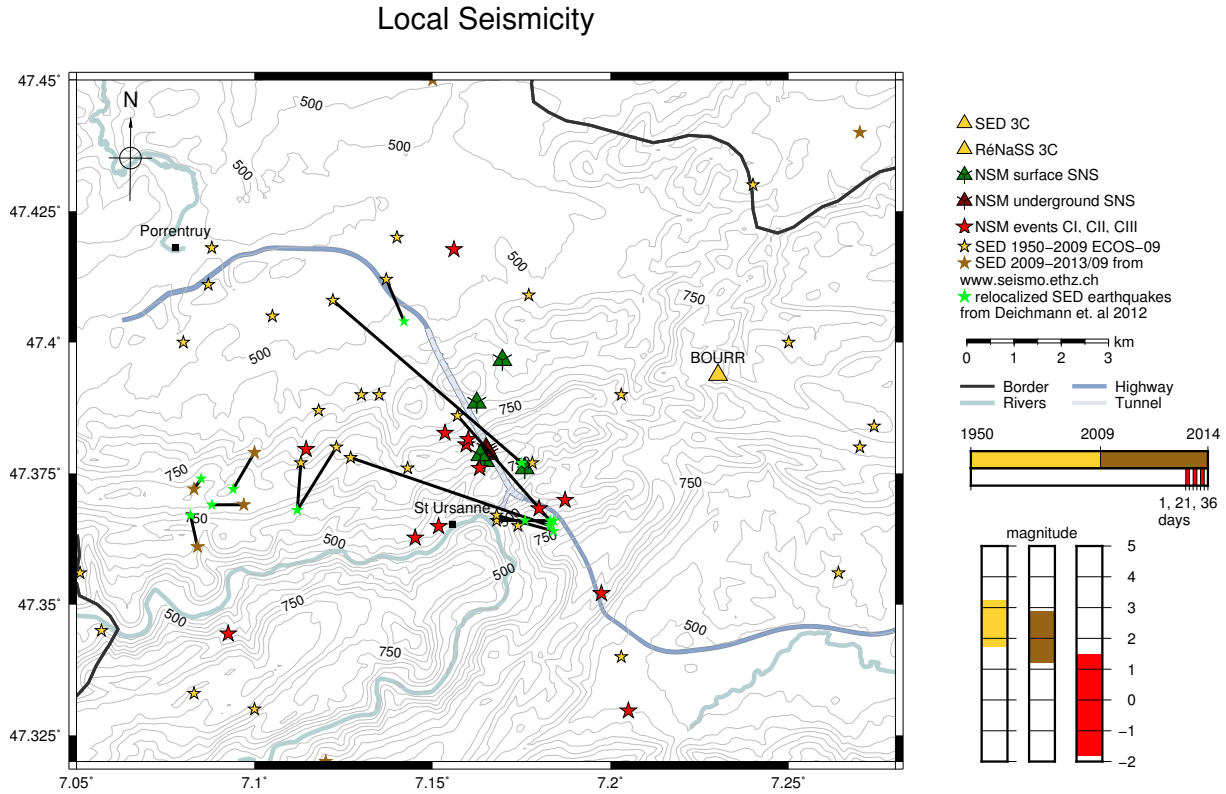


Abbildung A.2: Contour map with local earthquake activity. Bulletin provided by SED (2016) ECOS-09 (yellow stars) or homepage (brown stars), relocated earthquakes from Deichmann et al. (2012) (green stars) are connect to the bulletin locations (black lines), earthquake located by Nanoseismic Monitoring (red stars).

2000, five of these earthquakes occurred within two and a half hours. No other temporal grouping was observed. The errors on location ($< 5 - 10$ km) and depth ($> 5 - 10$ km) are too large to connect them to known faults. These Events are shown in the context of the relocation done by Deichmann et al. (2012). Figure A.2 shows the new locations (green stars) and a clustering of events can be observed, but the data is still too sparse to answer the question which fault is active.

A.2 Nanoseismic Monitoring

Nanoseismic Monitoring (NM) is a passive seismic monitoring technique. It combines usage of multiple mini arrays (SNS-seismic navigation system) of four seismometers and software designed for evaluating SNS data down to signal to noise ratios of 1. Event detection is performed by using (super-) sonograms (Sick et al., 2012). Evaluation combines classic sparse network techniques (ts-tp circles and tp-tp hyperbolae) with array techniques (back azimuth and apparent velocity).

NM was developed to fulfill the political requirements to detect earthquakes as little as

$M_L = -2.0$ for the comprehensive nuclear test ban treaty organization of seismic aftershocks of possible nuclear bomb tests (Joswig (2008) and Sick et al. (2012)). It was established and first applied in its current form to detect sinkholes in Israel (Wust-Bloch und Joswig, 2006). It then became “in house” technology and was improved as well as developed further (Joswig, 2008). The method was tested on active fault mapping (Häge, 2009), was used for an emergency response team for aftershock monitoring (Häge und Joswig, 2009c), and verified by cooperative measurements at an established high precision local network (Häge und Joswig, 2009b). The range of applications was extended when applied on slow creeping mudslides (Walter und Joswig (2008), Walter und Joswig (2009) and Walter et al. (2011)). The precision of relative location was shown at the Basel hydraulic stimulation (Häge et al., 2013). A comprehensive guide and a comparison of other techniques to NM can be found in (Joswig, 2008).

A.3 Conducted Measurements

The first campaign (1 day) of three was intended to get initial noise values in order to estimate detection limits. The second campaign during the Christmas break 2012/2013 recorded three weeks in parallel to the HLS (Hydrostatic Leveling System) and the STS

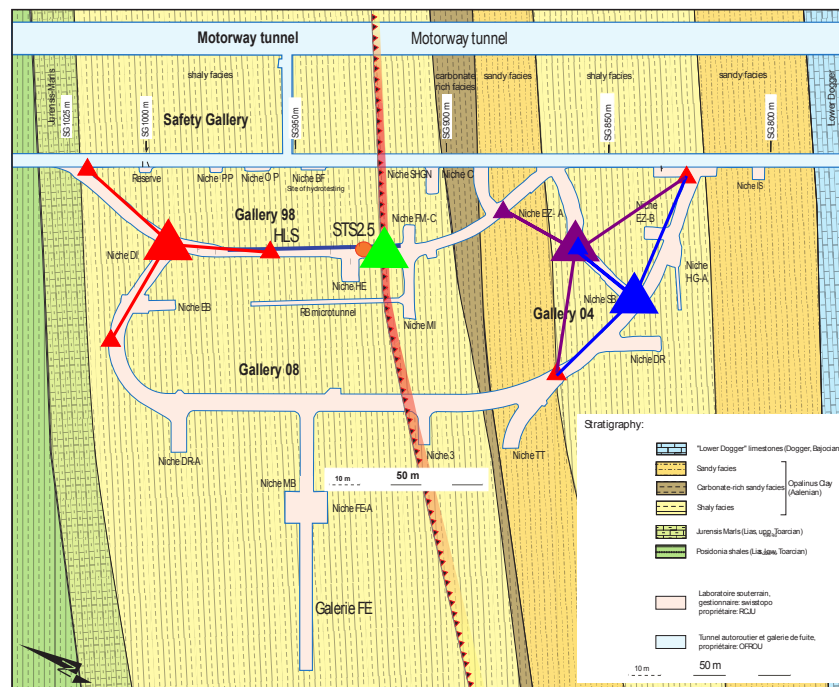


Abbildung A.3: The laboratory, main fault (orange triangle line) and seismometer locations are shown on a structural map (modified from Nussbaum et al. 2011). The larger triangles are 3C, the smaller ones the 1C. green: all campaigns, red: campaign 2&3, blue: campaign 2, purple: campaign 3.

2.5 seismometer to measure several orders in the frequency range of seismic noise from 250 Hz down to the “quasi static” range (Meier et al., 2013). The third campaign addressed the monitoring of the vicinity of the laboratory by a two-week parallel recording of surface and underground stations. For the summer break, fewer activities were expected inside the laboratory, where the underground stations were left in place for an additional three weeks. The locations of seismometers during the campaigns are shown in Figure A.3 for inside the laboratory and in Figure A.4 for all SNS.

Location of Stations

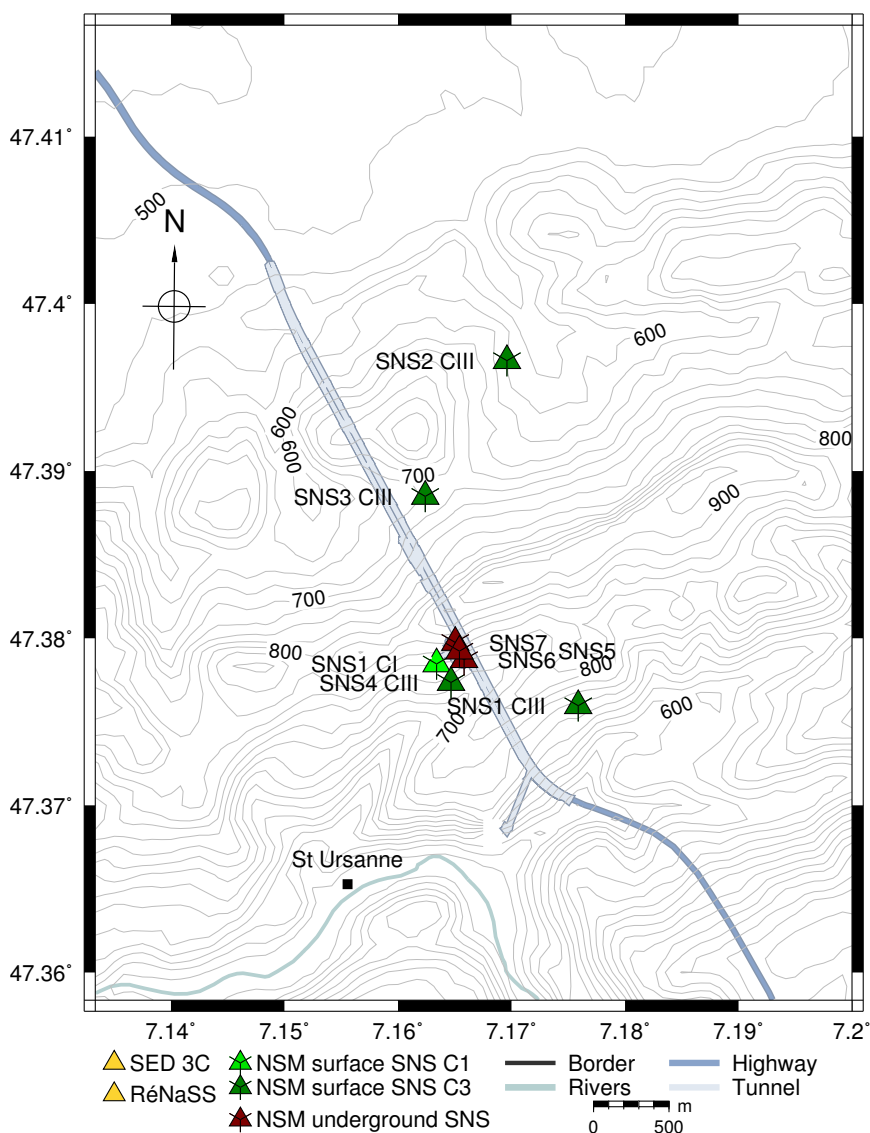


Abbildung A.4: Location of all SNS during all campaigns, underground SNS locations remained basically unchanged for details see Figure A.3.

During all campaigns, GPS timing signal was not available inside the laboratory. Events were evaluated in a relative scheme where partial results were compiled to an overall time independent solution disregarding a true onset time. These partial results consist of ts-tp circles and tp-tp hyperbolae with picks only from one digitizer, as well as the back azimuth and slowness determination. Time independent partial results were compared in solution space across all digitizers to get an overall solution. Depth determination failed for this approach.

Lennartz short period seismometers were used for all SNS. Lennartz M24 data loggers are used in SNS 5-7. DMT Summit M Hydra data loggers are used in SNS 1-4. The used digitizers perform significantly different at low seismic background noise (Widmer-Schnidrig und Schwaderer, 2013). Each mini array consists of a central 3C and three 1C seismometers. 1C seismometers are usually arranged in an equilateral triangle in a distance of about 100 m to the central station. As space is limited inside the laboratory and on the surface, for a close to horizontal setup of the seismometers, this distance was reduced to 50 m on the surface and 40 m inside the laboratory (Figure A.3). Continuous measurements were performed at 500 Hz sampling rate.

A.4 Results

A.4.1 Detection Limit Estimation

For each campaign, we estimated the detection threshold level. They were calculated for a signal to noise ratio of 1 using the I95 value (Baisch, Stefan Fritschen, R. Groos, J. Kraft, Toni Plenefisch, T. Plenkers, K. Ritter, J. Wassermann, 2012, , filtered 5-40 Hz). A sliding one-hour window was used to determine hourly thresholds as shown in Figure A.5 for campaign 3. The difference between satellite and the central stations are marginal, therefor only the ranges of the vertical central traces are shown for surface and subsurface seismometers. Nighttime and weekends show the expected reduction of noise. To calculate an overall minimum the lowest one hour value was used. In the first campaign, only Hydra digitizers were deployed and the noise measurements show low values for the underground station during the night. This was expected due to lower traffic in the adjacent motor way tunnel and fewer activities in the laboratory. The surface SNS was placed next to a barn, hence large noise from machinery and cattle. Therefor we calculated that the underground station can detect and locate an event of $M_L = -2.0 \pm 0.5$ at 3 km hypocentral distance. In the second campaign, only M24 digitizers were used. The detection limit for these stations was $M_L = -1.6 \pm 0.5$ during nighttime and $M_L = -1.0 \pm 0.5$ during the day in 3 km distance. In campaign 3 the detection limit for the surface stations (Hydra) was $M_L = -2.0 \pm 0.5$ during nighttime as in CI and $M_L = -0.5 \pm 0.5$ during the day. The subsurface stations (M24) performed as in CII, better than the surface stations during the day and vice versa at night as shown in Figure A.5. Widmer-Schnidrig und Schwaderer (2013) as well as experience from the first campaign tell us that the digitizer used limited the subsurface performance.

A.4.2 Global and Regional Seismicity

For each campaign, a bulletin comparison was conducted using data from SED (2016) and GFZ (2013). This allowed for a check on the time drift of the underground stations and ensures, other than that, proper functionality. During the first campaign, no events were recorded. The second campaign yielded 21 events in three weeks, the third 50 in five weeks. The slight increase could be caused by the additional surface stations as 26 of these events were detected during the first, 24 in the second part, although the second part was one week longer and the bulletin count was greater (148 events during the first, 370 events during the second part). The difference in detections is not significant. For the first part three events were detected only by surface stations, both detected the other events, if both surface and subsurface SNS were running. The difference in event count can be resolved by looking at the noise values of the campaigns with regard to the used digitizers and their position (surface/ underground). A correlation of magnitude, distance and detection threshold is shown in Figure A.6. The threshold values are extended in distance by using the distance correction curves from Wust-Bloch und Joswig (2006). Magnitudes below 300 km are given as M_L , above no correction for other magnitude scales is applied.

A.4.3 Local seismicity

A total of 19 events were detected and localized that were not included in the bulletin. These events are shown in Figure A.2 in the context of historical seismicity since 1950 and the relocated earthquakes (Deichmann et al., 2012). Earthquakes in the vicinity of the laboratory are not uncommon but have been -so far- not detected at magnitudes

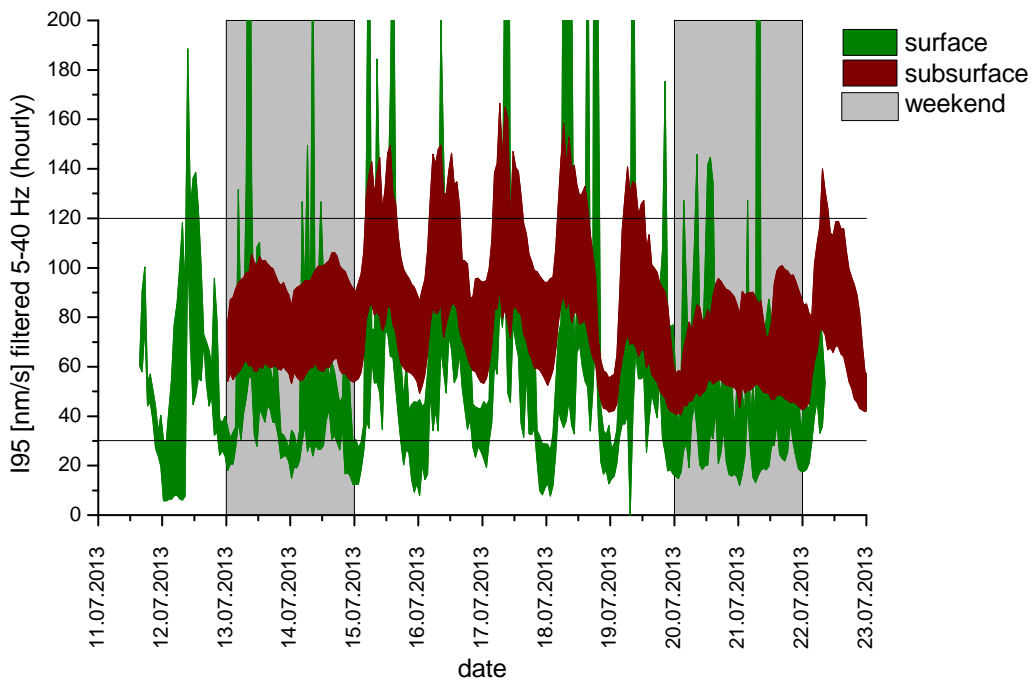


Abbildung A.5: Noise range of I95 values for surface and subsurface stations during CIII.

lower than $M_L = 1.7$. The latter is not surprising if the station distribution of the area is recalled (see Section 1.3) with distances to the next closest stations of > 30 km. Out of these 19 events nine are rather close to Mont Terri, four of them with a magnitude of $M_L < -0.9$ were located inside Mont Terri. Depth determination was limited due to the mentioned lack of GPS signal for the underground SNS. Nevertheless, local earthquake activity was observed, but responsible faults could not be identified, yet. Although the main fault was intensely monitored with four seismometers (only the center one indicated in Figure A.3) along the 2 m tunnel intersecting it, no close by activity was observed. Magnitudes observed at this SNS do not deviate significantly from other SNS, as we would expect if the source were within this fault. Further studies are currently in progress.

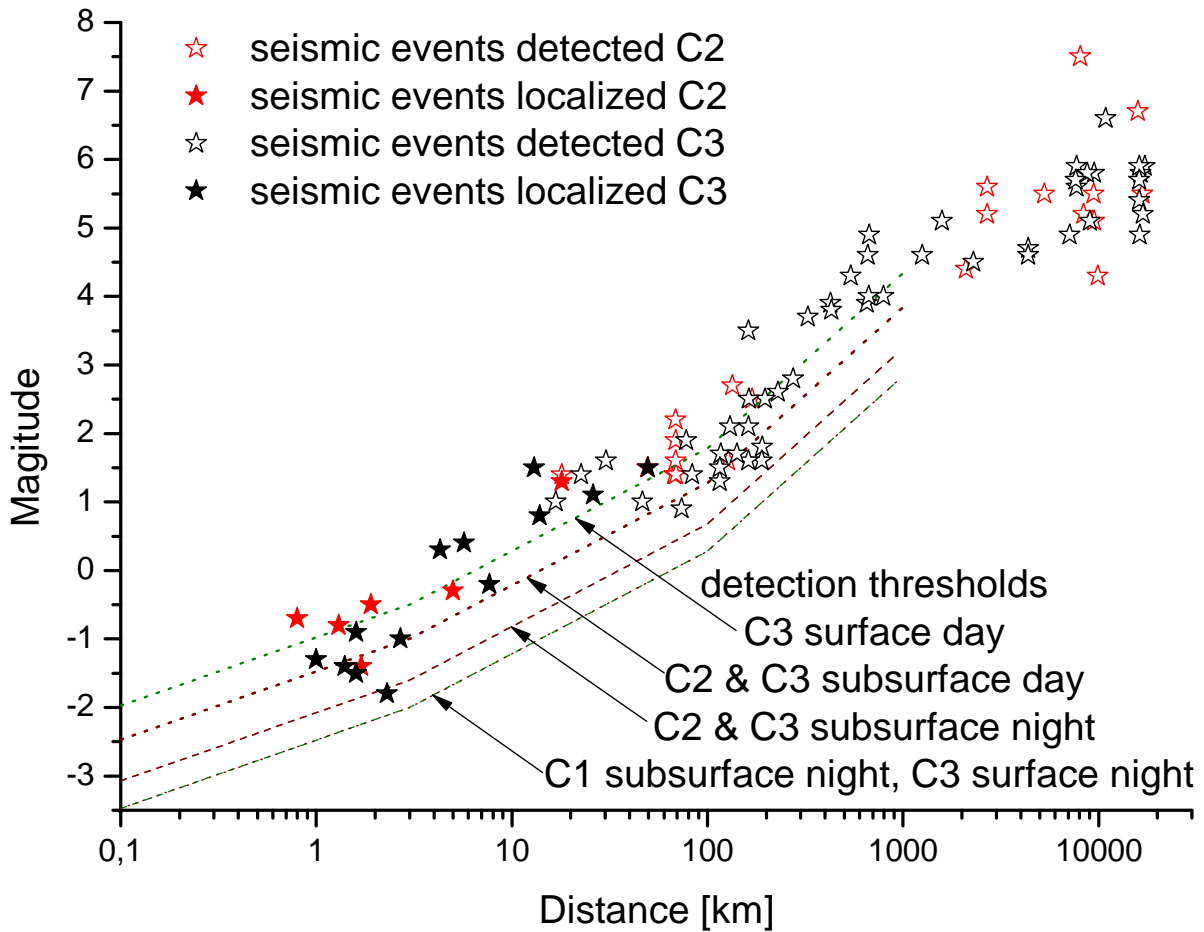


Abbildung A.6: Located and detected events of each campaign. Lines show the detection threshold values.

A.5 Conclusions

We were able to show that Nanoseismic Monitoring (NM) is capable of detecting and locating earthquakes in the vicinity of Mont Terri. The second campaign of 3 weeks yielded 4 seismic events within 3 km distance of the laboratory, the third campaign of 5 weeks 5 seismic events within 4 km (see Figure A.2). Two events of the latter are close (< 500 m) to the laboratory. All events had a magnitude of $M_L < -0.9$ and can be related to Mont Terri. At this rate, a permanent monitoring would result in over 50 events per year allowing for a stable statistics in terms of Gutenberg-Richter relation, b-value determination and resolving fault zones. NM is suitable to answer these questions on the scale of several kilometers. Some of the local detected events are visible on the SED station BOURR (in 5 km distance), but are not listed in their bulletin. On the other side, an acoustic emission network would not be able to resolve the seismicity around the laboratory and the whole fault zone. “Nanoseismic Monitoring fills the gap” (Joswig, 2008) for small-scale networks and event location and detection in environments with multiple and irregular noise sources.

A.6 Outlook

More and more precise data is required to further study the connection between events and fault zones as well as their source. Therefore we are currently installing a permanent network of four SNS. Two underground SNS (1 km apart) are up and running since April/-May with proper GPS supply. The installation of the surface SNS is ongoing and shall be finished April 2015. The SED installed additional stations in May 2014 (MTI01/2/3) inside and above of the laboratory.

Acknowledgements

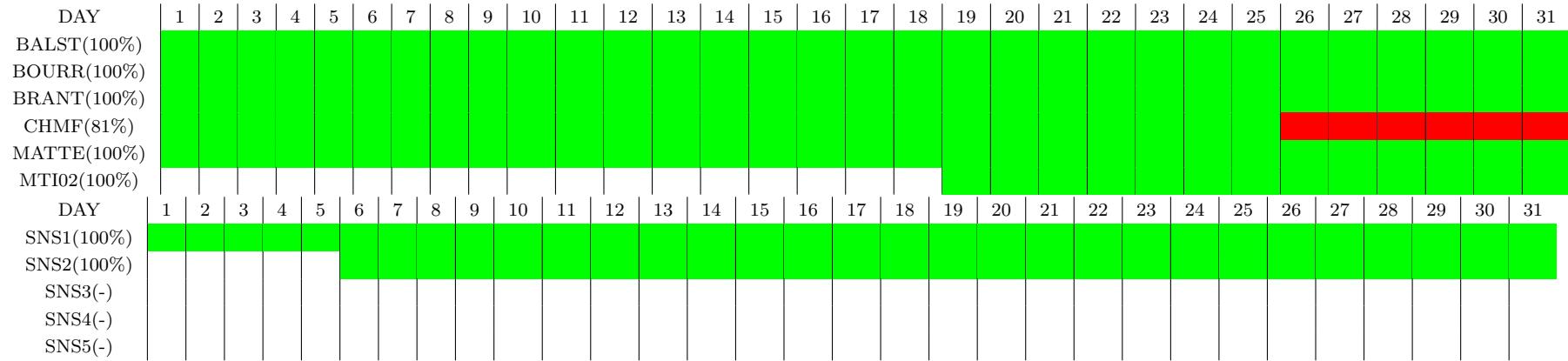
We thank Nagra and Swisstopo for funding this feasibility study, the latter also for funding the upcoming permanent network as well as their staff T. Theurillat and A. Irmingier for technical support. E. Claar, U. Schwaderer, B. Sick and G. Mokolke are acknowledged for their field assistance.

Anhang B

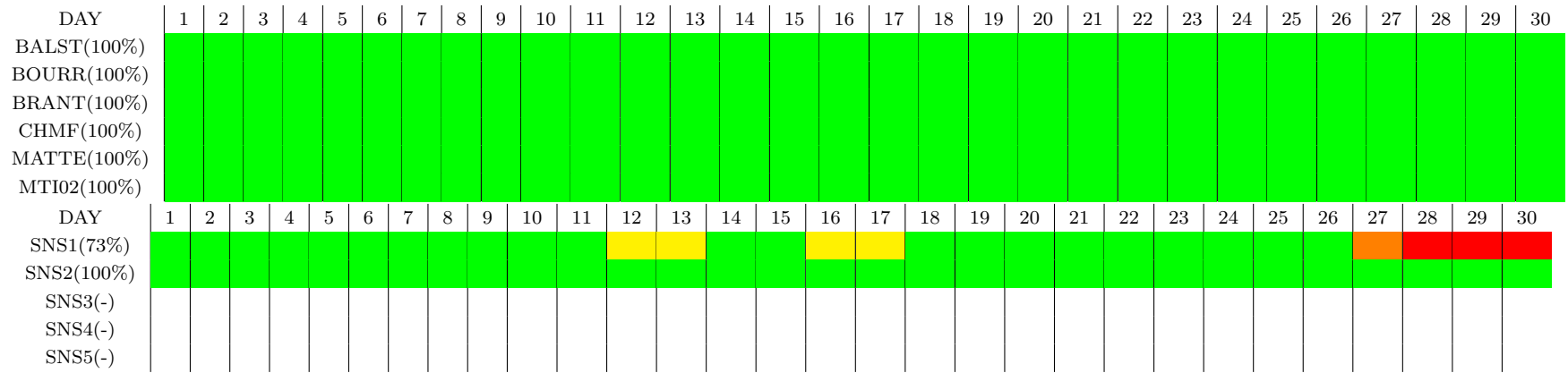
Datenverfügbarkeit

Die folgenden Grafiken geben eine Übersicht über die Datenverfügbarkeit aller Stationen. Für die prozentuale Verfügbarkeit werden nur vollständige Tage gewertet. Dabei wird überprüft, ob die Anzahl und Größe der Dateien dem zu erwarteten Wert pro Tag entspricht (grün). Weicht diese signifikant ab, wird der Tag als unvollständig gewertet (orange), bei Ausfällen von mehr als 50% wird der Tag in rot dargestellt. Eine kombinierte Übersicht über alle Monate gibt Tabelle B.1. Später aufgebaute Stationen werden erst ab ihrem Startdatum berücksichtigt. Die für externe Stationen angegebenen Werte dienen lediglich zur Orientierung, Daten wurden einmalig am Folgetag abgerufen, Datenlücken nicht gezielt geschlossen, im Gegensatz zu den eigenen Stationen.

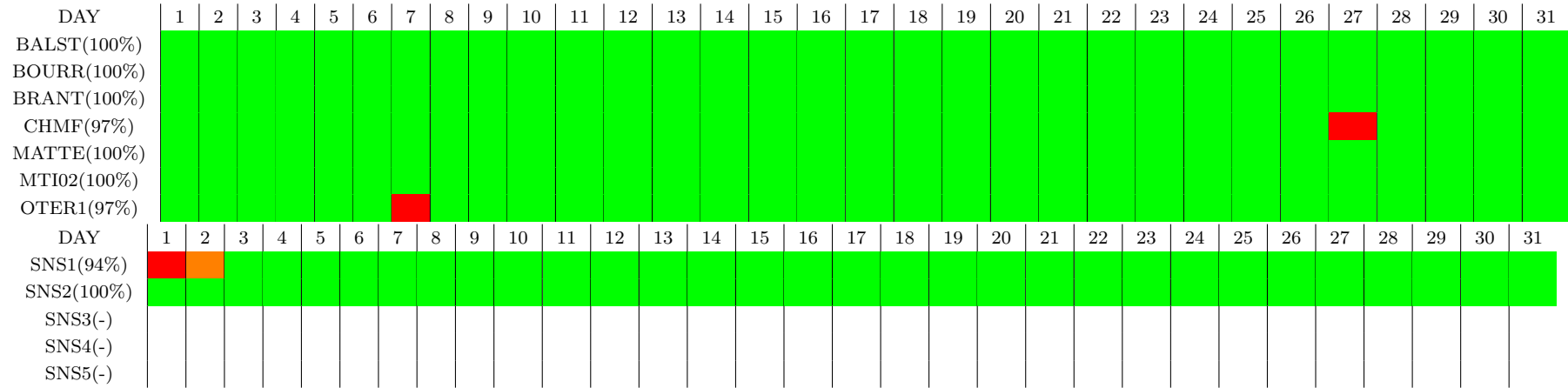
2014, 05



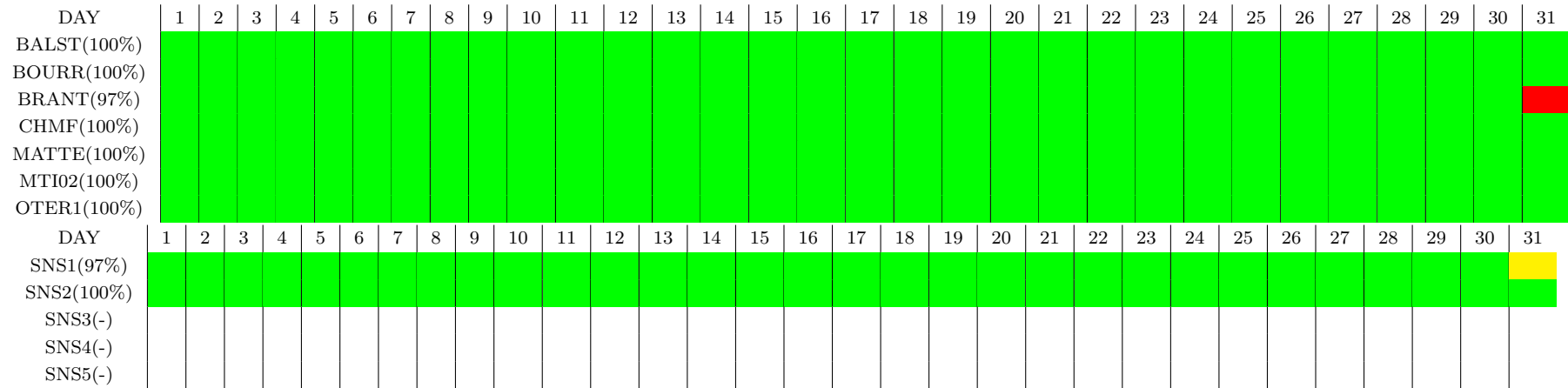
2014, 06



2014, 07



2014, 08



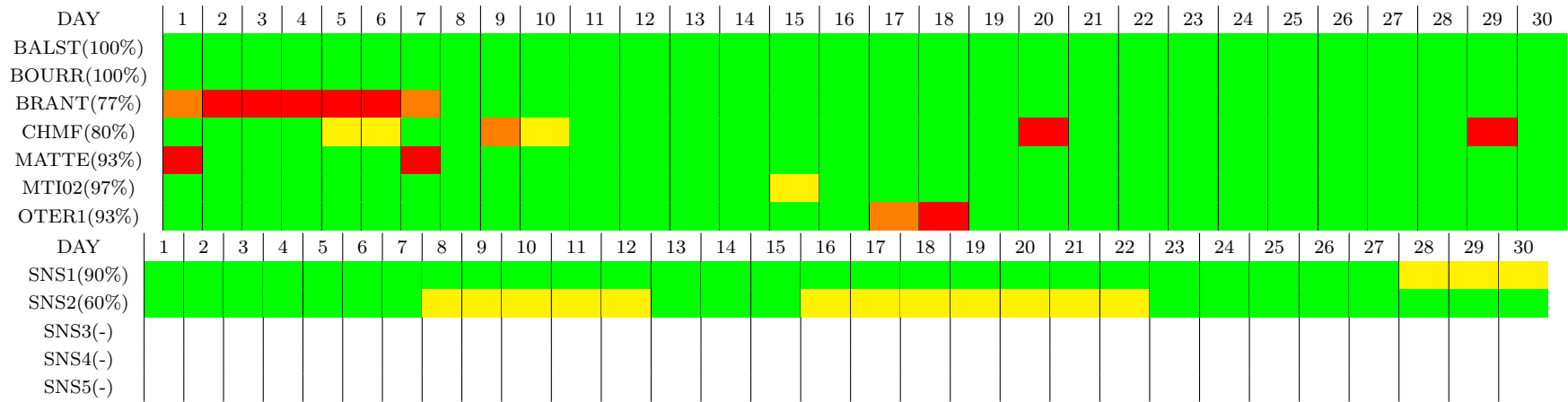
2014, 09

DAY	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30								
BALST(100%)	Green																																					
BOURR(100%)	Green																																					
BRANT(100%)	Green																																					
CHMF(100%)	Green																																					
MATTE(100%)	Green																																					
MTI02(100%)	Green																																					
OTER1(90%)	Green							Red		Red		Green																										
DAY	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30								
SNS1(100%)	Green																																					
SNS2(100%)	Green																																					
SNS3(-)	Empty																																					
SNS4(-)	Empty																																					
SNS5(-)	Empty																																					

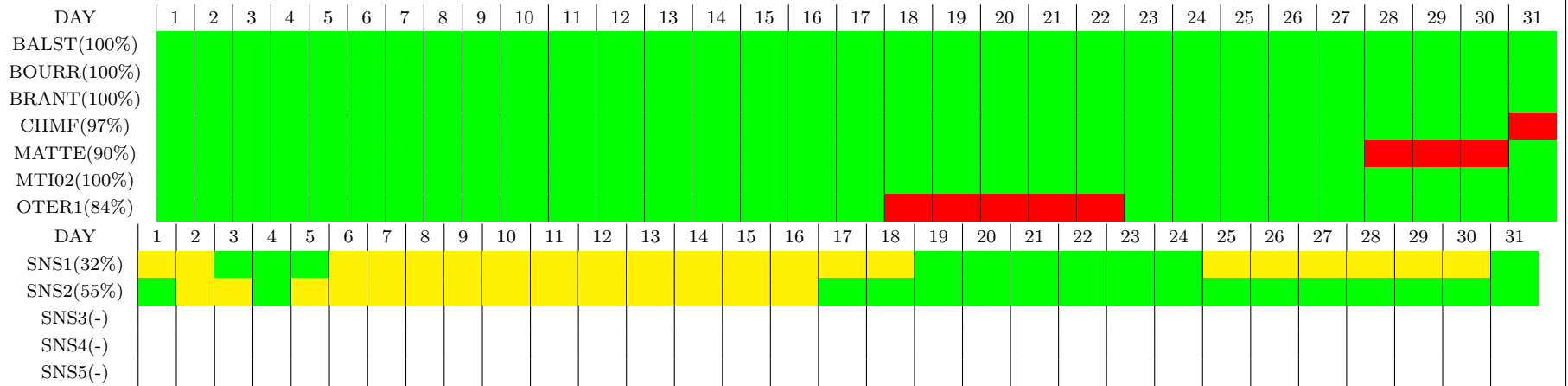
2014, 10

DAY	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31										
BALST(100%)	Green																																								
BOURR(100%)	Green																																								
BRANT(100%)	Green																																								
CHMF(94%)	Green																								Red		Green														
MATTE(100%)	Green																																								
MTI02(100%)	Green																																								
OTER1(74%)	Green								Red								Green																								
DAY	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31										
SNS1(100%)	Green																																								
SNS2(100%)	Green																																								
SNS3(-)	Empty																																								
SNS4(-)	Empty																																								
SNS5(-)	Empty																																								

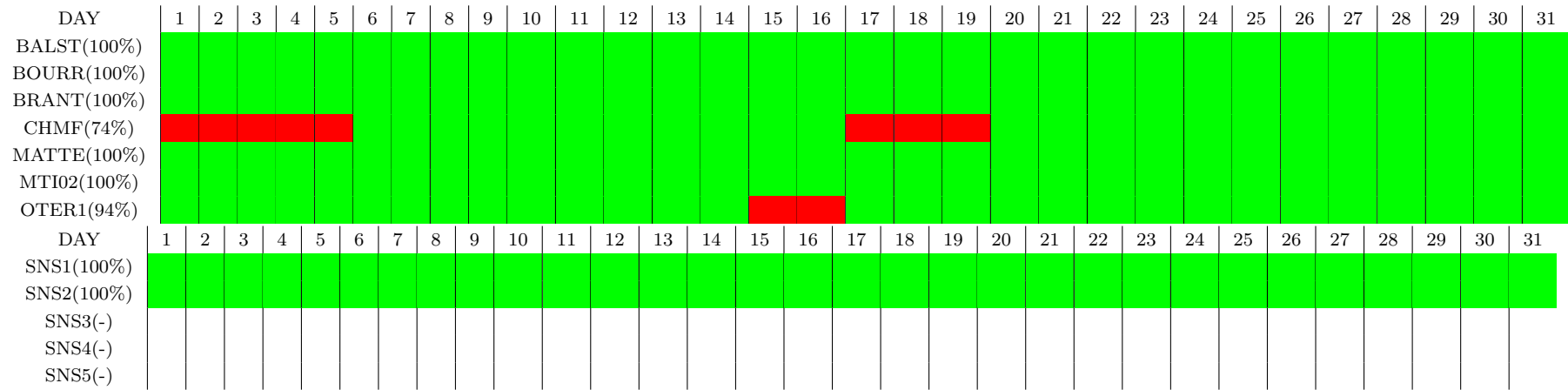
2014, 11



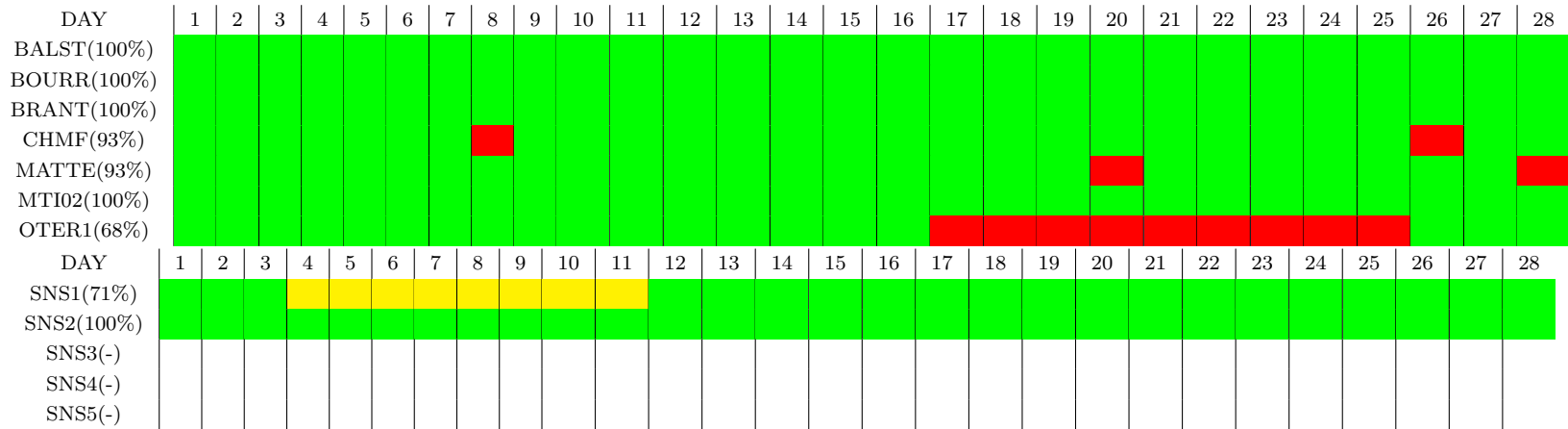
2014, 12



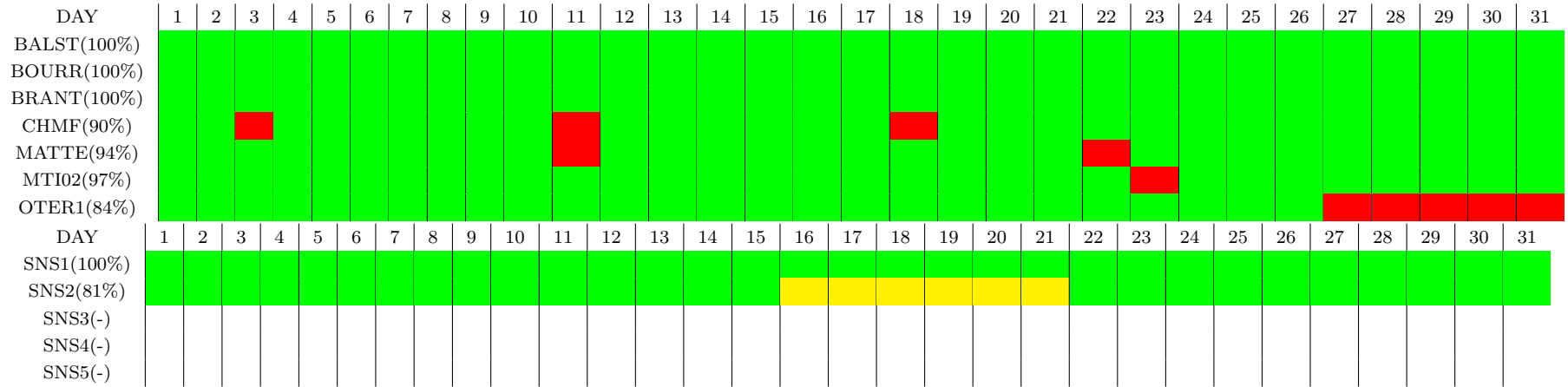
2015, 01



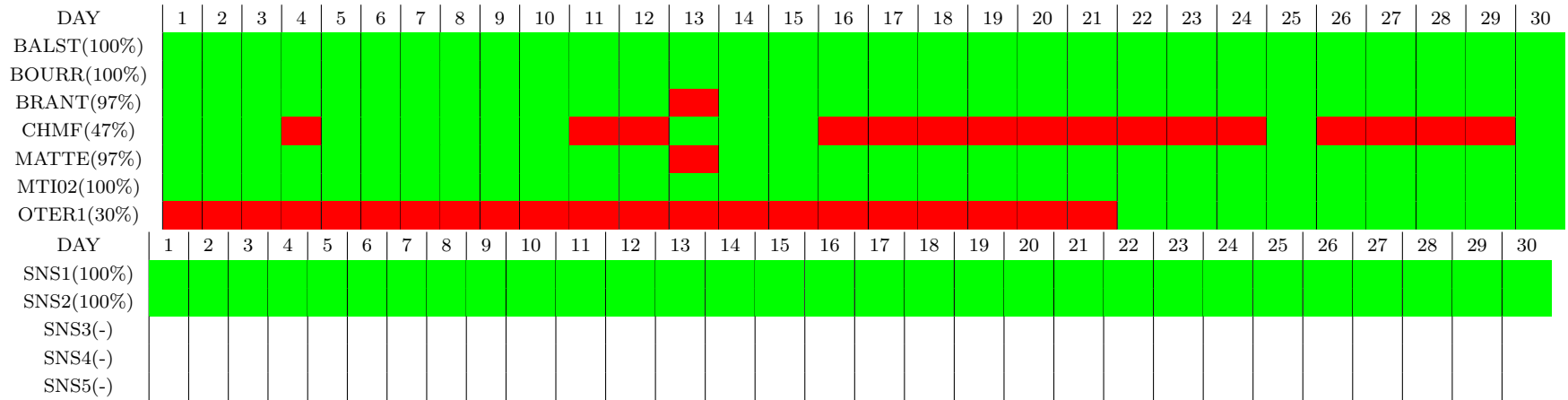
2015, 02



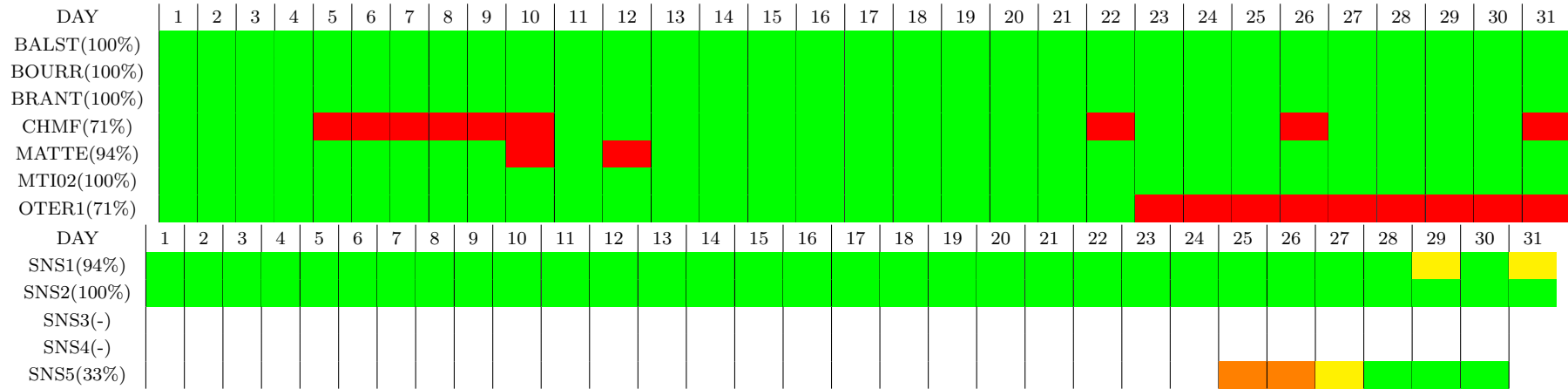
2015, 03



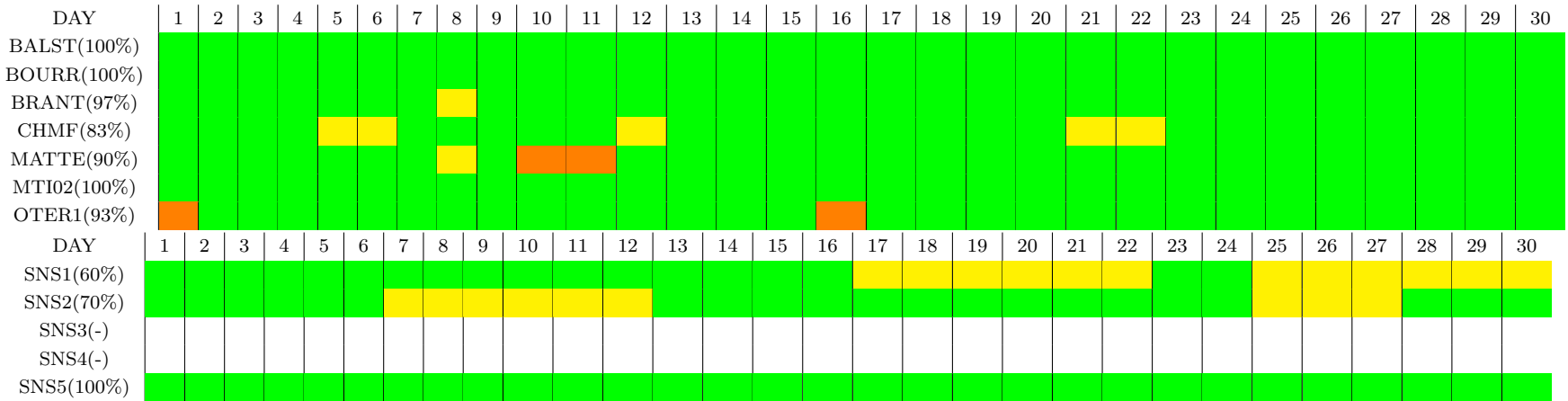
2015, 04

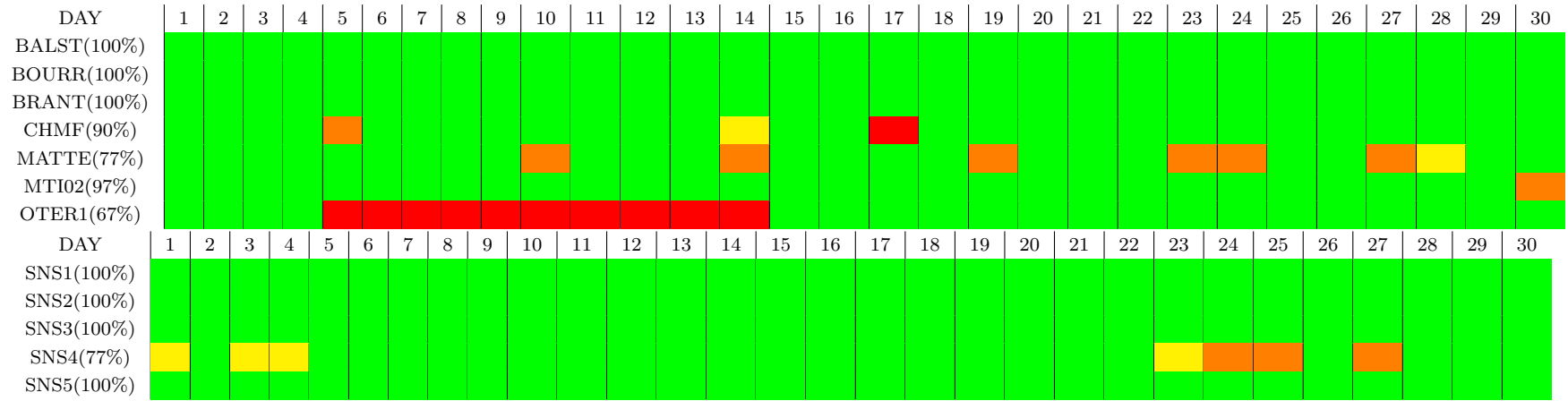


2015, 05



2015, 06







Anhang C

Software

Die in dieser Arbeit überwiegend eingesetzte Software *HypoLine* und *SonoView* wird in den Kapiteln 3.3.1 bzw. 3.3.1 umfassend vorgestellt. Zusätzlich wurde für die wissenschaftliche Bearbeitung der Ereignisdaten sowie ihrer Lokalisierungen die im folgenden vorgestellten Softwares *HypoDD* (Kapitel C.1) und *NonLinLoc* (Kapitel C.2) verwendet. Für die Erstellung der meistens Abbildungen wurde Generic Mapping Tools (*GMT*) Wessel und W.H.F. (1991), Wessel und Smith (1998a), Wessel und Smith (1998b), Wessel und Smith (2013)) verwendet.

C.1 HypoDD

HypoDD ist eine Software die auf dem double-difference earthquake location Algorithmus basiert (Waldhauser und Ellsworth, 2000). Geschrieben und aktualisiert wird sie von Felix Waldhauser (Waldhauser, 2001). Sie wird eingesetzt um Erdbeben, mit geringem Abstand im Verhältnis zum Abstand Ereignis-Station sowie innerhalb eines Bereichs homogener Geschwindigkeiten, relativ zu lokalisieren. Der Algorithmus nutzt die Annahme, dass Laufweegeffekte zwischen der Quellregion und der Station ähnlich sind. Daher werden Laufzeitunterschiede zweier Ereignisse überwiegend dem räumlichen Abstand sowie der Herdzeit zugeschrieben. Wird das Ereignispaar von mehreren Stationen registriert kann die Lokalisierungsgenauigkeit weiter verbessert werden. Mit steigender Anzahl Ereignisse in unmittelbarer Nachbarschaft kann die Minimierung der Residuen innerhalb der selben Optimierung verknüpft werden. Werden die Laufzeitunterschiede nicht manuell sonder mittels Kreuzkorrelation bestimmt erhöht sich die Genauigkeit weiter, vorausgesetzt, die Wellenformen der Ereignisse sind sich genügend ähnlich. Zur Nutzung wurde eigene Exportscripte geschrieben sowie für die Bestimmung der Laufzeitunterschiede mittels Kreuzkorrelation ein Script von Dirk Becker (persönliche Kommunikation 21.3.2016) verwendet.

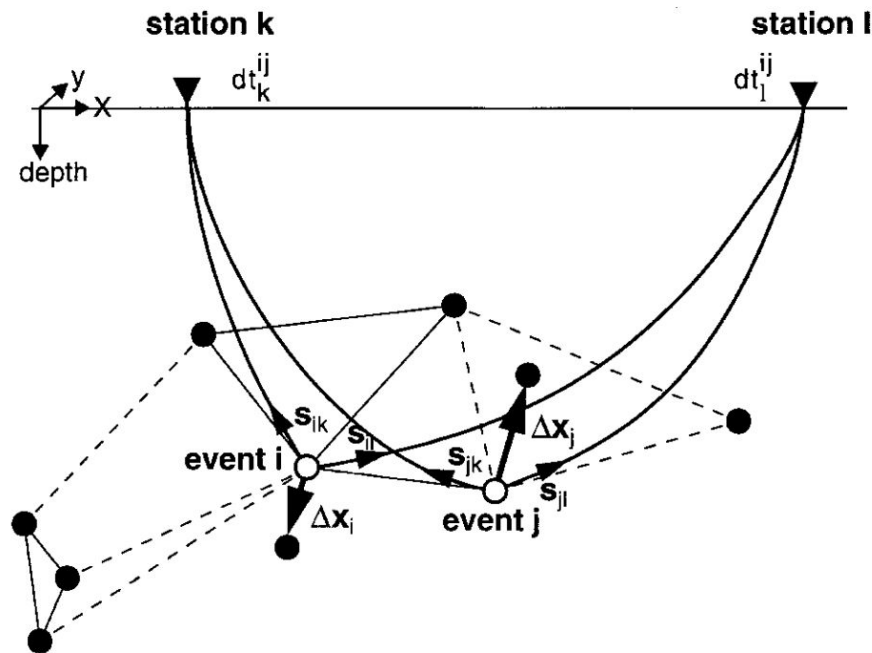


Abbildung C.1: Veranschaulichung des double-difference earthquake relocation Algorithmus (Waldhauser und Ellsworth, 2000).

Die Visualisierung erfolgte über eigene GMT-Scripte.

C.2 NonLinLoc

NonLinLoc wird entwickelt und gewartet von Anthony Lomax. Es besteht aus mehreren Einzelprogrammen mit den Funktionen Geschwindigkeitsmodellerstellung, Laufzeitberechnung, nicht-linearer globaler Erdbebenlokalisierungssuche in 3D Strukturen sowie der Visualisierung von 3D Lokalisierungsergebnissen (Lomax (2018)). Es basiert auf einem nicht-linearen Inversionsalgorithmus um eine probabilistische Lokalisierung in 3D zu berechnen (Lomax et al. (2000) Lomax et al. (2009)). Für die Verwendung der Ergebnisse aus *HypoLine* wurde von B. Sick eine Exportfunktion implementiert. Diese bereitet Einsatzzeiten und deren Unsicherheiten auf. Basierend auf einem gegebenen Geschwindigkeitsmodell wird ein slowness Modell für P- und S-Phase im Untersuchungsgebiet erzeugt. Zusätzlich wird ein Laufzeiten- und Startwinkelgitter für jede Phase an jeder Station berechnet. Sobald diese Daten zur Verfügung stehen können die exportierten Laufzeitdaten lokalisiert werden. Zuletzt wurden für die Visualisierung eigene GMT-Scripte verwendet.

Anhang D

Ereignisse

D.1 Seismogramme und Sonogramme, nach Clustern sortiert

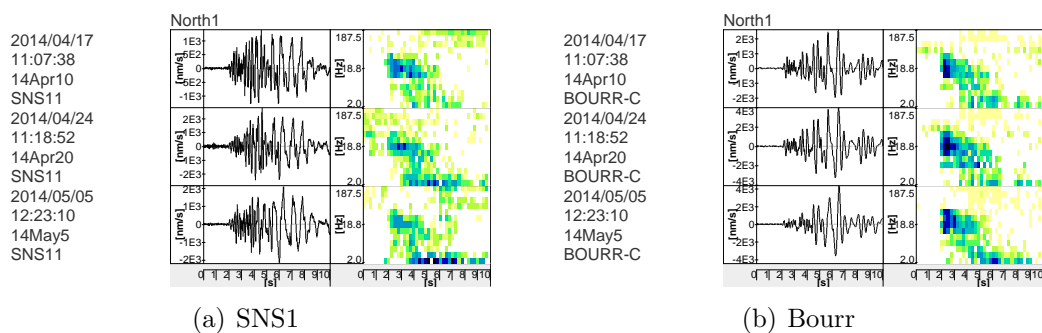


Abbildung D.1: Seismogramm und Sonogramm des Clusters North1

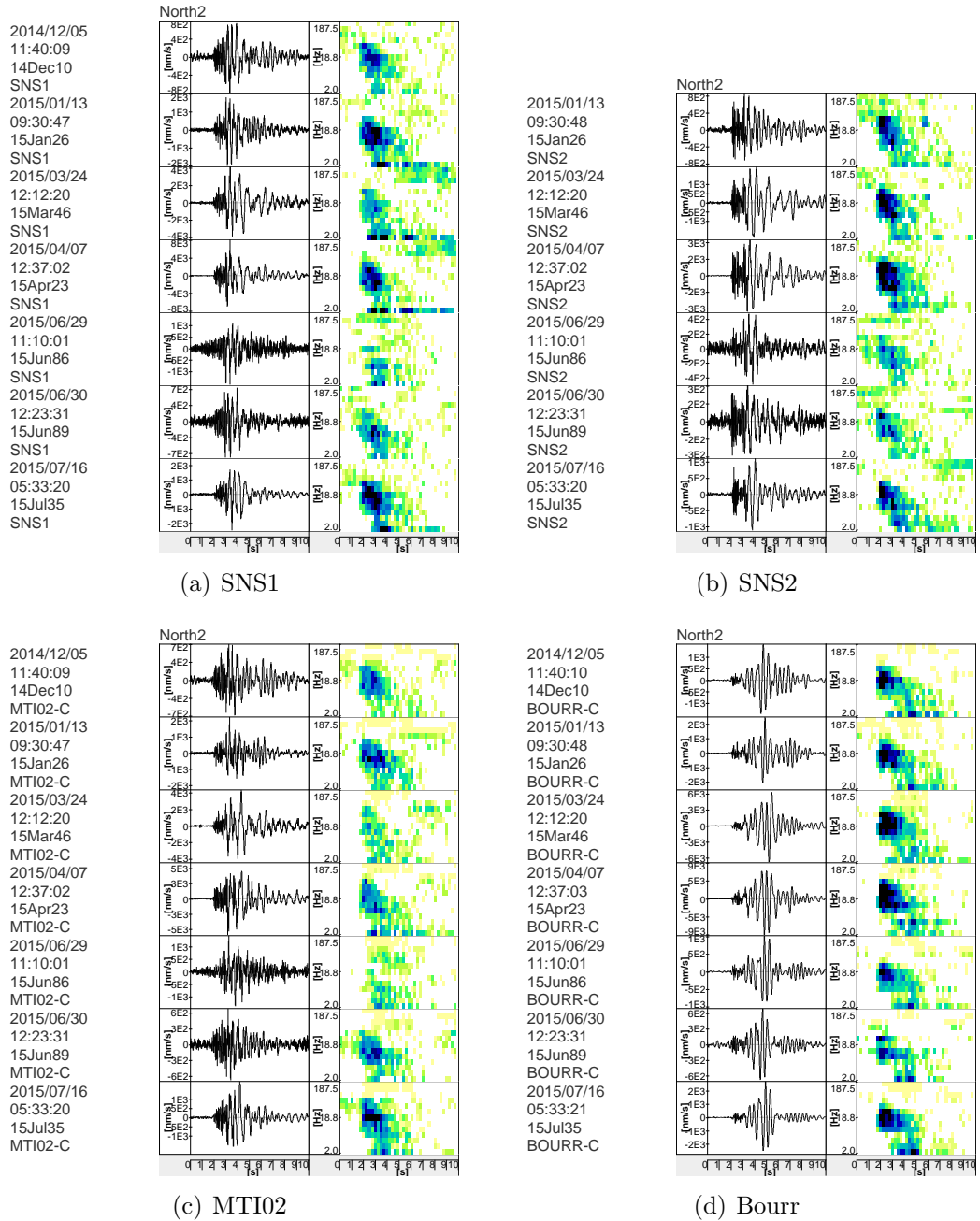


Abbildung D.2: Seismogramm und Sonogramm des Clusters North2

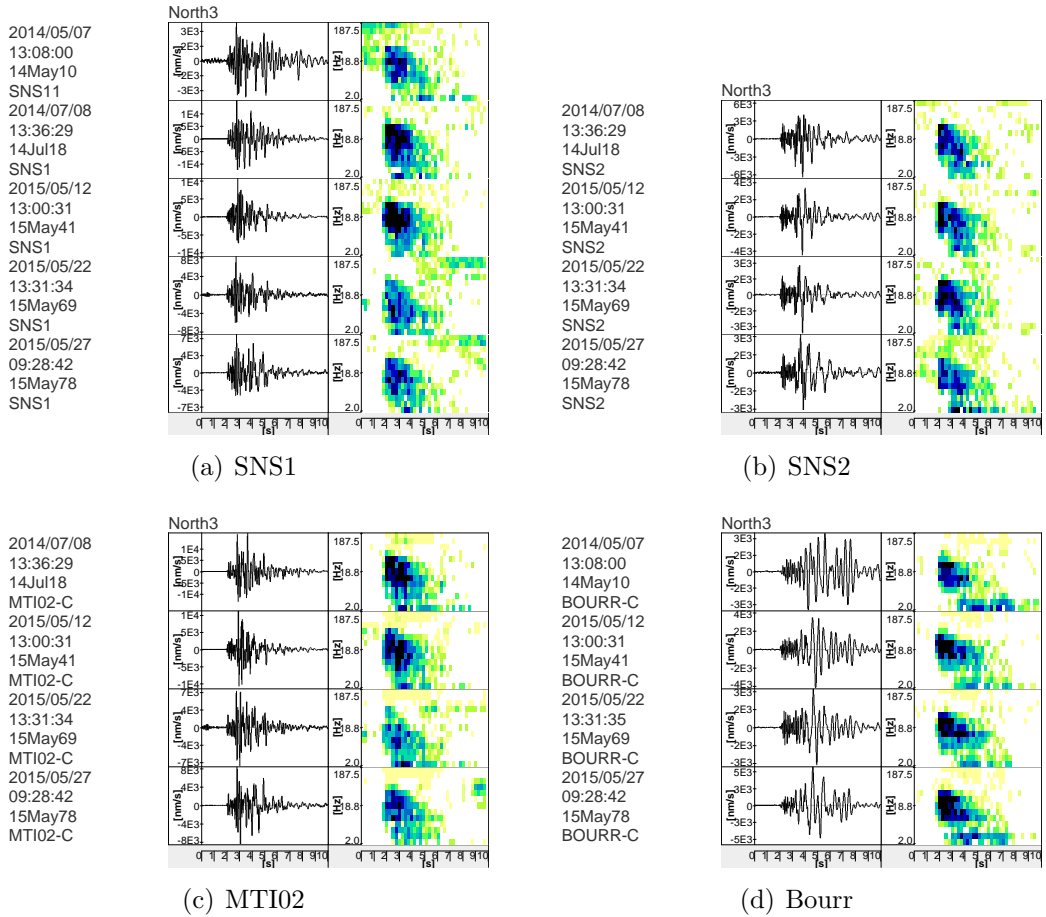


Abbildung D.3: Seismogramm und Sonogramm des Clusters North3

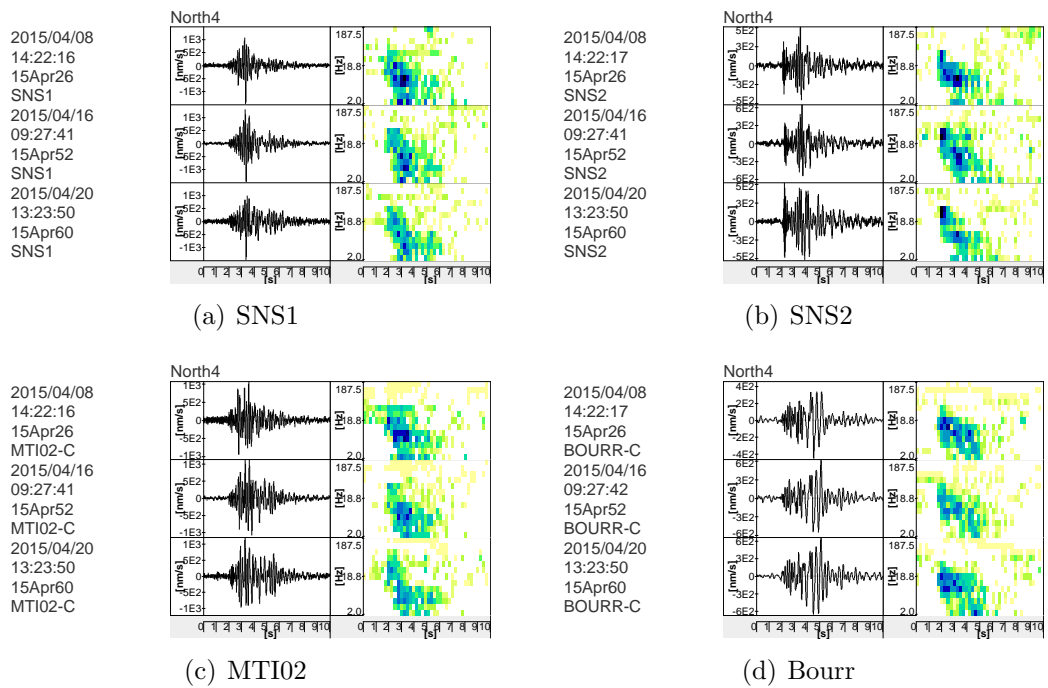


Abbildung D.4: Seismogramm und Sonogramm des Clusters North4

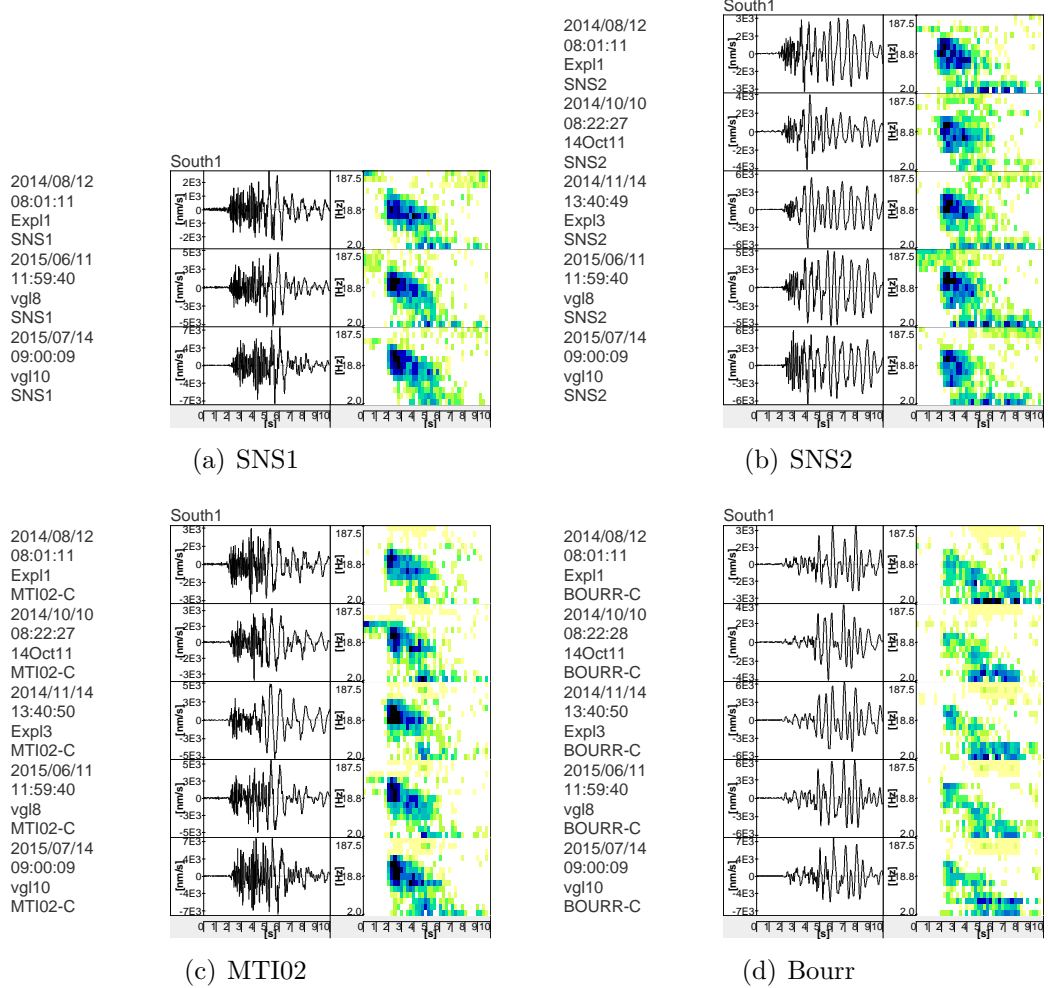


Abbildung D.5: Seismogramm und Sonogramm des Clusters South1

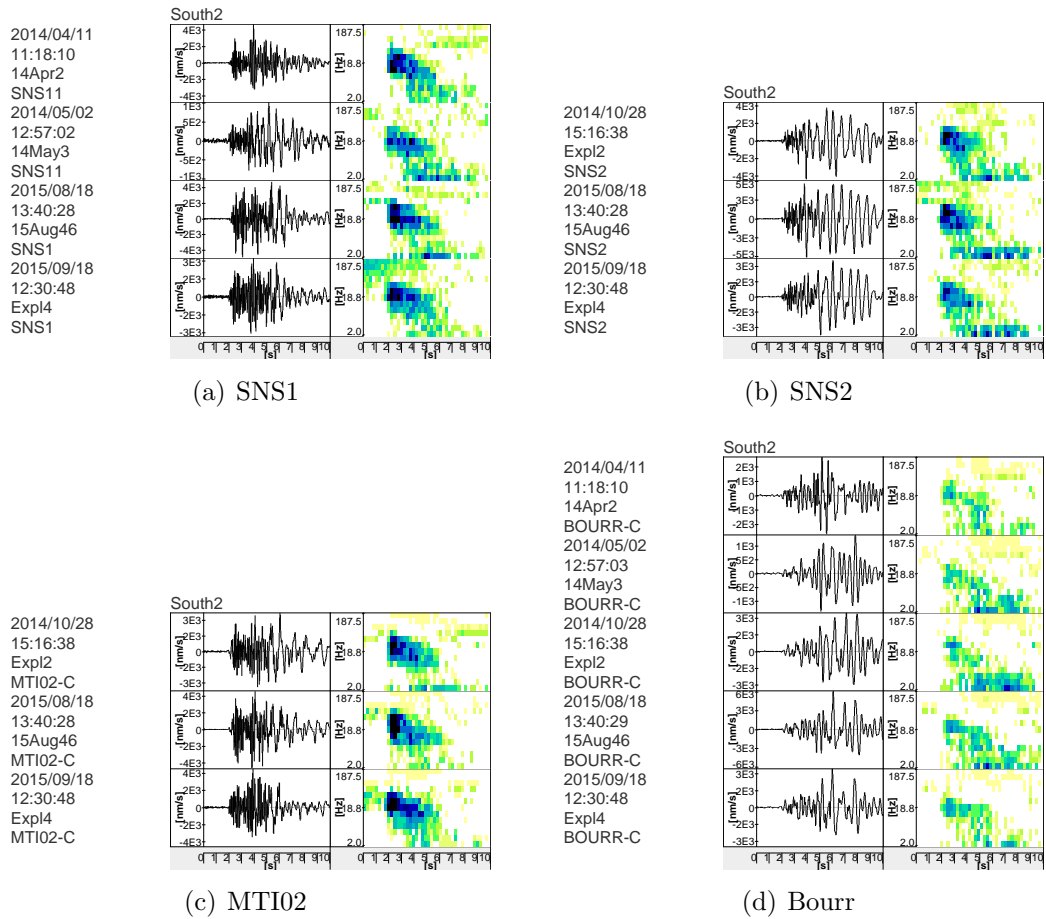


Abbildung D.6: Seismogramm und Sonogramm des Clusters South2

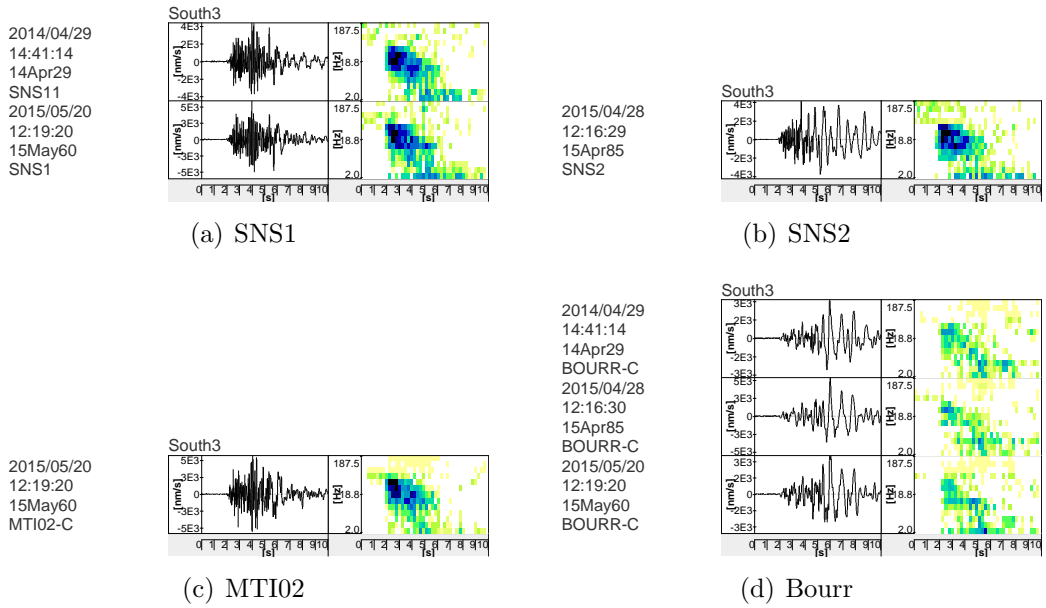


Abbildung D.7: Seismogramm und Sonogramm des Clusters South3

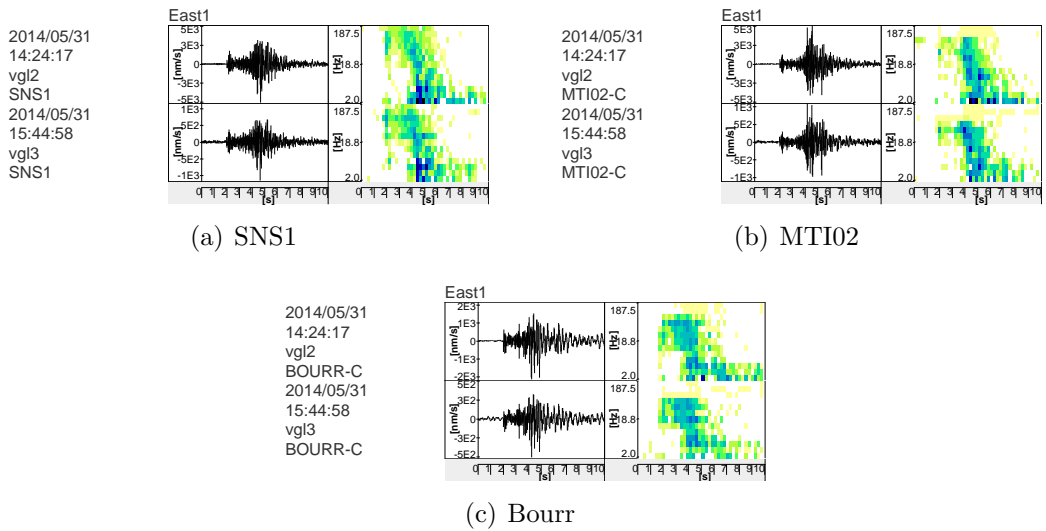


Abbildung D.8: Seismogramm und Sonogramm des Clusters East1

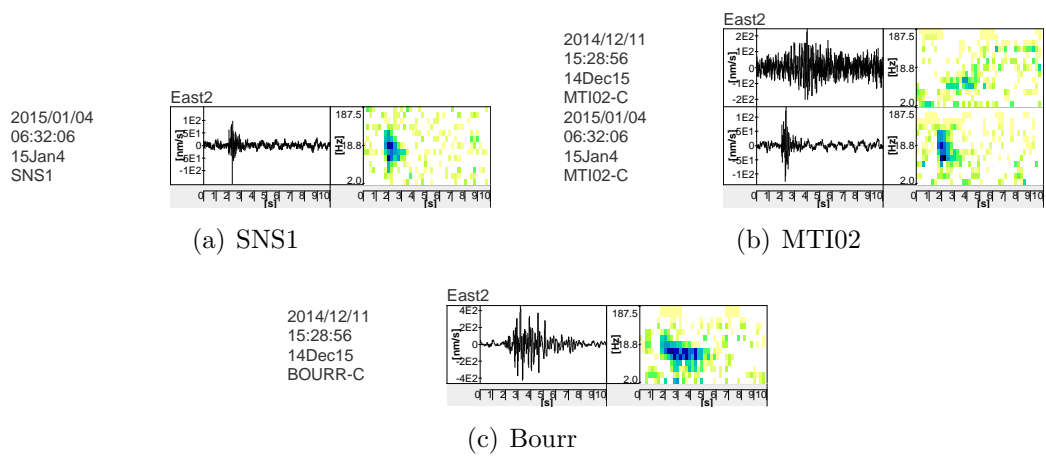
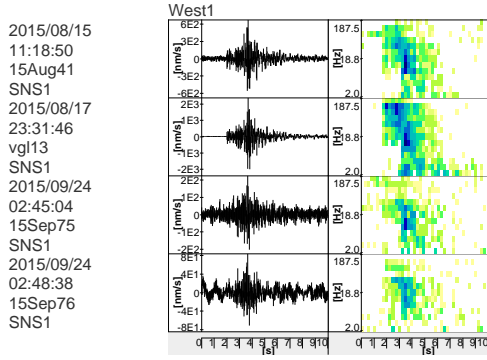
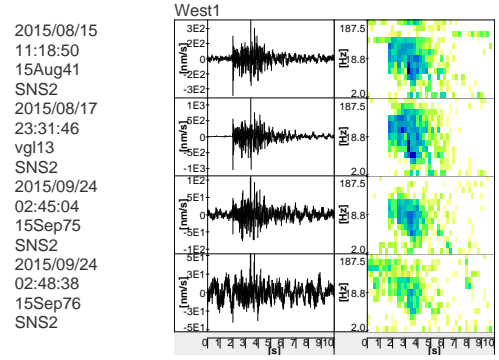


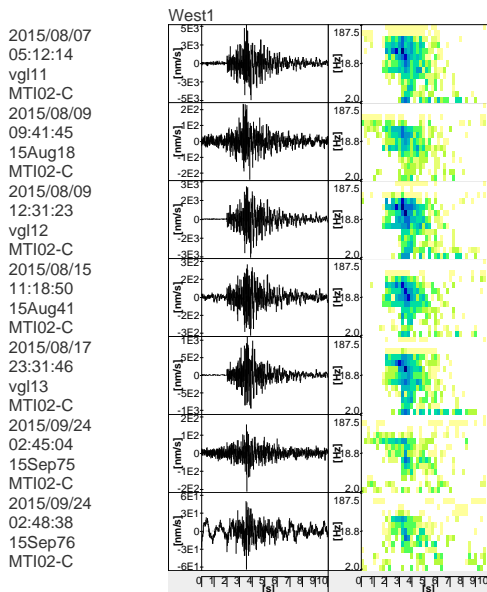
Abbildung D.9: Seismogramm und Sonogramm des Clusters East2



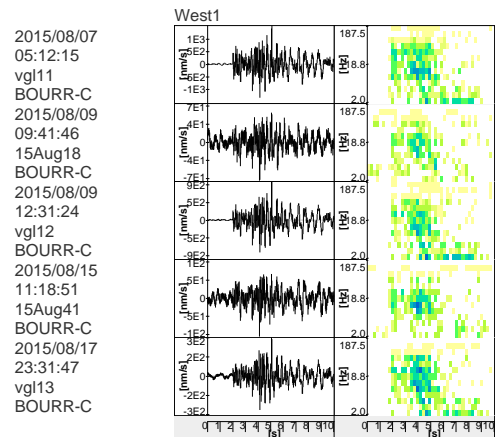
(a) SNS1



(b) SNS2



(c) MTI02



(d) Bourr

Abbildung D.10: Seismogramm und Sonogramm des Clusters West1

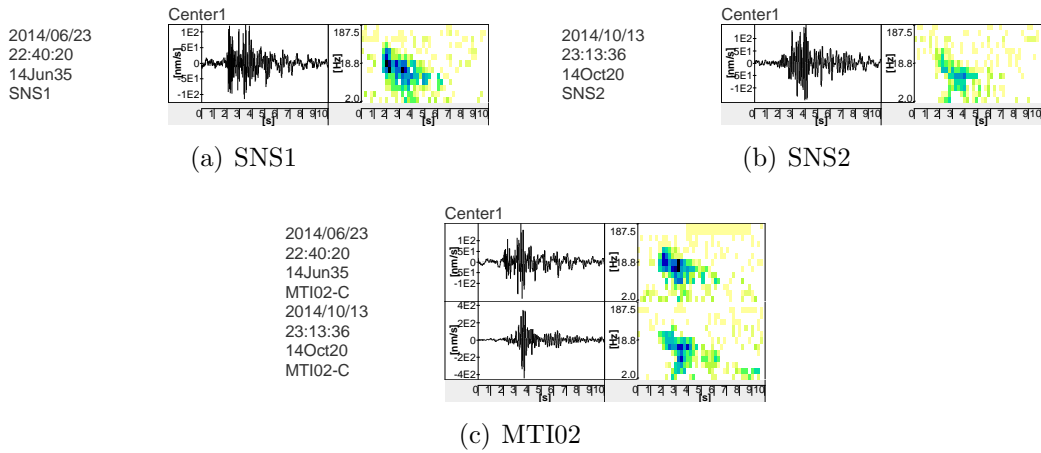


Abbildung D.11: Seismogramm und Sonogramm des Clusters Center1

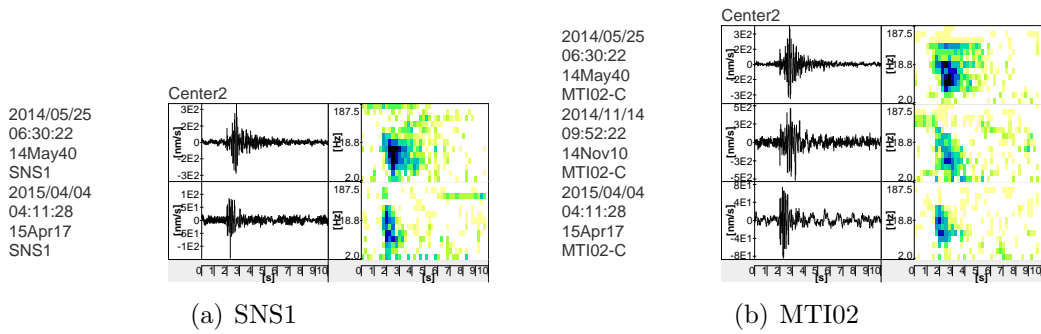


Abbildung D.12: Seismogramm und Sonogramm des Clusters Center2

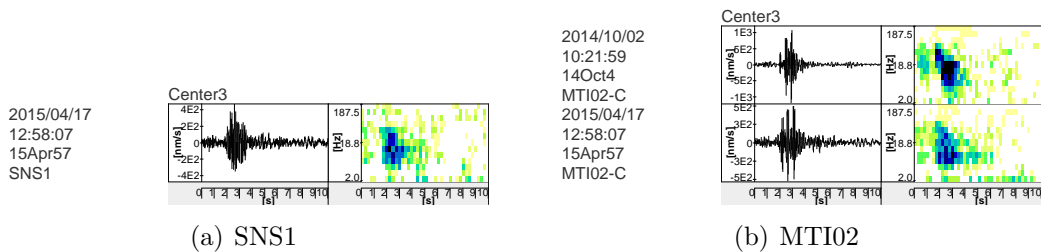


Abbildung D.13: Seismogramm und Sonogramm des Clusters Center3

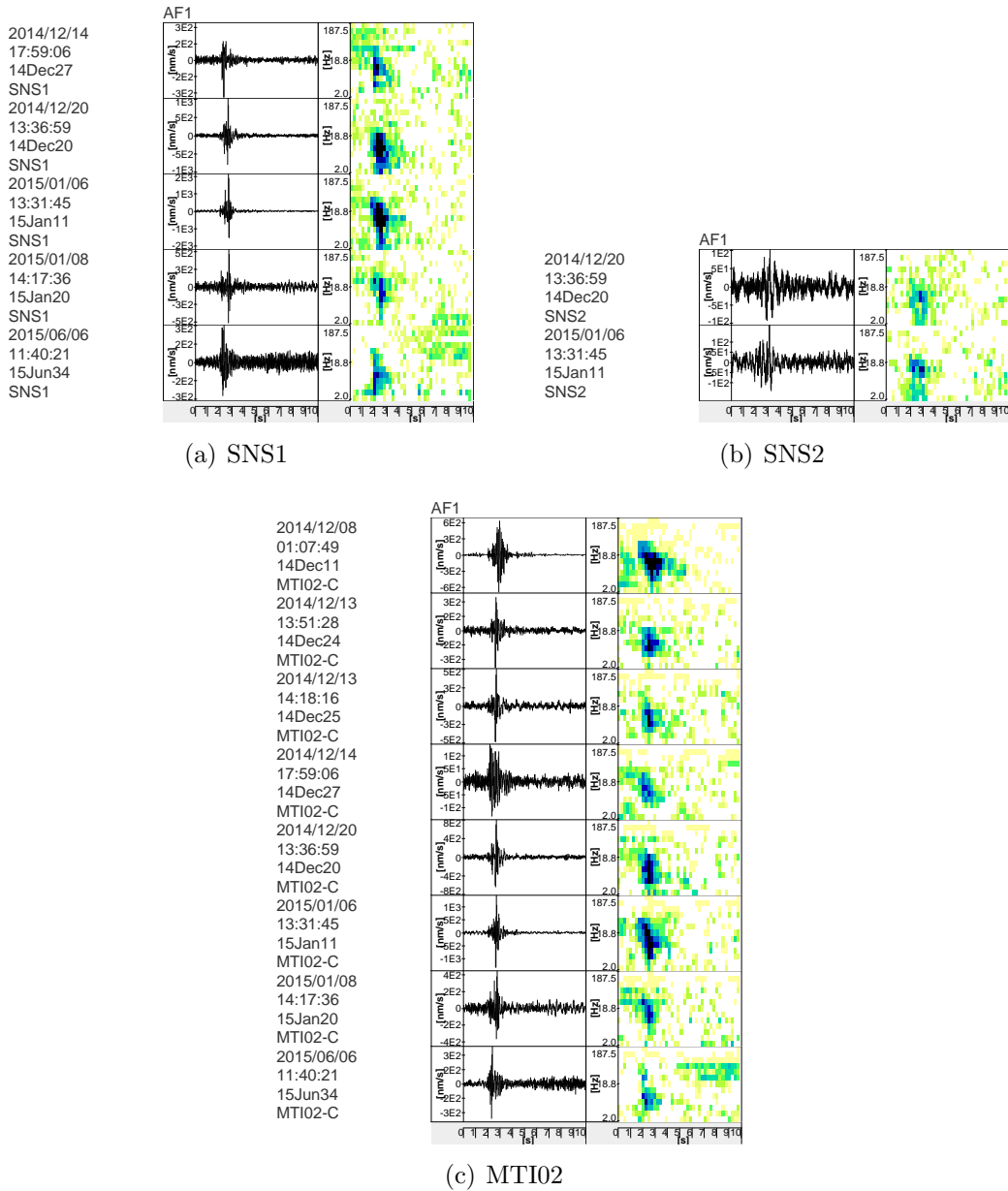


Abbildung D.14: Seismogramm und Sonogramm des Clusters AF1

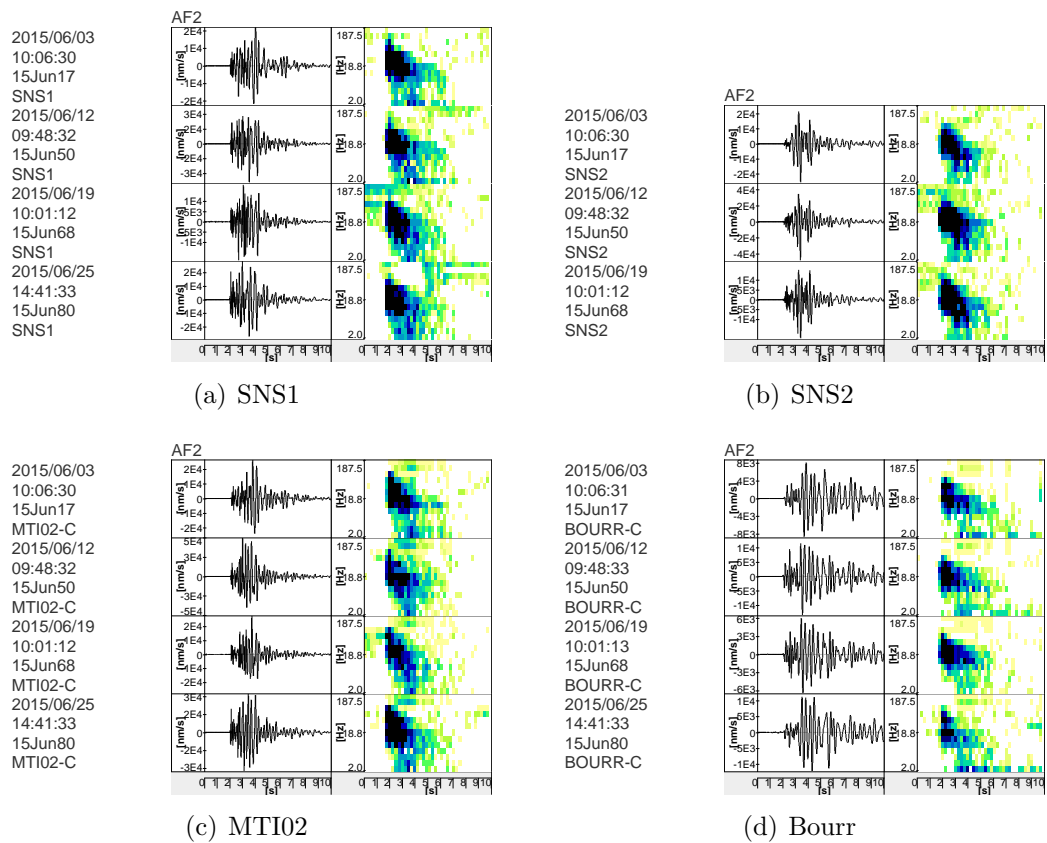


Abbildung D.15: Seismogramm und Sonogramm des Clusters AF2

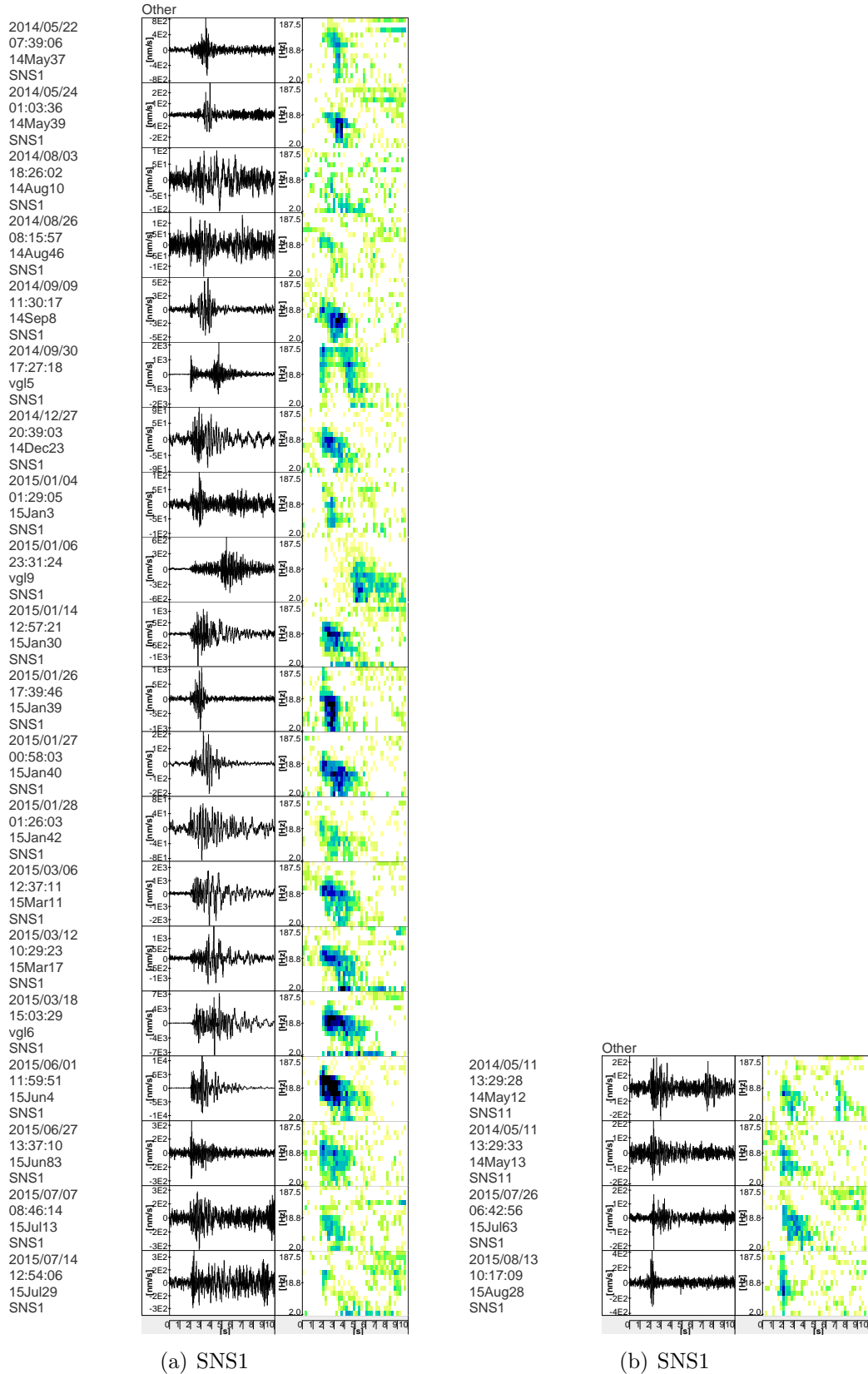


Abbildung D.16: Seismogramm und Sonogramm des Clusters Other

D.1. SEISMOGRAMME UND SONOGRAMME, NACH CLUSTERN SORTIERT

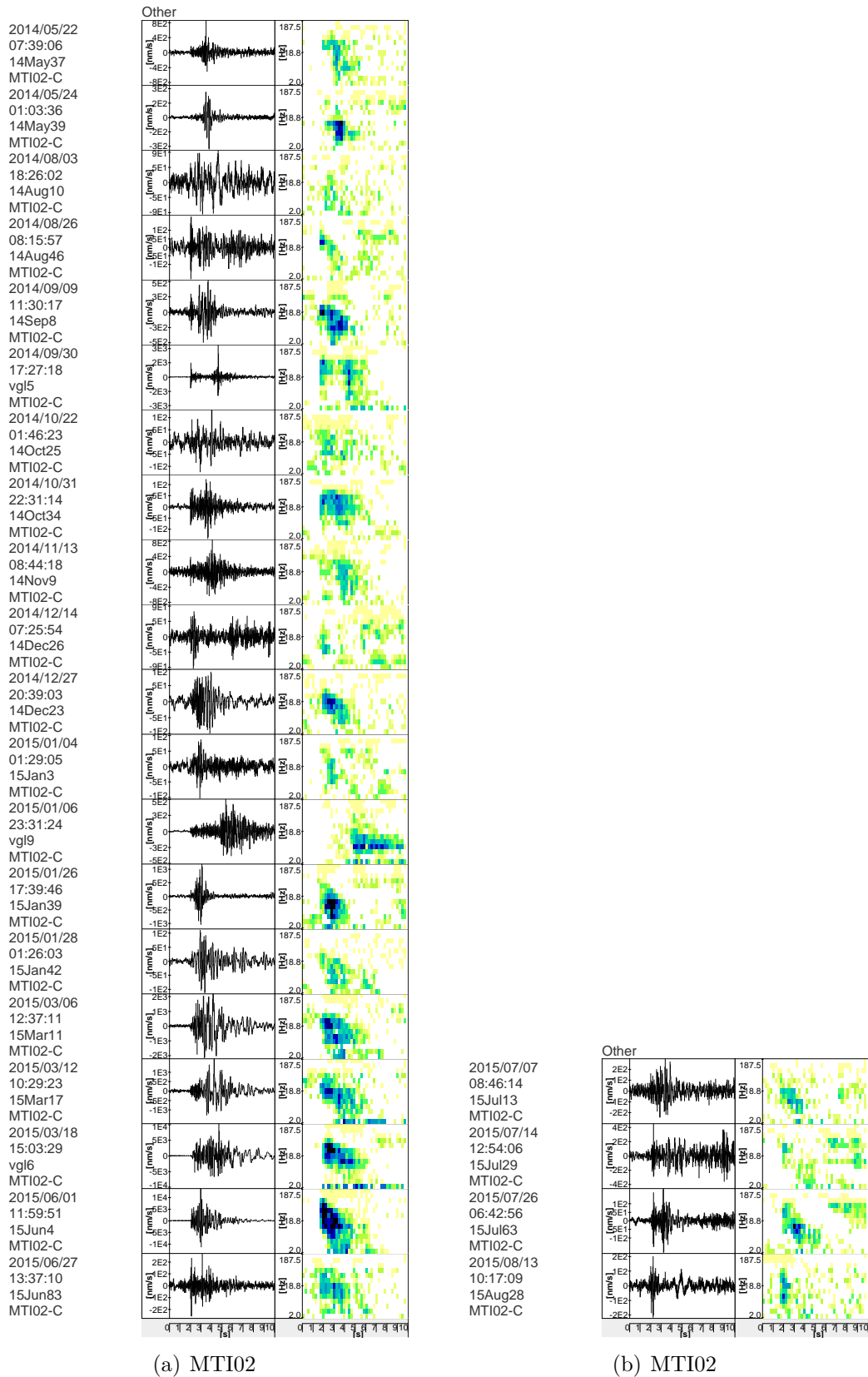


Abbildung D.17: Seismogramm und Sonogramm des Clusters Other

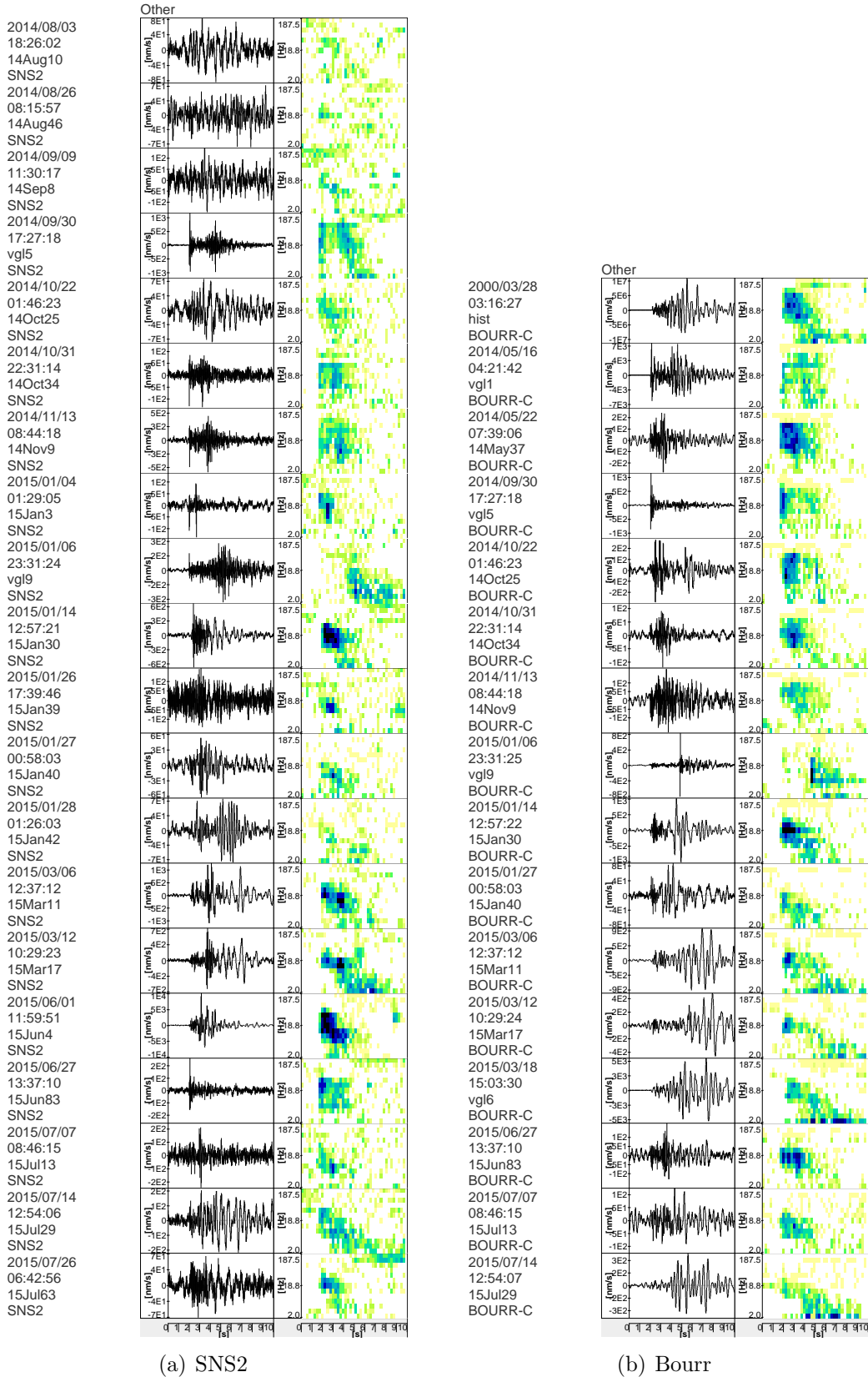


Abbildung D.18: Seismogramm und Sonogramm des Clusters Other

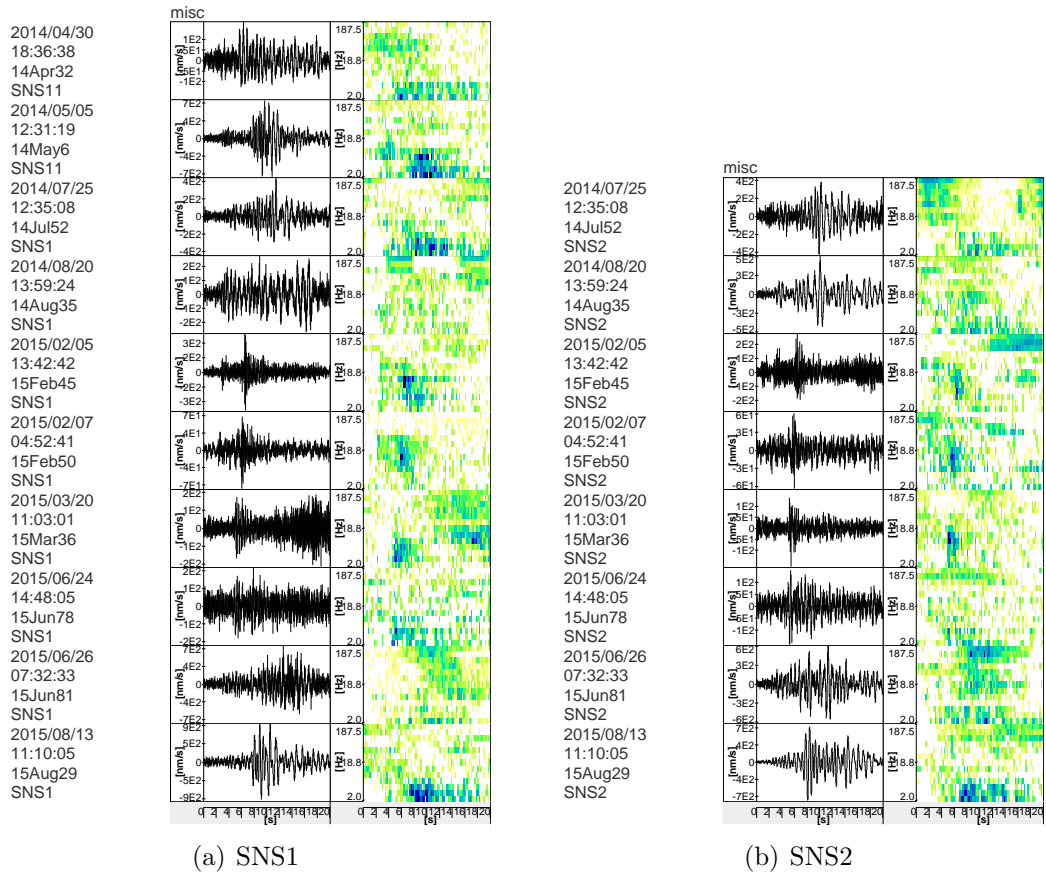


Abbildung D.19: Seismogramm und Sonogramm des Clusters misc

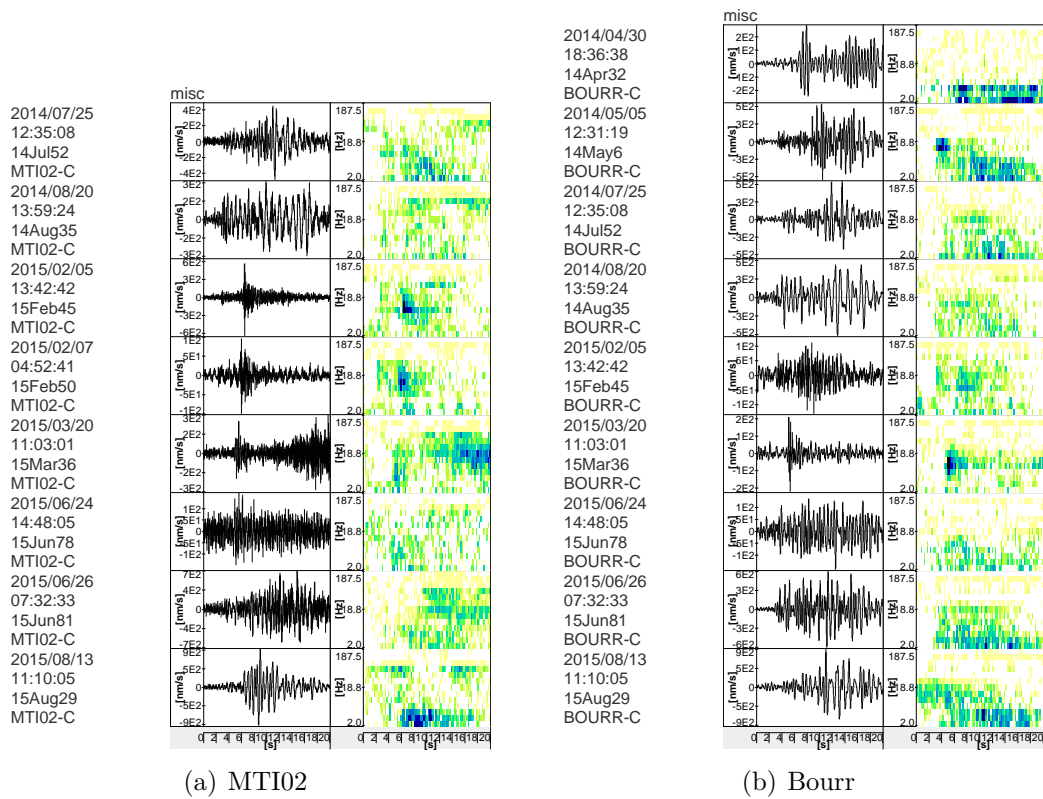


Abbildung D.20: Seismogramm und Sonogramm des Clusters misc2.

D.1. SEISMOGRAMME UND SONOGRAMME, NACH CLUSTERN SORTIERT

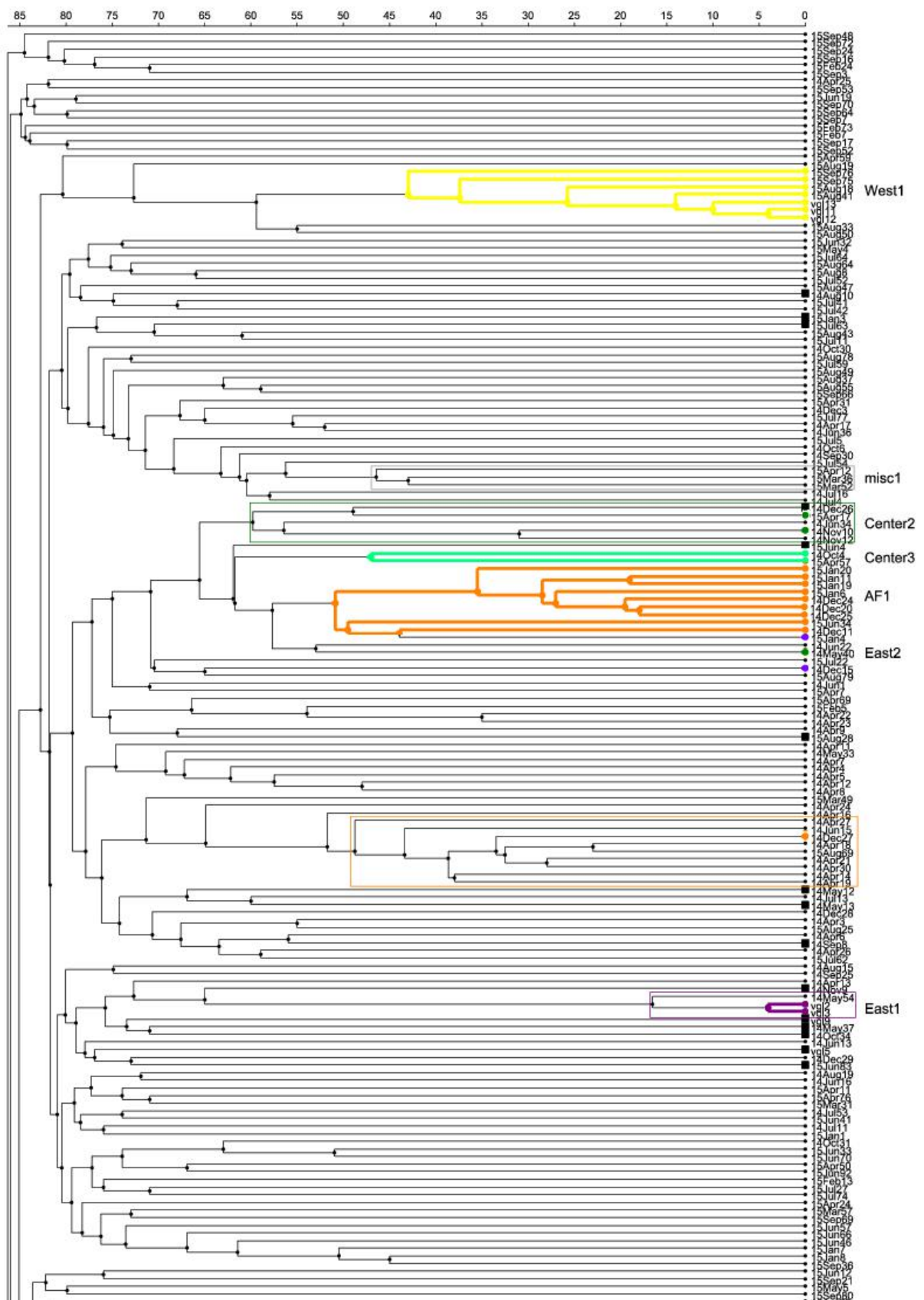


Abbildung D.21: Teil 1/6.

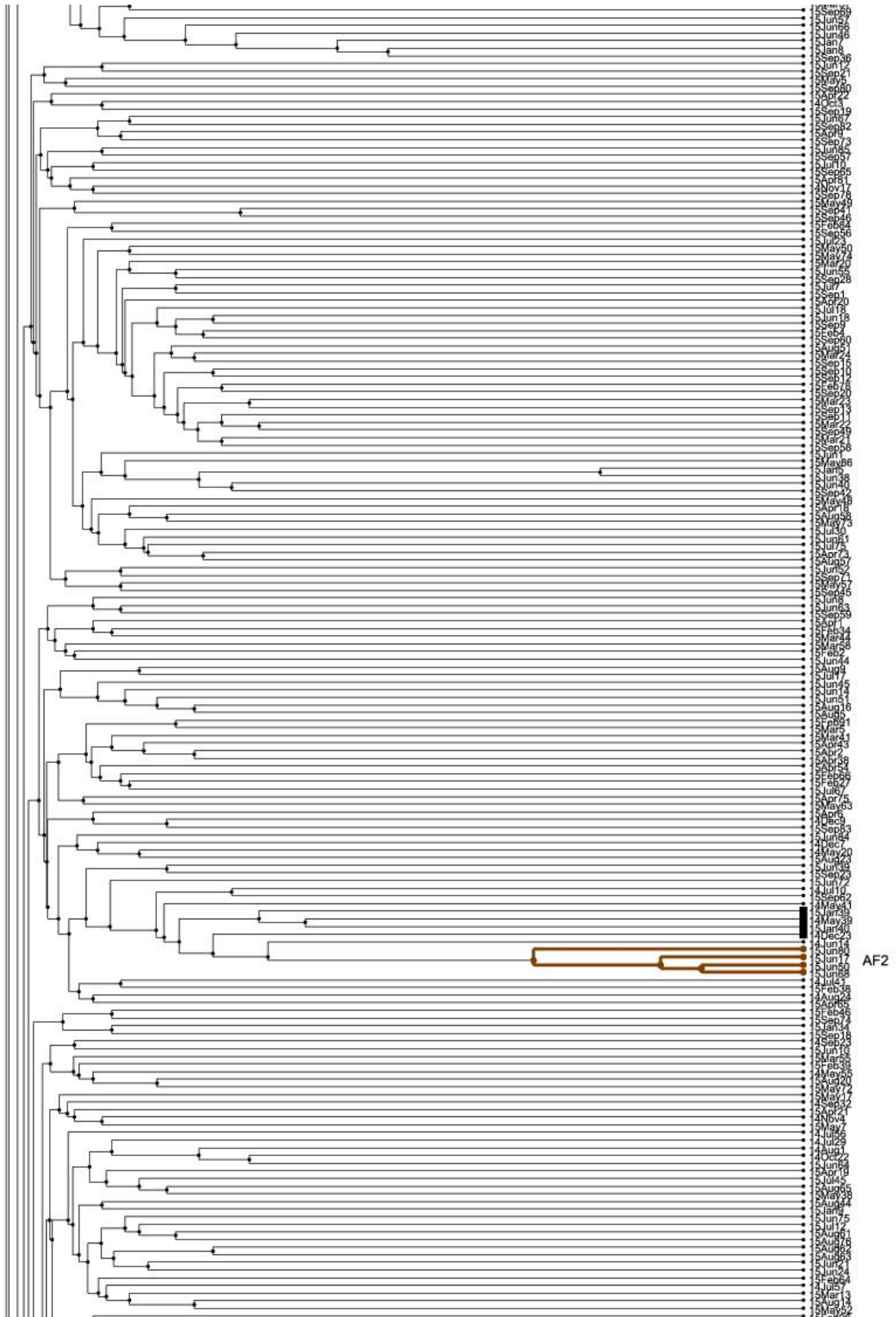


Abbildung D.22: Teil 2/6.

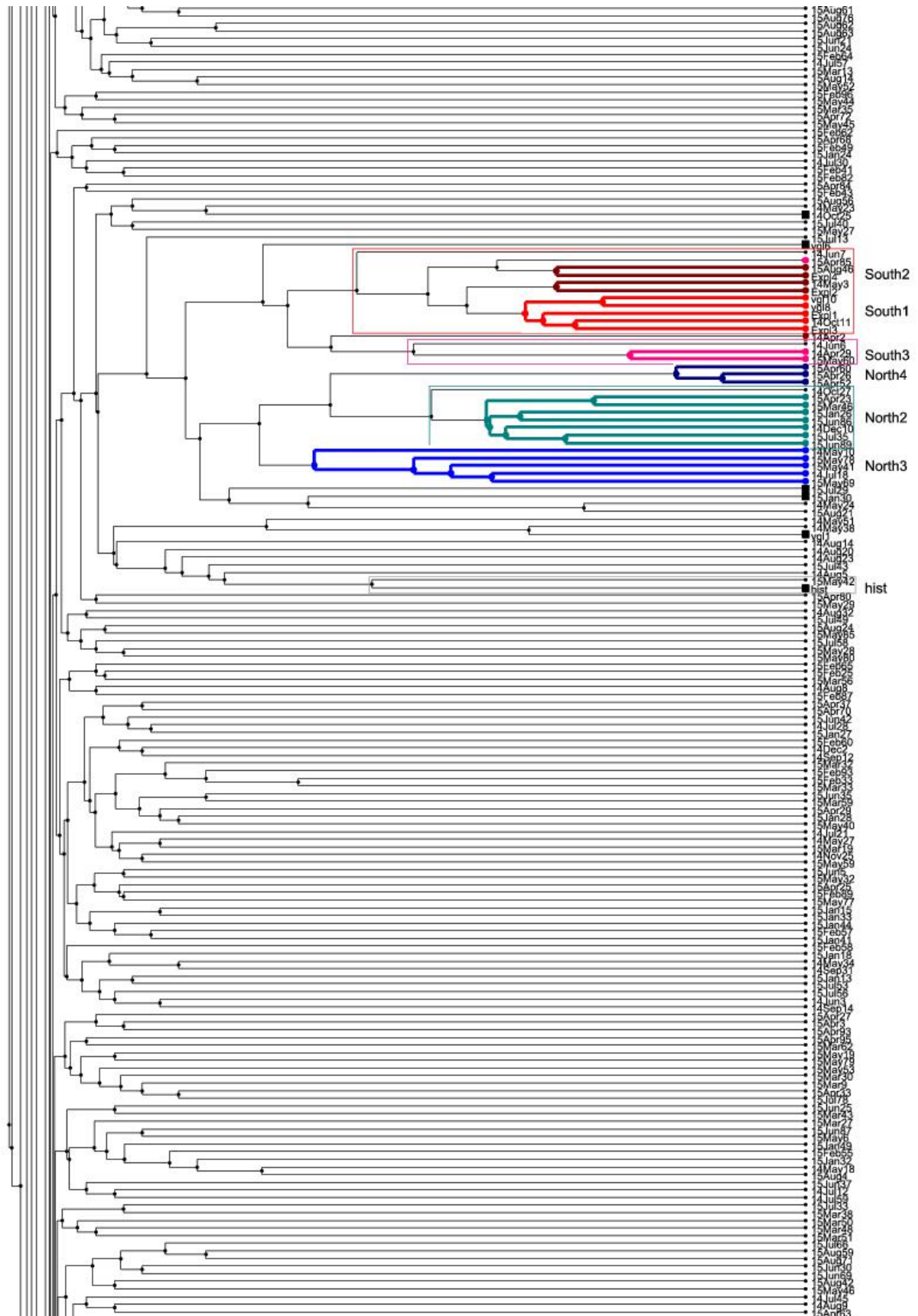


Abbildung D.23: Teil 3/6.

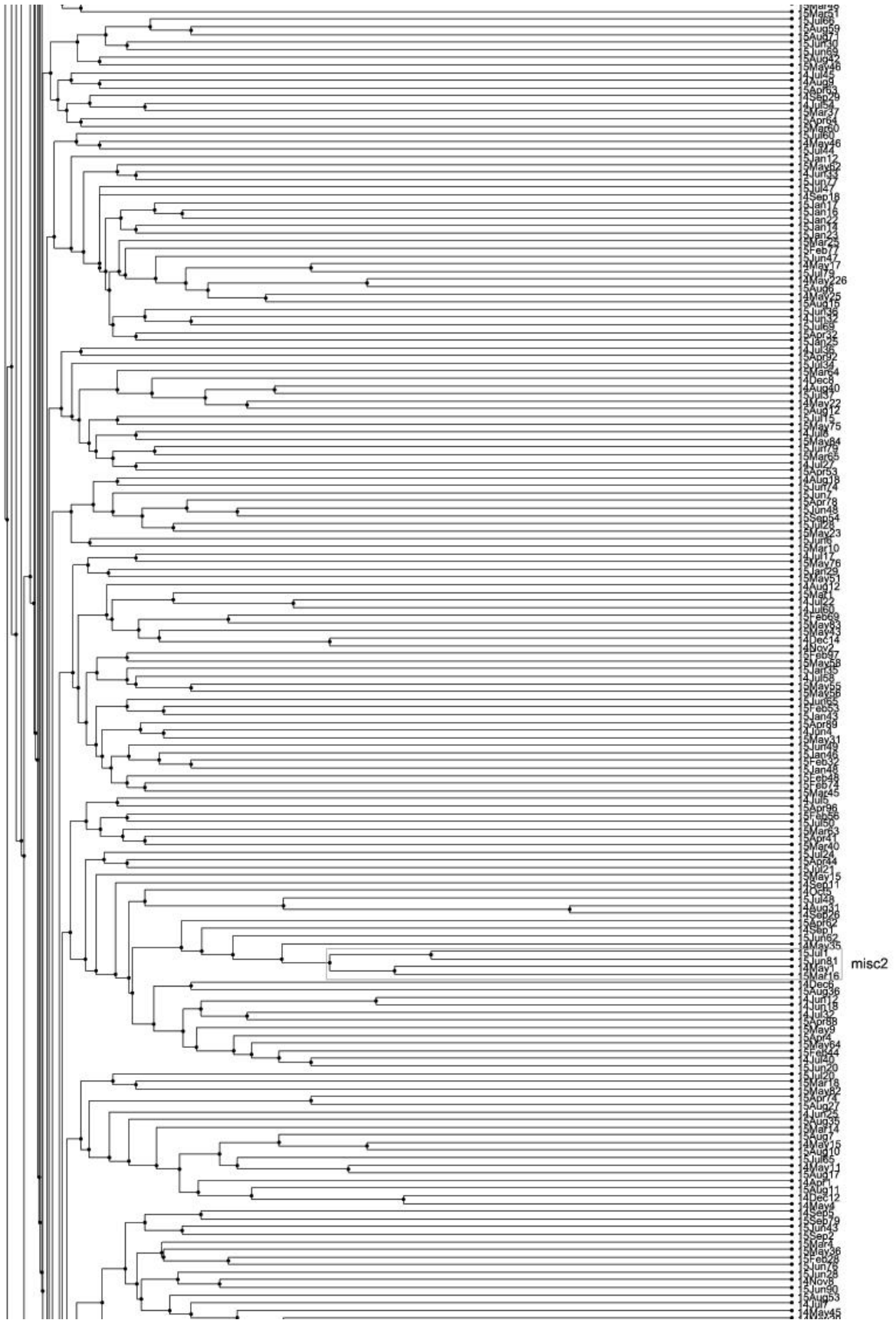


Abbildung D.24: Teil 4/6.

D.1. SEISMOGRAMME UND SONOGRAMME, NACH CLUSTERN SORTIERT

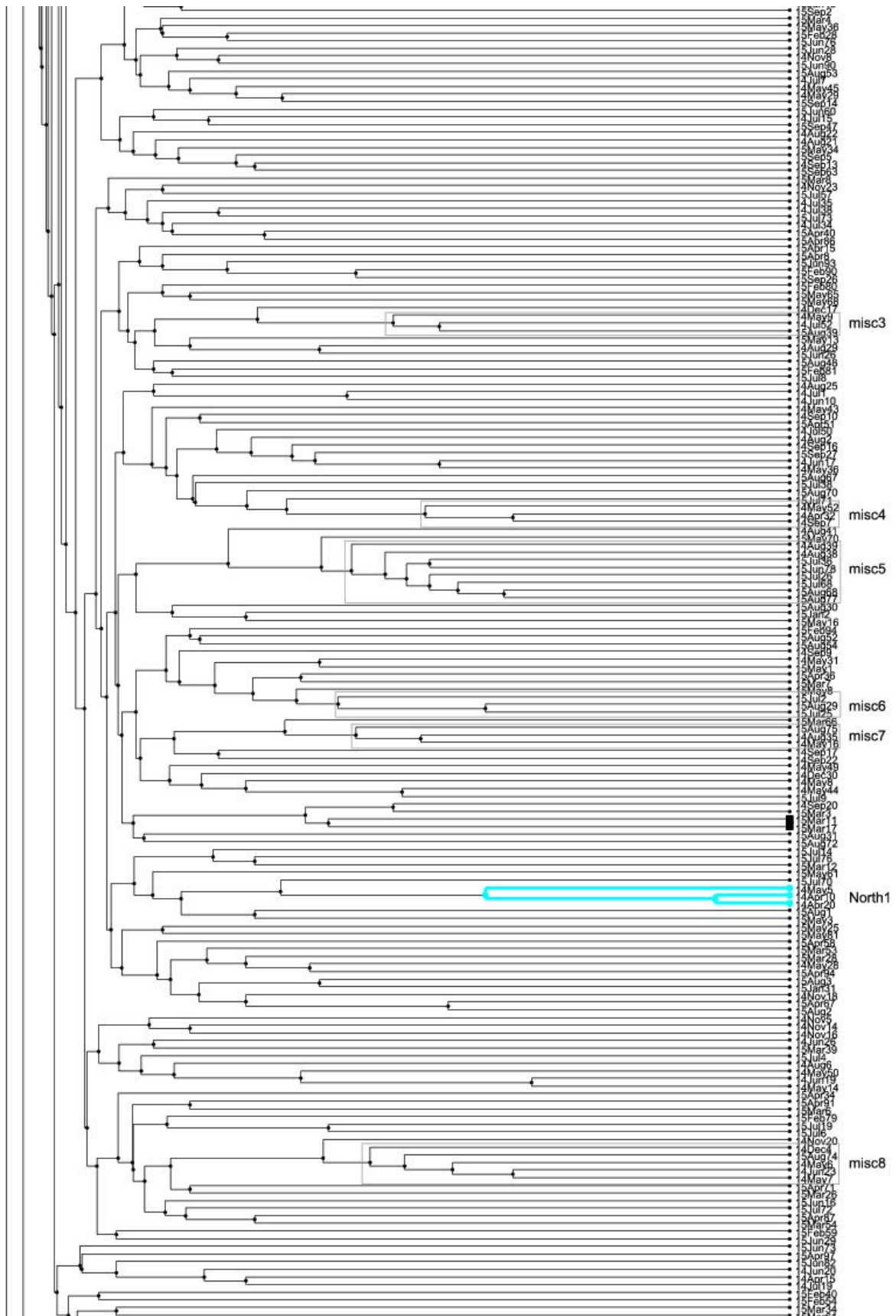


Abbildung D.25: Teil 5/6.

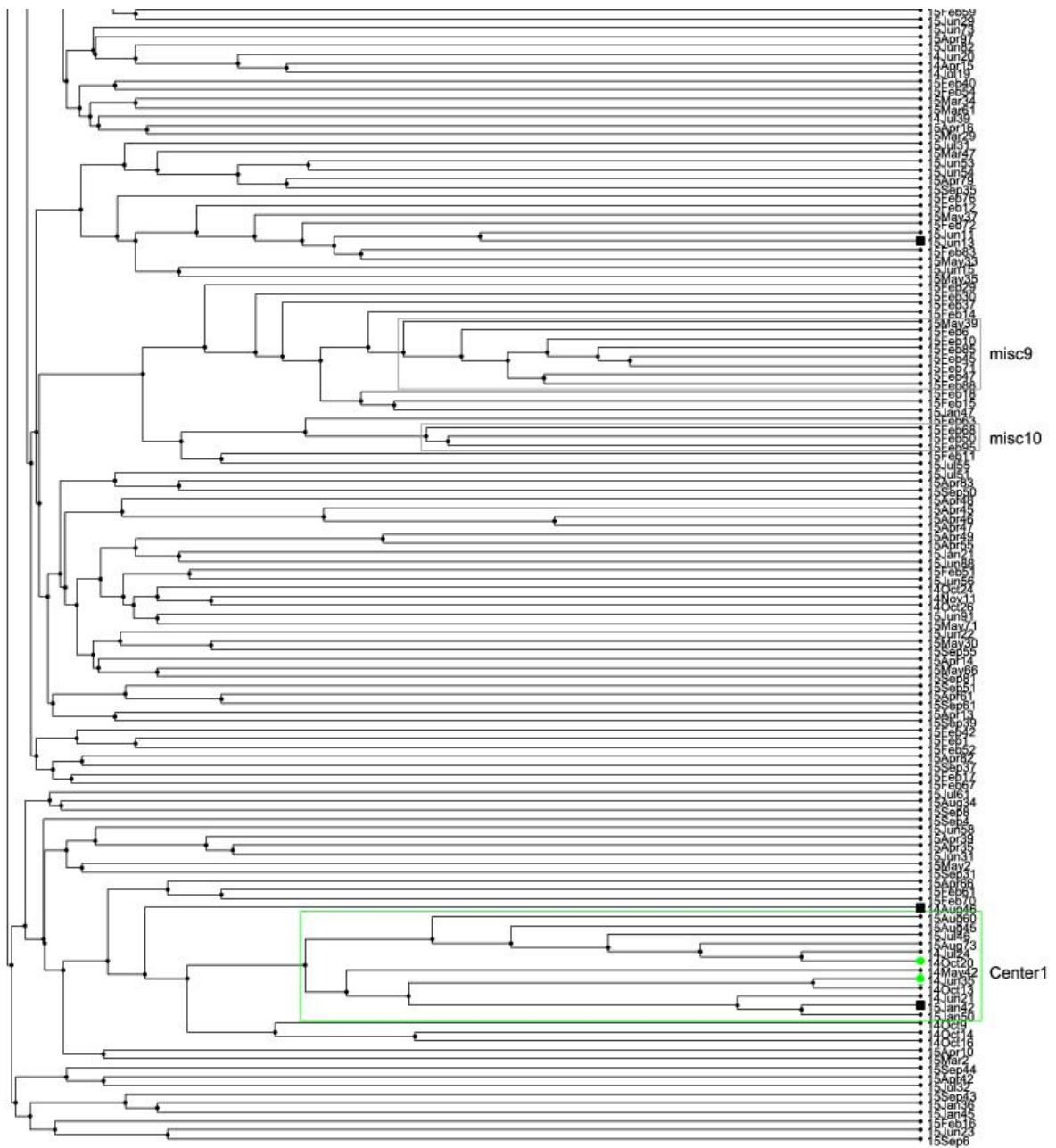


Abbildung D.26: Dendrogramm aller Ereignisse, bekannte Cluster (farbig markiert) und deren potentielle Erweiterungen (farbige Kästen) sowie potentielle neue Gruppierungen (schwarze Kästen, nummeriert) sind markiert. Teil 6/6. Für Erläuterungen siehe Seite 109.

D.2 Ereignistabelle, zeitlich sortiert

Name	Cluster	Datum	Latitude [°]	Longitude [°]	Tiefe [km]	Magni- tude M_L
hist	Other	28.03.00 03:16:26	47,377	7,175	5,0	1,8
14Apr2	South2	11.04.14 11:18:09	47,325	7,174	0,9	1,0
14Apr10	North1	17.04.14 11:07:37	47,433	7,194	2,2	0,9
14Apr20	North1	24.04.14 11:18:52	47,426	7,188	0,8	1,1
14Apr29	South3	29.04.14 14:41:13	47,333	7,168	2,4	0,9
14May3	South2	02.05.14 12:57:01	47,306	7,173	7,2	1,0
14May5	North1	05.05.14 12:23:08	47,457	7,180	4,3	1,2
14May10	North3	07.05.14 13:07:59	47,422	7,146	4,3	1,1
14May12	Other	11.05.14 13:29:28	47,382	7,163	0,0	-1,9
14May13	Other	11.05.14 13:29:33	47,383	7,163	-0,3	-1,8
vgl1	Other	16.05.14 04:21:40	47,471	7,186	9,0	1,7
14May37	Other	22.05.14 07:39:05	47,436	7,191	3,6	-0,3
14May39	Other	24.05.14 01:03:35	47,319	7,095	2,9	-0,6
14May40	Center2	25.05.14 06:30:22	47,392	7,167	-0,5	-1,3
vgl2	East1	31.05.14 14:24:15	47,325	7,250	8,9	1,1
vgl3	East1	31.05.14 15:44:56	47,350	7,267	13,1	0,5
14Jun35	Center1	23.06.14 22:40:19	47,356	7,162	0,7	-1,3
14Jul18	North3	08.07.14 13:36:28	47,422	7,143	1,8	1,2
14Aug10	Other	03.08.14 18:26:02	47,354	7,128	0,5	-1,0
Expl1	South1	12.08.14 08:01:10	47,337	7,168	1,4	0,8
14Aug46	Other	26.08.14 08:15:57	47,388	7,213	-0,3	-1,5
14Sep8	Other	09.09.14 11:30:16	47,373	7,151	4,2	-0,5
vgl5	Other	30.09.14 17:27:15	47,278	7,202	13,8	0,8
14Oct4	Center3	02.10.14 10:21:59	47,383	7,144	0,4	-1,1
14Oct11	South1	10.10.14 08:22:27	47,336	7,162	1,2	0,9
14Oct20	Center1	13.10.14 23:13:36	47,363	7,148	0,9	-1,2
14Oct25	Other	22.10.14 01:46:22	47,353	7,256	1,4	-0,6
Expl2	South2	28.10.14 15:16:37	47,312	7,180	2,0	1,2
14Oct34	Other	31.10.14 22:31:13	47,413	7,219	6,2	-0,8
14Nov9	Other	13.11.14 08:44:17	47,306	7,244	7,7	0,3
14Nov10	Center2	14.11.14 09:52:22	47,368	7,147	1,3	-1,0

Name	Cluster	Datum	Latitude [°]	Longitude [°]	Tiefe [km]	Magni- tude M_L
Expl3	South1	14.11.14 13:40:49	47,328	7,172	0,2	1,2
14Dec10	North2	05.12.14 11:40:09	47,400	7,172	2,6	0,1
14Dec11	AF1	08.12.14 01:07:49	47,402	7,167	-0,3	-1,3
14Dec15	East2	11.12.14 15:28:56	47,375	7,234	-0,3	-0,9
14Dec24	AF1	13.12.14 13:51:28	47,385	7,191	-0,3	-1,4
14Dec25	AF1	13.12.14 14:18:16	47,382	7,193	-0,3	-1,3
14Dec26	Other	14.12.14 07:25:55	47,385	7,161	-0,5	-2,0
14Dec27	AF1	14.12.14 17:59:06	47,381	7,161	0,0	-1,5
14Dec20	AF1	20.12.14 13:36:59	47,381	7,180	-0,4	-1,2
14Dec23	Other	27.12.14 20:39:03	47,384	7,153	-0,3	-1,9
15Jan3	Other	04.01.15 01:29:05	47,399	7,177	2,9	-1,4
15Jan4	East2	04.01.15 06:32:06	47,376	7,153	0,1	-1,7
15Jan11	AF1	06.01.15 13:31:45	47,389	7,171	1,5	-0,8
vgl9	Other	06.01.15 23:31:21	47,290	7,122	19,2	0,8
15Jan20	AF1	08.01.15 14:17:36	47,391	7,187	1,5	-1,0
15Jan26	North2	13.01.15 09:30:47	47,433	7,146	-0,4	0,5
15Jan30	Other	14.01.15 12:57:22	47,381	7,188	-0,2	-0,5
15Jan39	Other	26.01.15 17:39:46	47,396	7,140	0,0	-0,9
15Jan40	Other	27.01.15 00:58:03	47,414	7,166	4,9	-0,6
15Jan42	Other	28.01.15 01:26:03	47,363	7,161	0,8	-1,4
15Mar11	Other	06.03.15 12:37:10	47,371	7,034	0,3	1,0
15Mar17	Other	12.03.15 10:29:22	47,369	7,032	0,3	0,7
vgl6	Other	18.03.15 15:03:29	47,334	7,173	2,0	1,1
15Mar46	North2	24.03.15 12:12:20	47,434	7,151	2,0	1,2
15Apr17	Center2	04.04.15 04:11:28	47,373	7,153	-0,3	-1,8
15Apr23	North2	07.04.15 12:37:02	47,428	7,156	1,1	1,2
15Apr26	North4	08.04.15 14:22:16	47,422	7,144	0,1	-0,1
15Apr52	North4	16.04.15 09:27:41	47,397	7,144	4,2	0,0
15Apr57	Center3	17.04.15 12:58:07	47,355	7,146	-0,3	-0,9
15Apr60	North4	20.04.15 13:23:49	47,411	7,149	2,4	0,1
15Apr85	South3	28.04.15 12:16:28	47,323	7,137	4,8	1,2
15May41	North3	12.05.15 13:00:30	47,415	7,136	4,4	1,1
15May60	South3	20.05.15 12:19:19	47,329	7,166	1,5	0,9

D.2. EREIGNISTABELLE, ZEITLICH SORTIERT

Name	Cluster	Datum	Latitude [°]	Longitude [°]	Tiefe [km]	Magni- tude M_L
15May69	North3	22.05.15 13:31:34	47,427	7,140	0,4	0,9
15May78	North3	27.05.15 09:28:41	47,422	7,132	2,9	1,1
15Jun4	Other	01.06.15 11:59:52	47,380	7,178	-0,2	0,0
15Jun17	AF2	03.06.15 10:06:30	47,385	7,179	-0,2	0,9
15Jun34	AF1	06.06.15 11:40:20	47,368	7,161	0,1	1,7
vgl8	South1	11.06.15 11:59:39	47,330	7,172	0,6	1,1
15Jun50	AF2	12.06.15 09:48:33	47,379	7,178	-0,7	0,9
15Jun68	AF2	19.06.15 10:01:13	47,380	7,179	0,5	0,5
15Jun80	AF2	25.06.15 14:41:33	47,379	7,184	0,6	0,9
15Jun83	Other	27.06.15 13:37:09	47,449	7,132	0,8	-0,6
15Jun86	North2	29.06.15 11:10:00	47,412	7,161	5,4	0,5
15Jun89	North2	30.06.15 12:23:30	47,419	7,151	-0,2	-0,2
15Jul13	Other	07.07.15 08:46:14	47,409	7,178	2,3	-0,8
vgl10	South1	14.07.15 09:00:08	47,330	7,176	-0,2	1,2
15Jul29	Other	14.07.15 12:54:05	47,331	7,118	2,8	0,0
15Jul35	North2	16.07.15 05:33:20	47,433	7,144	1,9	0,6
15Jul63	Other	26.07.15 06:42:55	47,355	7,115	2,0	-1,0
vgl11	West1	07.08.15 05:12:13	47,333	7,065	3,6	1,1
15Aug18	West1	09.08.15 09:41:44	47,352	7,061	3,5	-0,4
vgl12	West1	09.08.15 12:31:21	47,368	7,054	5,4	1,0
15Aug28	Other	13.08.15 10:17:10	47,378	7,166	-0,4	-2,0
15Aug41	West1	15.08.15 11:18:49	47,385	7,053	4,4	-0,1
vgl13	West1	17.08.15 23:31:45	47,395	7,044	4,8	0,5
15Aug46	South2	18.08.15 13:40:28	47,353	7,180	0,5	0,7
Expl4	South2	18.09.15 12:30:47	47,323	7,172	0,3	1,1
15Sep75	West1	24.09.15 02:45:03	47,388	7,059	4,1	-0,6
15Sep76	West1	24.09.15 02:48:37	47,387	7,063	5,1	-0,6

Tabelle D.1: Alle lokalisierten Ereignisse, chronologisch sortiert.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Übersicht der Verursacher konditionierter Abfälle	26
2.2	Unterschiede der Einteilung in Aktivitätskategorien	27
2.3	Reaktoren in Deutschland	28
2.4	Rohstoffkreislauf in AKWs	30
3.1	Schema einer Realisierung eines Endlagers mittels Mehrbarrierensystems	36
3.2	Schema eines Mehrbarrierensystems mit möglichen Leckagewegen	36
3.3	Untersuchungswürdige Steinsalz- und Tonsteinformationen in Deutschland	41
3.4	Zeitskala der Endlagerung im Vergleich mit Ereignissen der Menschheitsgeschichte	42
3.5	Erdbebenzonen in Deutschland	47
3.6	Karte der Untersuchungsstandorte, Zwischenlager, Endlager und (Pilot-) Konditionierungsanlagen in Deutschland	49
3.7	Visualisierung des seismischen Methodenvergleichs	54
3.8	Zusammensetzung von Supersonogrammen	56
3.9	Berechnungsschritte vom Seismo- über Spektro- zum Sonogramm	57
3.10	Screenshot von <i>SonoView</i>	58
4.1	Lage des Mont Terri Felslabors in der Schweiz	61
4.2	Ausbaustufen des Felslabors Mont Terri	62
4.3	Palaeogeografische Phasen des zentralen Atlantiks und im Bereich der Tethys	64
4.4	Geologischer Schnitt durch Mont Terri und Mont Russelin	65
4.5	Stratigrafische Sequenz	66
4.6	Übersicht der Grabensysteme und Tektonik im größeren Umfeld des Untersuchungsgebiets	67
4.7	Zusammenfassung der Spannungsinversion in der Schweiz	68
4.8	Regionales Messnetzwerk und damit gemessene Hintergrundseismizität	70
4.9	Relokalisierte Ereignisse aus Deichmann et al. (2012)	71

4.10	Karten des Messnetzwerks	73
4.11	Installation der permanenten SNS	74
4.12	Schematischer Zoom von Abbildung 4.10(b) im Laborbereich	76
4.13	Eigenrauschen und spektrale Leistungsdichte für verschiedene Sensor/Di- gitizer Paare	78
4.14	Standortvergleich: Spektrale Leistungsdichten	79
4.15	Ereignis vom 17.2.16	82
4.16	Lokalisierung im Lösungsraum	83
4.17	Kartenansicht mit Tiefenschnitten der vom SED (2016) lokalisierten Er- eignisse	85
4.18	Vergleich der Lokalisierungen	86
4.19	Probabilistische Auswertungen im Vergleich	87
4.20	Sprengungen und ihre bestätigten Quellen	89
4.21	Backazimuth und durchschnittliche Abweichung	91
4.22	Durchschnittlichen Abweichungen pro 30° bin pro SNS	92
4.23	Standorte der unterirdischen SNS im geologischen Querschnitt	93
4.24	Entfernungskorrekturkurven für <i>HypoLine</i> , SED und LED	95
4.25	Magnituden aller Stationen für ausgewählte nahe Beben im September 2015	97
4.26	Lokale Seismizität im 100 km Radius und Tiefenschnitte	99
4.27	Magnituden-Frequenz Diagramm für Mont Terri	100
4.28	Zoom von Abbildung 4.26	100
4.29	Alle aufgezeichneten Erdbeben im Magnitude Epizentraldistanz Diagramm	101
4.30	Probabilistische Lösungen der Ereignisse aus Abbildung 4.28	102
4.31	Histogramme der Ereignistiefen	102
4.32	Kreuzkorrelationsmatrix naher Ereignisse chronologisch sortiert (10 s). . . .	104
4.33	Kreuzkorrelationsmatrix naher Ereignisse chronologisch sortiert (1 s). . . .	105
4.34	Dendrogramm der gemittelten Kreuzkorrelationskoeffizienten	107
4.35	Abbildung 4.28 ohne Tiefenbeschränkung in der Draufsicht	108
4.36	Zeitliche Verteilung der in Abbildung 4.35 gezeigten Ereignisse	108
4.37	Seismogramm und Sonogramm von hist und 15May42	110
4.38	Ergebnis der Principal Component Analysis und Self Organizing Maps . .	111
4.39	Zoom von Abbildung 4.28	112
4.40	Relativlokalisierung der Ereignisse aus Abbildung 4.28 mit <i>HypoDD</i>	114
4.41	Relativlokalisierung im Nahbereich	115
4.42	Relativlokalisierung von Clustern	115
A.1	Geological cross-section through the Mont Terri anticline	127

A.2	Contour map with local earthquake activity.	128
A.3	The laboratory, main fault and seismometer locations on a structural map	129
A.4	Location of all SNS during all campaigns	130
A.5	Noise range of I95 values for surface and subsurface stations during CIII. .	132
A.6	Located and detected events of each campaign	133
C.1	Veranschaulichung des double-difference earthquake relocation Algorithmus	148
D.1	Seismogramm und Sonogramm des Clusters North1	149
D.2	Seismogramm und Sonogramm des Clusters North2	150
D.3	Seismogramm und Sonogramm des Clusters North3	151
D.4	Seismogramm und Sonogramm des Clusters North4	152
D.5	Seismogramm und Sonogramm des Clusters South1	153
D.6	Seismogramm und Sonogramm des Clusters South2	154
D.7	Seismogramm und Sonogramm des Clusters South3	155
D.8	Seismogramm und Sonogramm des Clusters East1	155
D.9	Seismogramm und Sonogramm des Clusters East2	156
D.10	Seismogramm und Sonogramm des Clusters West1	157
D.11	Seismogramm und Sonogramm des Clusters Center1	158
D.12	Seismogramm und Sonogramm des Clusters Center2	158
D.13	Seismogramm und Sonogramm des Clusters Center3	158
D.14	Seismogramm und Sonogramm des Clusters AF1	159
D.15	Seismogramm und Sonogramm des Clusters AF2	160
D.16	Seismogramm und Sonogramm des Clusters Other	161
D.17	Seismogramm und Sonogramm des Clusters Other	162
D.18	Seismogramm und Sonogramm des Clusters Other	163
D.19	Seismogramm und Sonogramm des Clusters misc	164
D.20	Seismogramm und Sonogramm des Clusters misc2	165
D.21	Dendrogramm aller Ereignisse (1/6)	166
D.22	Dendrogramm aller Ereignisse (2/6)	167
D.23	Dendrogramm aller Ereignisse (3/6)	168
D.24	Dendrogramm aller Ereignisse (4/6)	169
D.25	Dendrogramm aller Ereignisse (5/6)	170
D.26	Dendrogramm aller Ereignisse (6/6)	171

Tabellenverzeichnis

3.1	Übersicht zu Studien verschiedener Organisationen über mögliche Wirtsgesteine (Grundfeld und Smellie, 2004).	38
3.2	Eigenschaften von potentiellen Wirtsgesteinen nach BGR (2007), grün: günstige, gelb: mittlere, rot: ungünstige Eigenschaft für die sichere Verwahrung radioaktiver Abfallstoffe.	39
3.3	Ablauf der Endlagersuche (Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, 2016).	44
3.4	Übersicht der Testsites weltweit	50
3.5	Methodenvergleich seismischer Überwachungsnetze	53
4.1	Übersicht der verwendeten Seismometer	75
4.2	Kalibrierungsbeben	84
4.3	Verwendetes Tiefenmodell	88
4.4	Kalibrierungsbeben	88
4.5	Abweichungen zwischen unterschiedlichen Lokalisierungen der selben Ereignisse	88
4.6	Abweichungen zwischen den Lokalisierungen von Sprengungen und ihrem verursachenden Steinbruch	90
4.7	Durchschnittlicher Betrag der azimuthalen Abweichung	90
4.8	Durchschnittliche Abweichung bei 135° für SNS1	93
4.9	Magnituden für Erdbeben im September und Abweichungen	97
4.10	Übersicht und finale Klassifizierung der hierarchischen Clusterungen	106
4.11	Statistiken der einzelnen Cluster	109
B.1	Prozentuale Verfügbarkeit einzelner Stationen, basierend auf ganzen verfügbaren Tagen.	136
D.1	Ereignistabelle	174

Literaturverzeichnis

- Abednego, M., Blascheck, P., Schefer, S., Nussbaum, C., Joswig, M., Bossart, P., und Mosar, J. (2018). Seismotectonic analysis around the mont terri rock laboratory (switzerland): a pilot study. pages 235–253. 123
- Akend (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Technical report. 34, 35, 36, 40, 44, 45, 46, 48, 51
- Baer, M. und Kradolfer, U. (1987). An automatic phase picker for local and teleseismic events. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77(4):1437–1445. 81
- Baisch, Stefan Fritschen, R. Groos, J. Kraft, Toni Plenefisch, T. Plenkers, K. Ritter, J. Wassermann, J. (2012). Empfehlungen zur Überwachung induzierter Seismizität - Positionspapier des FKPE. *DGG-Mitteilungen*. 53, 131
- Becker, D., Cailleau, B., Dahm, T., Shapiro, und Kaiser, D. (2010). Stress triggering and stress memory observed from acoustic emission records in a salt mine. *Geophysical Journal International*, 182(2):933–948. 55
- Becker, D.-A., Storck, D., Buhmann, R., Alonso, J., Cormenzana, J.-L., Hugi, M., van Gemert, F., O’Sullivan, P., Laciok, A., Marivoet, J., Sillen, X., Nordman, H., Vieno, T., und Niemeyer, M. (2002). Testing of Safety and Performance Indicators (SPIN). Technical report. 38
- BFS (1990). Plan – Endlager für radioaktive Abfälle – Kurzfassung – Schachtanlage Konrad, Salzgitter. Technical report. 38
- BGR (2007). Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland - Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen. 39, 40, 41, 45, 46, 179
- Blaesi, H. R., Peters, T., und Mazurek, M. (1991). Der Opalinuston des Mont Terri (Kanton Jura). Lithologie, Mineralogie und physiko-chemische Gesteinsparameter. *Nagra intern. Rep.* 63

- Blascheck, P., Joswig, M., Meier, E., Nussbaum, C., und Theurillat, T. (2013). SM-B (High resolution seismic monitoring). Technical report. 72
- Blascheck, P., Nussbaum, C., und Joswig, M. (2015). Mont Terri research rock laboratory (Switzerland): Pilot project for assessing the seismic impact on a deep geological disposal for radioactive wastes. In *Proceedings of the ISRM Regional Symposium EUROCK 2015 & 64th Geomechanics Colloquium - Future Development of Rock Mechanics*, Schubert, W. & Kluckner, A. (eds), Salzburg, Austria, 7.-10. October 2015. Austrian Society for Geomechanics: Salzburg., pages 353–358. 57
- BMUB (2016). <http://www.bmub.bund.de/themen/atomenergie-strahlenschutz/nukleare-sicherheit/internationales/internationale-uebereinkommen/gemeinsames-sicherheitsuebereinkommen/>. 42
- Bock, H. (2008). TECHNICAL REPORT 2008-04 RA Experiment Updated Review of the Rock Mechanics Properties of the Opalinus Clay of the Mont Terri URL based on Laboratory and Field Testing. Technical Report November. 94
- Bossart, P., Meier, P. M., Moeri, A., Trick, T., und Mayor, J. C. (2002). Geological and hydraulic characterisation of the excavation disturbed zone in the Opalinus Clay of the Mont Terri Rock Laboratory. *Engineering Geology*, 66(1-2):19–38. 43
- Bossart, P. und Thury, M. (2008). Mont Terri Rock Laboratory: Project, Programme 1996 – 2007 and Results. *Reports of the Swiss Geological Survey*, 3. 61, 63, 126
- Bruns, J., Dershowitz, W., Emsley, S., und Mira, J. (2004). Sicherheitstechnische Einzel-fragen Modellrechnungen. 43
- Bundesamt für Energie BFE (2011). Grundlagen für die Energiestrategie des Bundesrates; Frühjahr 2011, Aktualisierung der Energieperspektiven 2035 (energiewirtschaftliche Modell). Bern: BFE. 61, 126
- Bundesamt für Strahlenschutz (2005). Konzeptionelle und Sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung Radioaktiver Abfälle - Wirtsgesteine im Vergleich. Technical report. 37, 40, 46
- Bundesamt für Strahlenschutz (2016). www.bfs.de. 26
- Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit (2015). Verzeichnis radioaktiver Abfälle (Bestand zum 31 . Dezember 2014 und Prognose) Inhaltsverzeichnis. Technical Report August. 31

- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2008). Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland – Das Endlagerprojekt Gorleben. Technical report. 37, 52
- Burkhard, M. und Sommaruga, A. (1998). Evolution of the western Swiss Molasse basin: structural relations with the Alps and the Jura belt. *Cenozoic foreland basins of Western Europe*, 134:279–298. 63
- Caer T., Maillot, B., Souloumiac, P., Leturmy, P., Frizon De Lamotte, D., und Nussbaum, C. (2014). Structural and mechanical analysis of the Mont Terri anticline at the Jura front (NW Switzerland). *Submitted to J. Struct. Geol.* 126, 127
- Crotwell, H. P., Owens, T. J., und Ritsema, J. (1999). The TauP Toolkit: Flexible Seismic Travel-time and Ray-path Utilities. *Seismological Research Letters*, 70(2):154–160. 80
- Deichmann, N., Diehl, T., und Braunmiller, J. (2012). The earthquake sequences of Saint Ursanne. Technical report. 71, 72, 103, 110, 128, 132, 175
- Deichmann, N., Swiss Seismological Service, und ETH Zürich (2014). Earthquakes in Switzerland and surrounding regions 1996-2012, Version 2014.1 compiled by Nicholas Deichmann. page 203 pp. 73, 81
- Departement of Energy (1996). *Title 40 CFR 191 compliance certification application for the Waste Isolation Pilot Plant.* 38
- Deutsche Norm (2005). Bauten in deutschen Erdbebengebieten - Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten. 47
- Fäh, D., Giardini, D., Kästli, P., Deichmann, N., Gisler, M., Schwarz-Zanetti, G., Alvarez-Rubio, S., Sellami, S., Edwards, B., Allmann, B., Bethmann, F., Woessner, J., Gassner-Stamm, G., Fritsche, S., und Eberhard, D. (2011). ECOS-09 Earthquake Catalogue of Switzerland Release 2011. Report and Database. Technical report. 68
- Federal Office of Topography swisstopo; Wabern; Switzerland (2000). Tectonic Map of Switzerland 1:500,000. 73
- Freeze, G. A., Brodsky, N. S., und Swift, P. N. (2001). The Development of Information Catalogued in REVOO of the YMP FEP Database. Technical report. 38
- Freivogel, M. und Huggenberger, P. (2003). Modellierung bilanzierter Profile im Gebiet Mont Terri-La Croix (Kanton Jura). In *P. Heitzmann & J.-P. Tripet (Eds.), Mont Terri Project-geology, paleohydrology and stress field of the Mont Terri region. Bern: Rapports de l'OFEG, Série Géologie, No. 4.* 126

- Geckeis, H., Röhlig, K.-J., und Mengel, K. (2012). Endlagerung radioaktiver Abfälle. *Chemie in unserer Zeit*, 46(5):282–293. 42
- GFZ (2013). GEOFON Program <http://geofon.gfz-potsdam.de/>. 132
- Grundfeld, B. und Smellie, J. (2004). Prozessorientierte Auswertung von natürlichen und anthropogenen Analoga und ihre Bewertung als vertrauensbildendes Element bei Sicherheitsbewertungen für Anlagen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle., Kemakta Konsult AB, Bericht (im Auftrag des BfS). Technical report. 36, 38, 179
- Häge, M. (2009). *Entwicklung und Validierung eines neuen Verfahrens zur Kartierung seismisch aktiver Verwerfungen durch Kurzzeit-Kleinstbebenmessungen*. PhD thesis, Institut für Geophysik, Universität Stuttgart. 57, 129
- Häge, M., Blascheck, P., und Joswig, M. (2013). EGS hydraulic stimulation monitoring by surface arrays - location accuracy and completeness magnitude: The Basel Deep Heat Mining Project case study. *Journal of Seismology*, 17(1):51–61. 56, 99, 129
- Häge, M. und Joswig, M. (2009a). Mapping local microseismicity using short-term tripartite small array installations — Case study: Coy region (SE Spain). *Tectonophysics*, 471(3-4):225–231. 56
- Häge, M. und Joswig, M. (2009b). Spatiotemporal characterization of interswarm period seismicity in the focal area Nový Kostel (West Bohemia/Vogtland) by a short-term microseismic study. *Geophysical Journal International*, 179(2):1071–1079. 56, 129
- Häge, M. und Joswig, M. (2009c). Spatiotemporal distribution of aftershocks of the 2004 December 5 M_L = 5.4 Waldkirch (Germany) earthquake. *Geophysical Journal International*, 178(3):1523–1532. 56, 129
- Hostettler, B., Reisdorf, A. G., Jaeggi, D., Deplazes, G., Bläsi, H., Morard, A., Feist-Burkhardt, S., Waltschew, A., Dietze, V., und Menkveld-Gfeller, U. (2017). Litho- and biostratigraphy of the Opalinus Clay and bounding formations in the Mont Terri rock laboratory (Switzerland). *Swiss Journal of Geosciences*, in submiss. 66
- Hudson, J. A. (1999). Lesson learned from 20 years of UK rock mechanics research for radioactive waste disposal. *International Society For Rock Mechanics News Journal*, 6(1):27–41. 35
- Husen, S. (2003). Probabilistic earthquake location in complex three-dimensional velocity models: Application to Switzerland. *Journal of Geophysical Research*, 108(B2):2077. 81, 84, 87, 88

- Ibele, T. (2011). *Tectonics of the western swiss Molasse Basin during cenozoic times*. PhD thesis. 63
- International Atomic Energy Agency (1994). *Classification of Radioactive Waste: a safety guide*. Technical report. 26
- International Atomic Energy Agency (1995). *Principles of Radioactive Waste Management Safety Fundamentals*. 45
- International Atomic Energy Agency (1997). *Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radiactive Waste Management*. 45
- International Atomic Energy Agency (2001a). *Monitoring of geological repositories for high level radioactive waste*. Technical Report April. 40, 43
- International Atomic Energy Agency (2001b). *The use of scientific and technical results from underground research laboratory investigations for the geological disposal of radioactive waste*. Technical Report September. 50
- International Maritime Organization (1996). *London Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter*. 34
- Jaeggi, D., Bossart, P., und Wymann, L. (2014). *Kompilation der lithologischen Variabilität und Eigenschaften des Opalinus-Ton im Felslabor Mont Terri*. (September). 94
- Jesus, A., Kjell, A., und Johan, A. (1992). *Safety assessment of radioactive waste repositories: Systematic approaches to scenario development*. Report of the NEA Working Group on the identification and selection of scenarios for the safety assessment of radioactive waste disposal, Nuclear Energy Ag. Technical report. 38
- JNC (1999). *H12:Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan*. Technical report. 38
- Joswig, M. (1999). *Automated Processing of Seismograms by SparseNet*. *Seism. Res. Letters*, 70:705–711. 55
- Joswig, M. (2008). *Nanoseismic monitoring fills the gap between microseismic networks and passiv seismic*. *First Break*, 26:121–128. 53, 55, 56, 57, 129, 134
- Käbel, H., Keller, S., und Gerardi, J. (1999). *Szenarienanalyse Geologische Langzeitbewertung und Ermittlung der Zuflussszenarien ohne technische Maßnahmen*. Technical report. 38

- Kastrup, U., Zoback, M., Deichmann, N., Evans, K. F., Giardini, D., und Michael, A. J. (2004a). Stress field variations in the Swiss Alps and the northern Alpine foreland derived from inversion of fault plane solutions. *Journal of Geophysical Research*, 109(B1):1–22. 68
- Kastrup, U., Zoback, M., Deichmann, N., Evans, K. F., Giardini, D., und Michael, A. J. (2004b). Stress field variations in the Swiss Alps and the northern Alpine foreland derived from inversion of fault plane solutions. 127
- Keller, S. (2001a). Ermittlung und Analyse von Szenarien für den Standort Gorleben – Auswahl (screening) von ZEP, BGR Archiv-Nr. 0121142. Technical report. 38
- Keller, S. (2001b). Projekt Gorleben. Zusammenstellung von Zuständen, Ereignissen und Prozessen (ZEP) als Basis für die Ermittlung von Szenarien (Standort Gorleben). 38
- Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016). Verantwortung für die Zukunft - Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandorts. Technical report. 28, 29, 30, 31, 34, 44, 45, 46, 179
- Kradolfer, U. (1984). *Magnitudenkalibrierung von Erdbebenstationen in der Schweiz*. PhD thesis. 94, 95
- Kraft, T., Mignan, A., und Giardini, D. (2013). Optimization of a large-scale microseismic monitoring network in northern Switzerland. *Geophysical Journal International*, 195(1):474–490. 69, 98
- Kurz, J. H., Köppel, S., M., L. L., Schechinger, B., und Grosse, C. U. (2008). Source localization. In *Acoustic Emission Testing*, pages 101–147. Springer Berlin Heidelberg. 55
- Landtwing, D., Kraft, T., und Wiemer, S. (2014). Erdbebengefährdung und induzierte Seismizität im Kanton Zug Impressum. Technical report. 69
- Lardot, N. (2016). Wikipedia1. 30
- Laubscher, H. P. (1961). Die Fernschubhypothese der Jurafaltung. *Eclogae Geol. Helv*, 54(1):221–282. 63
- Lavrov, A., Vervoort, A., Filimonov, Y., Wevers, M., und Mertens, J. (2002). Acoustic emission in host-rock material for radioactive waste disposal: Comparison between clay and rock salt. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 61(4):379–387. 42

- Le Gonidec, Y., Sarout, J., Wassermann, J., und Nussbaum, C. (2014). Damage initiation and propagation assessed from stress-induced microseismic events during a mine-by test in the Opalinus Clay. *Geophysical Journal International*, 198(1):126–139. 43
- LED (2016). Erdbebendienst Südwest - Landeserdbebendienst Baden-Württemberg. 80
- Leydecker, G. (2011). *Erdbebenkatalog für Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 800 bis 2008. (Earthquake catalogue for Germany and adjacent areas for the years 800 to 2008)*. 48
- Lomax, A. (2018). NonLinLoc Homepage <http://alomax.free.fr>. 148
- Lomax, A., Michelini, A., und Curtis, A. (2009). Earthquake location, direct, global-search methods. In *Complexity In Encyclopedia of Complexity and System Science, Part 5*, number i, pages 2–449. 148
- Lomax, A., Virieux, J., Volant, P., und Berge-Thierry, C. (2000). Probabilistic Earthquake Location in 3D and Layered Models. pages 101–134. 81, 148
- Luyet, M. (2017). Etude sismotectonique de séquences microsismiques au sud-est du jura suisse en 2014 et 2015 à l'aide de sonogrammes et d'analyses de similarité de formes d'ondes, travail de master, département de géosciences, sciences de la terre, université de fribourg, fribourg, suisse. Master's thesis. 123
- Mazurek, M., Hurford, A. J., und Leu, W. (2006). Unravelling the multi-stage burial history of the Swiss Molasse Basin: integration of apatite fission track, vitrinite reflectance and biomarker isomerisation analysis. *Basin Research*, 18:27 – 50. 65
- Meier, E., Detzner, K., Widmer-Schmidrig, R., Wielandt, E., Blascheck, P., Joswig, M., Nussbaum, C., und Theurillat, T. (2013). TECHNICAL NOTE 2013-02 Record of seismic fingerprint - Feasibility study using highest precision seismic (STS2.5) and deformation tools (HLS-PSI-SLS). Technical Report June. 130
- Mengel, K., Röhlig, K.-J., und Geckeis, H. (2012). Endlagerung radioaktiver Abfälle. *Chemie in unserer Zeit*, 46(4):208–217. 37, 39
- Miller, B., Arthur, J., Bruno, J., Hooker, P., Richardson, P., Robinson, C., Arcos, D., und West, J. (2002). Establishing baseline conditions and monitoring during construction of the Olkiluoto URCF access ramp Establishing baseline conditions and monitoring during construction of the Olkiluoto URCF access ramp. Technical Report December. 43

- Mont Terri (2016). <http://www.mont-terri.ch>. 39, 61, 62, 63, 76
- Nagra (1994). Kristallin-I - Safety Assessment Report. Technical report. 38
- NAGRA (2002). Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste. *NAGRA Technical Report NTB 02-05*, (December). 43
- NIRAS/ONDRAF (2001). Technical overview of the SAFIR 2 report. Technical Report December. 38
- Norris, S., Bailey, L. E. F., Askarieh, M. M., und Hickford, G. E. (1997). An Assessment of the Post-closure Performance of a Deep Waste Repository at Sellafield: Volume 4: The Gas Pathway. Technical Report December. 38
- Nussbaum, C., Bossart, P., Amann, F., und Aubourg, C. (2011). Analysis of tectonic structures and excavation induced fractures in the Opalinus Clay, Mont Terri underground rock laboratory (Switzerland). *Swiss Journal of Geosciences*, 104(2):187–210. 126
- Pers, K., Skagius, K., Södergren, S., Wiborgh, M., Hedin, A., Morén, L., Sellin, P., Ström, A., Pusch, R., und Bruno, J. (1999). Identification and structuring of processes, SKB Technical Report 99-20, Swedish Nuclear Fuel and Waste Co, Stockholm Sweden. Technical report. 38
- Philippe, Y. (1995). *Rampes latérales et zones de transfert dans les chaînes plissées : géométrie , condition de formation et pièges structuraux associés*. PhD thesis. 63
- Referat RS III 3 (Sonstige Angelegenheiten der nuklearen Entsorgung) (2009). Gemeinsames Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle. 27, 28, 42, 45, 49, 50, 51
- RéNaSS (2016). <http://renass.unistra.fr/>. 80
- Richter, C. F. (1935). An instrumental earthquake magnitude scale. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 25:1–32. 94
- Röhlig, K.-J., Geckeis, H., und Mengel, K. (2012). Endlagerung radioaktiver Abfälle. *Chemie in unserer Zeit*, 46(3):140–149. 29, 30, 31, 34, 51
- Rümpker, G., Homuth, B., Lindenfeld, M., und Winter, H. (2013). Seismisches Monitoring im Zusammenhang Erlaubnisfelder Hessen. 55

- Saari, J. (2003). Seismic Network at the Olkiluoto Site. Technical Report 37. 43, 52
- Schaeren, G. und Norbert, J. (1989). Tunnels du Mont Terri et du Mont Russelin—La traversée des “roches à risques”; marnes et marnes à anhydrite. *SIA-Dokumentation D 37*, pages 19–24. 63
- Schmid, S. M., Fügenschuh, B., Kissling, E., und Schuster, R. (2004). Tectonic map and overall architecture of the Alpine orogen. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 97(1):93–117. 67
- SED (2016). Latest Earthquakes Switzerland & World <http://www.seismo.ethz.ch>. 68, 69, 70, 75, 80, 82, 84, 85, 88, 127, 128, 132, 176
- Seismicportal (2016). www.seismicportal.eu. 68, 80
- Sick, B. (2016). *Temporal and spectral pattern recognition for detection and combined network and array waveform coherence analysis for location of seismic events*. PhD thesis. 90, 92, 111, 112
- Sick, B., Walter, M., und Joswig, M. (2012). Visual Event Screening of Continuous Seismic Data by Supersonograms. Recent Advances in Nuclear Explosion Monitoring. *Pure and Applied Geophysics*, 2. 55, 56, 57, 128, 129
- SKB (1999). Deep repository for long-lived low- and intermediate-level waste. Preliminary safety assessment, SKB Technical Report 99-28, Swedish Nuclear Fuel and Waste Co, Stockholm Sweden. Technical report. 38
- SKB (2001). Final repository for radioactive operational waste SFR 1. Final safety assessment report, Swedish Nuclear Fuel and Waste Co, Stockholm, Sweden. Technical report. 38
- SKI (1996). SKI SITE-94. Deep repository performance assessment project, SKI Report 96:36, Swedish Nuclear Power Inspectorate, Stockholm Sweden. Technical report. 38
- Sommaruga, A. (1999). Décollement tectonics in the Jura forelandfold-and-thrust belt. *Marine and Petroleum Geology*, 16(2):111–134. 63
- Souley, M., Homand, F., Pepa, S., und Hoxha, D. (2001). Damage-induced permeability changes in granite: A case example at the URL in Canada. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(2):297–310. 43

- Stammler, K., Fleig, S., Hammer, J., Hartmann, G., Koch, K., und Schlote, H. (2013). Projekt Gorleben Überwachung der Seismizität im Bereich des Salzstocks Gorleben. Technical report. 53
- Stange, S. (2006). M L Determination for Local and Regional Events Using a Sparse Network in Southwestern Germany. *Journal of Seismology*, 10(2):247–257. 94, 95
- Stephens, M. E., Rowat, J. H., Dolinar, G. M., Lange, B. A., Killey, R. W. D., Stephenson M., Charlesworth, D. H., Selander, W. N., Power, E. P., und Lane, F. E. (1997). Analysis of safety issues for the preliminary safety analysis report on the intrusion resistant underground structure, Document AECLMISC-386, available from SDDO, AECL, Chalk River, Ontario, Canada K 0J 1J0. Technical report. 38
- Thury, M. und Bossart, P. (1999). Results of the hydrogeological, geochemical and geotechnical experiments performed in the Opalinus Clay (1996-1997). Technical report, Geological report. 63
- Vieno, T. und Nordman, H. (1999). Safety assessment of spent fuel disposal in Hästhölm, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara -TILA-99. Technical report. 38
- Vieno, T. und Nordman, H. (1998). VLJ Repository safety analysis, Teollisuuden Voima Oy, Report TVO 1/98. Technical report. 38
- Vouillamoz, N. (2015). *Microseismic characterization of Fribourg area (Switzerland) by Nanoseismic Monitoring Figures & Tables*. PhD thesis. 57, 69, 96, 103
- Vouillamoz, N., Sue, C., Champagnac, J. D., und Calcagno, P. (2012). 3D cartographic modeling of the Alpine arc. *Tectonophysics*, 579:131–143. 67
- Vouillamoz, N., Wust-bloch, G. H., Abednego, M., und Mosar, J. (2016). Optimizing Event Detection and Location in Low-Seismicity Zones : Case Study from Western Switzerland. *Bulletin of the Seismological Society of America*, BSSA Early:1–16. 57
- Waldhauser, F. (2001). HypoDD: A computer program to compute double-difference earthquake locations. 147
- Waldhauser, F. und Ellsworth, W. L. (2000). A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward Fault, CA. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(December):1353–1368. 147, 148
- Walter, M. und Joswig, M. (2008). Seismic monitoring of fracture processes generated by a creeping landslide in the Vorarlberg Alps. *First Break*, 26:131–135. 56, 129

- Walter, M. und Joswig, M. (2009). Seismic characterization of slope dynamics caused by softrock-landslides: The Super-Sauze case study. *Proceedings of the International Conference on Landslide Processes: from geomorphologic mapping to dynamic modelling, Strasbourg*, pages 215–220. 56, 129
- Walter, M., Walser, M., und Joswig, M. (2011). Mapping Rainfall-Triggered Slidequakes and Seismic Landslide-Volume Estimation at Heumoes Slope. *Vadose Zone Journal*, 10(2):487. 56, 129
- Weissert, H. und Stössel, I. (2015). *Der Ozean im Gebirge*. 3rd edition. 62, 63, 64, 65, 66, 67
- Wessel, P. und Smith, W. (2013). Generic Mapping Tools: Improved version released. *EOS Trans. AGU*, 94(45):409–10. 147
- Wessel, P. und Smith, W. H. F. (1998a). New, improved version of generic mapping tools released. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 79(47):579–579. 147
- Wessel, P. und Smith, W. H. F. (1998b). New, improved version of generic mapping tools released. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 79(47):579–579. 147
- Wessel, P. und W.H.F., S. (1991). Free software Helps Maps and Display Data. *EOS*, 72(441):445–446. 147
- Widmer-Schmidrig, R. und Schwaderer, U. (2013). Sensitivity of modern broad-band seismometers at high frequencies - evaluation of a huddle test at BFO. Poster presentation at DGG, Karlsruhe. 78, 131
- Woessner, J. und Wiemer, S. (2005). Assessing the Quality of Earthquake Catalogues: Estimating the Magnitude of Completeness and Its Uncertainty. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(2):684–698. 98
- Wust-Bloch, G. H. und Joswig, M. (2006). Pre-collapse identification of sinkholes in unconsolidated media at Dead Sea area by 'nanoseismic monitoring' (graphical jackknife location of weak sources by few, low-SNR records). *Geophysical Journal International*, 167:1220–1232. 56, 94, 95, 96, 129, 132