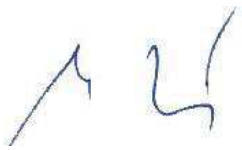
Prof. Dr. Manfred Joswig
Goethestr. 25
40237 Düsseldorf

Gutachten

zur seismischen Gefährdung

durch die Erhöhung des Fördervolumens der Erdgasbohrung Goldenstedt Z23 auf täglich mehr als 500.000 Kubikmeter Erdgas

Auftraggeber:
ExxonMobil Production Deutschland GmbH
Riethorst 12
30659 Hannover



Veröffentlicht am 12.01.2018 Prof. Dr. Manfred Joswig

Inhalt

1. Untersuchungsrahmen und Wirkungspfade **3**

2. Erdgasförderung Goldenstedt **7**

3. Historische Seismizität **10**

4. Seismisches Monitoring **13**

5. Bewertung **16**

6. Literatur **19**

Auftrag und Vorgehensweise

Am 11.11.2016 erteilte ExxonMobil Production Deutschland GmbH (EMPG) dem Verfasser den Auftrag für eine fachliche Stellungnahme. Inhalt der Stellungnahme sollte eine Bewertung der seismischen Gefährdung im Kontext der geplanten Erhöhung des täglichen Fördervolumens der Bohrung Goldenstedt Z23 sein.

Grundlage der Bewertung sind die von EMPG im Rahmen der Erstellung der Umweltverträglichkeitsstudie (UVS) bereitgestellten Unterlagen sowie zwei im Auftrag der EMPG erstellte Untersuchungen der Fa. Seismic Solutions, Tübingen. Die frei zugängliche, wissenschaftliche Literatur und die seismologischen Bulletins sind entsprechend der vermerkten Zitate ausgewertet worden.

1. Untersuchungsrahmen und Wirkungspfade

Die Förderung von Erdgas bedingt eine kontinuierliche Senkung des Lagerstättendrucks von initialen Druckverhältnissen, die abhängig von der Reservoirtiefe bei mehreren hundert bar liegen: Bei Produktionsende bleiben 50 bis 200 bar Restdruck in der Lagerstätte, der sich nach Einschluss durch den Zustrom von Wasser und Gas langsam wieder erhöhen kann. Je nach Gesteinseigenschaften führt diese Druckerniedrigung zu einer Kompaktion im Lagerstättenhorizont, der sich bei mächtigen und porösen Sandsteinformationen als großflächige Bodensenkung von einigen mm bis cm bis an die Erdoberfläche durchpausen kann. Relevant für die Auslösung von Gesteinsbrüchen und Erdbeben sind vorhandene Schwächezonen innerhalb, am Rand und im näheren Umfeld des Reservoirs. Zunächst können sich hier große lokale Unterschiede im regionalen Spannungsfeld aufbauen. Sie resultieren aus der unterschiedlichen Druckabsenkung der Lagerstätte entlang von Kompartmentgrenzen bzw. allgemein von Änderungen in der hydraulischen Durchlässigkeit. Zweite Ursache ist der zusätzliche Spannungseintrag nach Gesteinskontraktion. Diese Spannungsspitzen treffen dann auf ein weniger festes Gestein in den Scherzonen historisch aktiver Verwerfungen – wobei historisch hier im geologischen Kontext viele Millionen Jahre bedeuten kann – und können Erdbeben verursachen.

Allerdings muss zu den beiden Faktoren Spannungsfeld und Schwächezone noch eine geeignete Orientierung der Schwächezone in einem großräumigen, regionalen Spannungsfeld treten, dass den Untergrundzustand auch ohne induzierte Effekte der Gasförderung beschreibt. Dieses Spanungsfeld dominiert bei weitem die Verhältnisse im Untergrund, und es muss jetzt im Besonderen einen hohen Anteil an Scherkräften aufweisen, also nicht nur aus dem hydrostatischen, ungerichteten Druck der darüber liegenden Gesteinsformationen bestehen. Nur dann können die durch Gasproduktion induzierten Spannungen den Gleichgewichtszustand im Umfeld der Erdgaslagerstättte soweit aus der Balance bringen, dass fühlbare oder gar schädigende Erdbeben ausgelöst werden können.

Als Wirkpfade sind auf Basis dieser Zusammenhänge zunächst die Bereiche der unmittelbaren hydraulischen Druckänderung in der Lagerstätte anzusetzen, insbesondere beim Erreichen von vorhandenen Störungszonen. Diese Bereiche sind durch vorherige Gasproduktion aus einer Vielzahl von Bohrungen gut bekannt, insbesondere durch die Kenntnis von im Druckverlauf kommunizierenden Bohrungen bzw. abgegrenzten Kompartments. Zusätzlich kommt für eine Erdbebenauslösung die sog. poro-elastische Spannungsausbreitung in Frage, die auch über Kompartmentgrenzen hinweg, also ohne Absenkung des hydraulischen Drucks vor Ort eine

Verschiebung des Spannungszustands durch eine entfernte Kompaktion bewirkt – gewissermaßen als Nachziehen der benachbarten Gesteinsschichten. Der Bereich poro-elastischer Einflussnahme ist im Gegensatz zur hydraulischen Druckänderung sehr schwer eingrenzbar. Er hängt unter anderem von der Porosität und einem großflächigen Druckabbau in der Lagerstätte ab, um hinreichende Kompaktion zu verursachen. Eine quantitative Festlegung ist nur auf Basis kalibrierter Modellrechnungen möglich, die in aller Regel nicht zur Verfügung stehen, weil die Kenntnis des untertägigen Raumes hierfür unzureichend ist.

Für diese Studie wird der räumliche Untersuchungsrahmen durch oben genannten Wirkmechanismus auf den Bereich des Karbon Horizonts des Goldenstedt-Oythe Feldes beschränkt. Wirkrelevante Druckänderungen sind wegen begrenzter Permeabilität in der Lagerstätte nur im Umkreis weniger km um den Förderpunkt herum möglich. In dieser Studie wird aber konservativ der Wirkbereich als Gesamtheit des hydraulisch abgegrenzten Südblocks von Goldenstedt-Oythe angenommen (Fig. 1). Die Maximalabmessungen dieses Untersuchungsraumes sind 3 km NS und 6 km WO. Hinzu kommt ein äußerer Bereich poro-elastischer Einwirkung, der als ein Kilometer breiter, zusätzlicher Rand angesetzt wird. Auch dies ist für ein nur ca. 15 km^2 großes ‚tight gas' Reservoir geringer Porosität ohne aufgetretene oberflächliche Subsidenz eine konservative Abschätzung, und erhöht das zu begutachtende Störungsinventar gegenüber dem Untersuchungsrahmen von Fig. 1 nicht.

Die Festlegung dieses Untersuchungsrahmens auf Basis des geschilderten Wirkmechanismus betrifft zunächst nur den untertägigen Raum. Es lassen sich die gewählten Konturen auf die Erdoberfläche projizieren, wie dies in Fig. 2 geschehen ist. Diese Projektion kann als Untersuchungsrahmen einer Umweltverträglichkeitsstudie (UVS) adäquat, zu klein oder sogar zu groß sein. Ob ein im untertägigen Untersuchungsraum auftretendes Erdbeben zur Beeinträchtigung von Sach- und Kulturgütern bzw. von menschlicher Gesundheit an der Erdoberfläche führt, hängt immer von Bebenstärke und Entfernung zum Beben ab. Bei Projektion des untertägigen Untersuchungsraums (Fig. 1) mit dort zu verortendem Bebenherd auf die unmittelbar darüber liegende Erdoberfläche (Fig. 2) haben die Erdbebenwellen bereits eine Distanz von 4 bis 5 Kilometern zurückgelegt. Für die hier zur Diskussion stehenden Beben mit maximalen Herdflächen von ca. einem km^2 (siehe Seite 17) führt diese Distanz schon zu einer signifikanten Schwächung der Erdbebenwirkung. Es muss also prinzipiell zwischen der Emission oder Abstrahlung von Erdbebenenergie an der Quelle im Untergrund und der Immission oder Einwirkung von Erdbebenwellen bzw. Bodenerschütterungen an der Erdoberfläche unterschieden werden. Ein Beben gleicher Stärke wirkt sich je nach Entfernung, Tiefe und lokalen Untergrundeffekten unterschiedlich an der Erdoberfläche aus.

Die Grenzwerte der Erderschütterung für Wahrnehmung und Gebäudeschädigung, genauer gesagt die minimale Bodenschwinggeschwindigkeit, ab der Menschen belästigt/erschreckt bzw. Gebäude geschädigt werden können, sind in DIN 4150 festgelegt. Diese Grenzwerte gelten universell, also auch für Verkehrs- und Industrieerschütterungen. Sie sind, im Sinne der Unterscheidung im letzten Kapitel, Grenzwerte der Immission für die Beurteilung der Gefährdung von Sach- und Kulturgütern sowie menschlicher Gesundheit im Kontext einer Umweltverträglichkeitsstudie (UVS).

Die Verknüpfung der Immissionsgrenzwerte mit möglichen Bruchprozessen bzw. Erdbeben als Quelle der Erschütterungen ist Aufgabe von seismologischen Gefährdungs- und Risikostudien. Dabei ist die Abschätzung von möglichen Bebenstärken und ihrer Auftretenswahrscheinlichkeiten im Störfall, also dem nicht bestimmungsgemäßen Betrieb der Anlage ein komplexer Prozess mit vielen Unbekannten und Unsicherheiten, der nicht mit einer gut überschaubaren Katalogisierung der technischen Emissionsquellen, etwa von Lärm oder Geruchsbelästigungen im bestimmungsmäßigen Betrieb zu verwechseln ist. Kommt solch eine seismologische Studie zu dem Schluss, dass unter den zu prüfenden Bedingungen der UVS kein genügend großes Beben auftreten kann, um an der Erdoberfläche überhaupt bemerkt zu werden, schrumpft der obertägige Untersuchungsraum zu Null. Ist umgekehrt ein so starkes Erdbeben als Grenzfall anzunehmen, dass ein Überschreiten der Immissionsgrenzwerte auch Bereiche außerhalb der Oberflächenprojektion von Fig. 2 betrifft, ist der Untersuchungsraum entsprechend größer zu fassen, in dem die Wirkung auf das Schutzgut Mensch einschließlich menschlicher Gesundheit bzw. das Schutzgut Kultur- und sonstige Sachgüter für die Fallgruppe 'nicht bestimmungsgemäßer Betrieb' zu untersuchen ist.

Als Konsequenz dieser Ausführungen wird in diesem Gutachten zunächst kein a priori definierter oberflächlicher Untersuchungsraum angenommen. Stattdessen wird auf Basis der dargelegten Wirkmechanismen im Bereich des untertägigen Untersuchungsraumes von Fig. 1 die Möglichkeit des Auftretens von Erdbeben durch die fortgesetzte Erdgasförderung aus der Bohrung Goldenstedt Z23 untersucht. Erst danach wird geprüft und in Kap. 5 dargelegt, wie sich diese Ergebnisse auf die Definition eines wirkangepassten oberflächlichen Untersuchungsraumes auswirken. Je nach Annahme müssen dann weitere Aspekte der Begutachtung folgen.

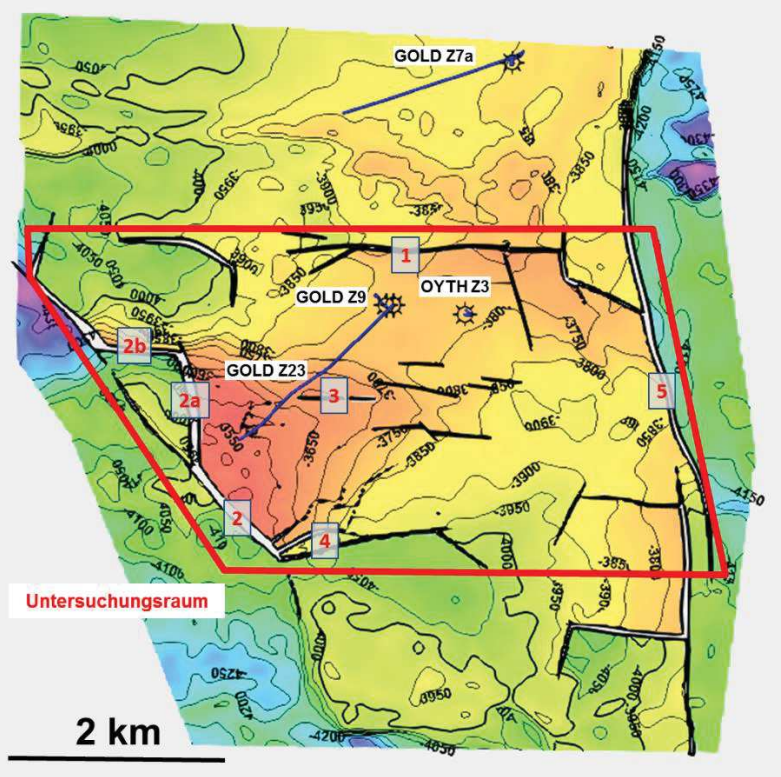


Fig. 1 Untertägiger Untersuchungsraum für seismische Gefährdung durch den Wirkmechanismus 'Änderung des Reservoirdrucks' bei Gasproduktion aus Goldenstedt Z23. Angenommen wird ein zusätzlicher Sicherheitsrand von 1 km Breite für Einwirkung auf Störungen durch poro-elastische Effekte. Die im Text diskutierten Störungen sind mit Benennung versehen.

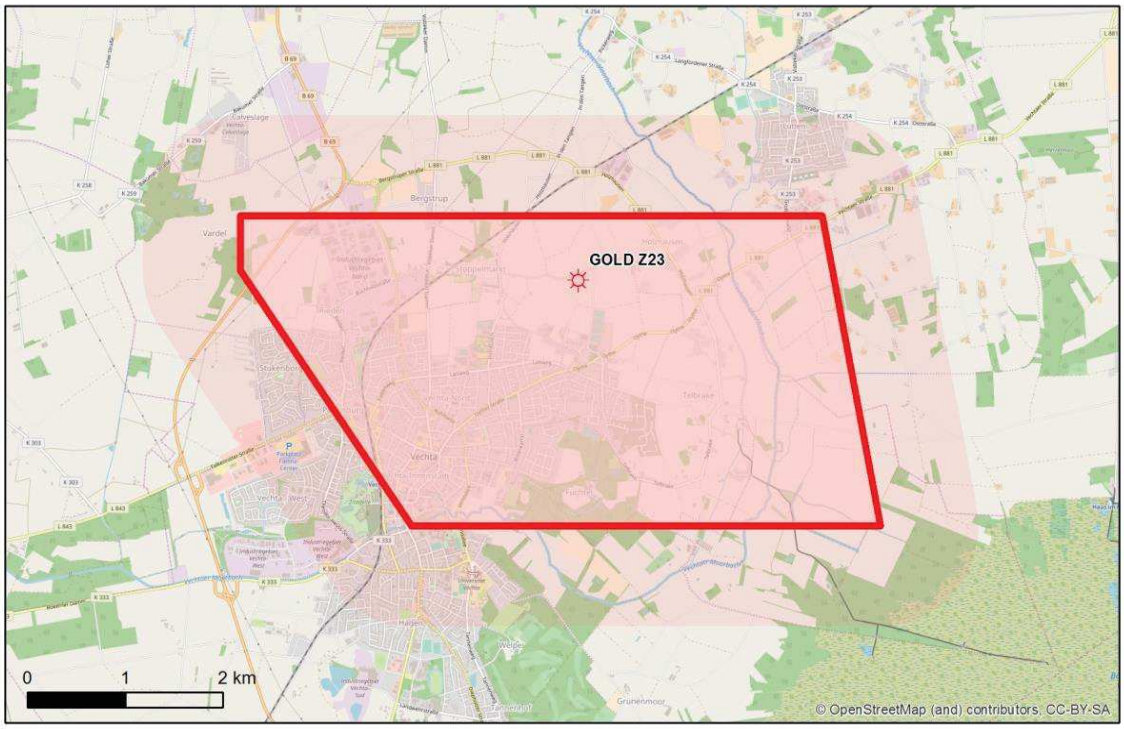


Fig. 2 Projektion des untertägigen Untersuchungsraumes von Fig. 1 auf die Erdoberfläche mit Sicherheitsrand zur Berücksichtigung poro-elastischer Effekte. Zur Relevanz dieser Projektion für die UVS siehe die Ausführungen zu Emission und Immission von Erdbeben im Text.

2. Erdgasförderung Goldenstedt-Oythe

Das Erdgasfeld Goldenstedt-Oythe ist eine konventionelle Lagerstätte in den porösen Gesteinsschichten des Karbon unterhalb einer gasundurchlässigen Deckgebirgsformation. Dieser ca. 150 – 250 m mächtige Werra-Anhydrit trennt das Karbon auch vom darüber liegenden Stassfurt-Karbonat (Ca2), welches im Gasfeld Goldenstedt-Visbek produziert wird. Oberhalb des Süd-Blocks des Feldes Goldenstedt-Oythe wird der Ca2 nicht produziert, da das Gestein sehr dicht ist. Das weitere Deckgebirge oberhalb des Ca2 ist durch Zechstein-Salinar und Rötsalinar geomechanisch entkoppelt. Es weist in Unterkreide, Jura, Keuper und Muschelkalk Überschiebungs- und Abschiebungsverwerfungen mit Sprunghöhen bis mehrere hundert Meter auf, während das obere Deckgebirge aus Quartär, Tertiär und Oberkreide ungestört vorliegt (Rahmenbetriebsplan, Anhang 2-2).

Die Speichersandsteine des Erdgasfeldes Goldenstedt-Oythe Karbon liegen in Teufen von 3.600 m bis zu 4.500 m. Die Speicherqualität ist sowohl vertikal als auch in der Fläche sehr variabel, es überwiegen zopfartig verflochtene Ablagerungen und einzelne Klüfte. Die Sandsteine sind stark kompaktiert mit geringen Porositäten und Permeabilitäten, insgesamt handelt es sich um eine ‚tight gas' Lagerstätte. Dementsprechend werden nur bohrlochnahe Bereiche drainiert und tragen zur Produktion bei (Rahmenbetriebsplan, Anhang 2-5). Goldenstedt Z23 stellt dabei eine Ausnahme dar. Aufgrund der strukturell hohen Lage tragen Klüfte und geringe Wassersättigung dazu bei, dass der Druck durch die guten Zuflussbedingungen im Bereich der Hochlage über eine größere Fläche abgesenkt wird. Die Karbon Lagerstätte unterteilt sich in den Nordblock mit den Bohrungen Goldenstedt Z6, Z7a und Z11 und den Südblock mit Goldenstedt Z9, Z23 sowie Oythe Z3. Beide Blöcke werden gegeneinander durch eine W-O verlaufende Störung von etwa 100 m Sprunghöhe begrenzt und stehen nicht in hydraulischer Verbindung. Diese Störung (1) in Fig. 1 setzt sich fort bis in den Ca2 und begrenzt dort den produktiven Teil des Feldes Goldenstedt-Visbek nach Süden (Rahmenbetriebsplan, Anhang 2-6).

Weitere relevante Störungen im Untersuchungsraum des Südblocks sind die westliche Randverwerfung (2) mit bis zu 500 m Sprunghöhe, eine zentrale, die Hochlage der Z23 begrenzende W-O Störung (3) von max. 50 m Versatz sowie ein Netz von südlich gelegenen, WSW bis ONO orientierten Bruchsegmenten (4) mit insgesamt ebenfalls mehreren hundert Meter Sprunghöhe (Fig. 1). Die östlich gelegene, N-S verlaufende Randstörung (5) des Gasfeldes Goldenstedt-Oythe mit 200 m Versatz wird erst in einem späten Stadium der Produktion von Druckabsenkungen erreicht. Die westliche

Randverwerfung (2) verläuft NNW – SSO, keilt jedoch von Süden kommend nach etwa 1 km in ein N-S Segment (2a) und danach in ein W-E Segment (2b) von jeweils 1 km Kantenlänge aus, an denen der überwiegende Sprungbetrag ansteht. Im tektonisch bedingten, regionalen Spannungsfeld mit horizontaler Hauptspannung NNW-SSO sind nur die beiden Segmente (2a), (2b) optimal für eine Reaktivierung orientiert.

Die detaillierten Simulationen des Lagerstättendrucks (Rahmenbetriebsplan, Anhang 2-7 bis 2-10) basieren auf den gemessenen Lagerstättendrücken der Bohrungen Goldenstedt Z9, Z23 und Oythe Z2, Z3. Die hydraulische Verbindung zwischen Goldenstedt Z23 und Oythe Z3 und die Kompartmentbildung um Goldenstedt Z9 konnte in der Simulation nachvollzogen werden. Dabei wurde eine vollständige hydraulische Abdichtung an der westlichen Randverwerfung zugrunde gelegt. Dieser Ansatz erscheint plausibel, da im Westen weitgehend dichte Gesteine (Steinsalz, Anhydrit, nichtporöse Karbonate) an die gasführenden Karbonsandsteine stoßen. In Abschätzung eines maximalen Druckkontrastes für die Aktivierung von Bruchprozessen ist eine vollständige Abdichtung die konservative Annahme, die zu einem größtmöglichen Effekt führen würde. Vertikal konzentriert sich die Druckabnahme auf die oberen 100 m der Höhenlage im Westen des Südblocks, da eine zunehmend hohe Wassersättigung in tieferen Lagen zur Abnahme der relativen Permeabilität für Gas und damit zu geringerem Druckabfall führt. Die Simulationen lösen nicht die vertikal wie horizontal stark variierenden Speicherqualitäten auf, und geben so ein insgesamt zu homogenes, großflächiges Bild der sehr kleinräumigen Druckvariationen. Auch dies ist im Sinne einer Gefährdungsabschätzung wieder die konservative Annahme von maximal großen Aktivierungsflächen.

Vom initialen Druck der Lagerstätte bei 488 bar ist aktuell eine Absenkung auf ca. 260 bar in Bohrlochnähe Z23 erreicht. Bis zum voraussichtlichen Produktionsende werden in Bohrlochnähe 100 bar erreicht, wobei der Druck im Zentralbereich des Süd-Blocks ca. 180 bar betragen wird. Der Gradient zu den nördlichen Bohrungen Goldenstedt Z9 und Oythe Z3 verringert sich auf wenige Zehner bar. In diesem Bereich bleiben auch die Druckabfälle entlang der W-E verlaufenden Zentralstörung. In den gering permeablen Randbereichen des östlichen und nord-westlichen Süd-Blocks wird ein Druck bis 340 bar erwartet. Der größte Kontrast der Druckverteilung tritt an der westlichen Randverwerfung auf. Er beträgt (unter der konservativen Annahme kompletter Undurchlässigkeit) aktuell 200 bar = 488 bar initial minus gemittelt ca. 280 bar Reservoir und wächst in 2046 auf ca. 360 bar. Allerdings sind von diesem starken Kontrast nur die jeweils 1 km langen NNW-SSO und N-S Segmente betroffen.

An der W-E verlaufenden Kompartmentgrenze (1) zum Nordblock bleiben wegen der dortigen, bis 2026 laufenden Förderung aus der Bohrung Goldenstedt Z7a die Unterschiede geringer. Sie betragen aktuell gemittelt etwa 100 bar und sinken bis zum voraussichtlichen Produktionsende auf eine Differenz von 50 bar. Da diese Verwerfung bis in den ca. 200 m darüber liegenden Ca2 reicht und die Kompartmentgrenze des Karbon auf etwa 3 km überlagert, sind auch die dortigen Ca2 Druckdifferenzen an dem vertikal fortgesetzten Störungssegment (1) zu berücksichtigen. Die nächstgelegenen Bohrungen Goldenstedt Z11 und Z20 haben von initial 430 bar inzwischen 180 bar erreicht und werden bei Produktionsende in 2030 ca. 100 bar als niedrigsten Druck erreichen, danach erfolgt durch Einschluss wieder ein leichter Anstieg. Allerdings reichen diese Druckerniedrigungen wegen geringer Permeabilität und abnehmender Mächtigkeit nur teilweise an die Störung, die durch hohe Salzüberdeckung und mächtige Buntsandsteinformationen vom Spanungsfeld im mittleren und oberen Deckgebirge entkoppelt ist. An der östlichen Randstörung (5) wird eine maximale Druckabsenkung von ca. 200 bar erwartet, die aber nicht homogen auf ganzer Fläche auftritt.

Eine Einwirkung der Gasproduktion in Goldenstedt-Oythe seit 1973 auf die Erdoberfläche konnte in geodätischen Messkampagnen des Landesvermessungsamtes (LGLN) zwischen 1971 und 2014 nicht festgestellt werden. Das Fehlen einer messbaren Subsidenz stützt die ‚tight gas' Charakterisierung der Lagerstätte, die nur geringe Kompression der Gesteinsmatrix erwarten lässt.

3. Historische Seismizität

Seit Beginn einer empfindlichen instrumentellen Erfassung der Seismizität in Norddeutschland etwa ab 1970 sind in der Region Cloppenburg und Vechta zwölf Erdbeben registriert worden. Ihre Stärke lag zwischen M_L 2 und M_L 3, das stärkste Beben mit M_L 3.1 trat am 19.12.2014 bei Emstek auf (Bischoff et al., 2015; Leydecker, 2011). Die Mehrzahl der Beben wurde nach vorliegenden Berichten nicht von der Bevölkerung bemerkt, was bei typischen Tiefenlagen um 5 km auch der Erwartungslage entspricht. Die Bebentätigkeit hat erst 1993 eingesetzt und tritt ab 2013 mit insgesamt sechs Beben vermehrt auf. Auch liegt die Mehrzahl der bestimmten Epizentren (Epizentrum = Projektion des untertägigen Bebenherdes an die Erdoberfläche) oberhalb von produzierten Gasfeldern, weshalb ein Zusammenhang zwischen Erdgasproduktion und Erdbebentätigkeit als wahrscheinlich anzunehmen ist. Eine genauere Zuordnung der Beben gestaltete sich schwierig, da die Beben bis Mitte 2014 nur mit großen Unsicherheitsbereichen lokalisiert werden konnten.

Besonders relevant für das vorliegende Gutachten erschien das Beben vom 28.03.1999, dessen Epizentrum etwa 1 km östlich des Südblocks von Goldenstedt-Oythe berechnet wurde. Eine Herdtiefe konnte mit damaligen Daten nicht abgeschätzt werden. Sie wurde deshalb für die Lokalisierung mit 5 km fix vorgegeben; dies ist übliche Praxis für Norddeutschland bei schlechter Datenlage. Neben dem Beben am 18.03.1999 gab es in der wissenschaftlichen Literatur für zwei weitere Beben am 10.12.1998 sowie am 17.15.2005 noch alternative Lokalisierungslösungen, die über dem Südblock Goldenstedt-Oythe bzw. in der Nähe von Goldenstedt lagen (Uta, 2017).

Da auf Basis dieser unklaren Datenlage keine verlässliche Bewertung der seismischen Gefährdung möglich war, wurde auf Veranlassung des Gutachters eine Neubearbeitung des gesamten Datensatzes seismischer Aufzeichnungen mit modernen Methoden der absoluten und vergleichenden Erdbebenortung vom Antragsteller in Auftrag gegeben. Diese Studie wurde von der Fa. Seismic Solutions, Tübingen bearbeitet und ist dem Gutachten als Anhang A beigefügt. Die dort gezogenen Schlüsse sind für den Gutachter plausibel und haben zu einer wesentlich genaueren Lokalisierung der aufgetretenen Erdbeben geführt. Insbesondere für die frühen, bezüglich Ortungsgenauigkeit kritischen Beben konnte durch erstmaliges Auswerten weiterer Stationen in den Niederlanden sowie den Vergleich von Wellenformen zwischen früher und späteren, gut bestimmten Beben das Ergebnis signifikant verbessert werden. Als Resultat lässt sich festhalten, dass es kein Beben im Bereich der gesamten Lagerstätte Goldenstedt-Oythe gibt. Die Relokalisierung des 1999 Bebens wurde

zwischenzeitlich auch in einer unabhängigen Studie der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (Gestermann, 2017) bestätigt.

Insgesamt sechs der zwölf Beben der Region Cloppenburg in Cluster 2 und Cluster 5 lassen sich nunmehr gut der Lagerstätte Goldenstedt-Visbek zuordnen. Damit ergibt sich unter Berücksichtigung der verschiedenen Förderhorizonte, dass bisher nur eine Gasproduktion im Horizont Zechstein (Ca2) der Lagerstätte Goldenstedt-Visbek einen wahrscheinlichen Zusammenhang mit den aufgetretenen Erdbeben aufweist. Da bei einem Teil der Beben zusätzlich auch die Herdtiefe berechnet werden konnte und im Bereich des Reservoirs liegt, kann hier sogar von einem sehr wahrscheinlichen Zusammenhang zwischen Erdbeben und Erdgasproduktion ausgegangen werden. Dagegen ist für den tiefergelegenen Horizont des Karbon, aus dem die Goldenstedt Z23 Förderung ausschließlich stammt, kein Erdbeben nachgewiesen. Die Erdgasproduktion verläuft hier bisher ohne jede Erdbebeneinwirkung.

Das Emstek M_L 3.1 Beben vom 19.12.2014 ist das bisher am besten ausgewertete Beben der Region Cloppenburg, und insbesondere aus der Lagerstätte Goldenstedt-Visbek (Bischoff et al., 2015). Eine Einschätzung von oberflächlichen Auswirkungen eines durch Erdgasproduktion induzierten Bebens ist deshalb vorzugsweise an diesen Daten auszurichten. Danach führt ein M_L 3.1 Beben in 5 km Tiefe in der Region Cloppenburg / Vechta nur zu wenigen, recht moderaten Wahrnehmungen durch die örtliche Bevölkerung; Bischoff et al. (2015) berichten von lediglich 17 Meldungen aus einer Entfernung bis zu 13 km mit Charakterisierung als leichte bis mäßig starke Erschütterung. Auch das Potential zur Verursachung von Gebäudeschäden ist als sehr gering einzuschätzen. Die auftretenden Schwinggeschwindigkeiten sollten deshalb nur vereinzelt und unwesentlich über dem Schwellwert von 5 mm/s für mögliche, leichte Gebäudeschaden nach DIN 4150 liegen. Es ist damit nicht von außergewöhnlichen Effekten der Schwingungsverstärkung durch lokale Bodeneffekte auszugehen. Mögliche Beben vergleichbarer Stärke im untertägigen Untersuchungsraum von Goldenstedt Z23 geben also keinen Anlass, den Untersuchungsrahmen für Immissionswirkungen über Fig. 2 hinaus auszuweiten. Selbst in diesem Rahmen wären wegen der Tiefe der prinzipiell nicht auszuschließenden Beben die Auswirkungen so gering, dass eine dezidierte Betrachtung der oberflächlichen Kultur- und Sachgüter entfallen kann.
Es sei aber abschließend betont, dass ohne tatsächlich stattgefundene und gemessene Beben in der Region Goldenstedt-Oythe diese Abschätzungen nur grobe Anhaltspunkte für eine allgemeine Plausibilitätsbetrachtung sein können.

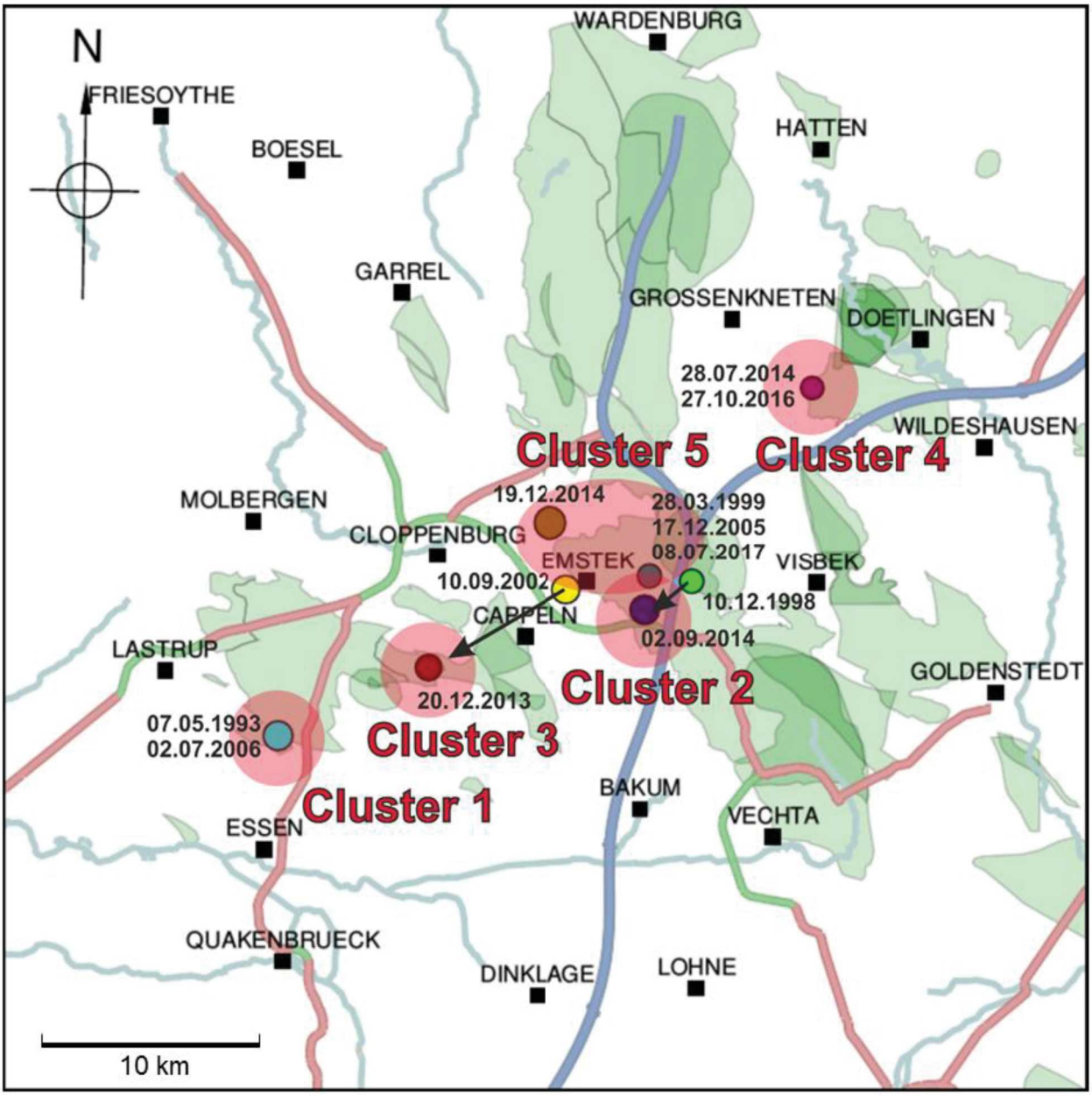


Fig. 3 Rezente Seismizität der letzten 45 Jahre im Raum Cloppenburg nach Relokalisierung. Gasfelder sind in grün markiert, Clusterbereiche von ähnlichen Erdbeben in hellrot. Wegen limitierter Ortsauflösung – etwa in der Größenordnung der hellroten Kreise - überlagern sich in der Karte die dunklen Kreise, also die Epizentren einiger Beben vollständig und erscheinen hier als Mehrfachindizierung. Die beiden frühen, mit großer Unsicherheit georteten Beben am 10.12.1998 und 10.09.2002 werden aufgrund ihrer jeweiligen Ähnlichkeit zu Cluster 2 bzw. Cluster 3 zugeordnet. Im gesamten Bereich der Lagerstätte Goldenstedt-Oythe sowie im Raum Vechta tritt kein Beben auf. (aus Seismic Solutions, 2017a)

4. Seismisches Monitoring

Empfehlungen für ein Monitoring induzierter Seismizität liegen in Deutschland bisher nur für den Fall tiefer Geothermie vor (FKPE, 2012). Ausgangspunkt ist hier das Schutzgut der menschlichen Gesundheit, wobei von einer unzumutbaren Belästigung durch Bodenerschütterungen und lauten Knallen bei Beben ab M_L 2 ausgegangen wird (diese Knall-Geräusche können entstehen, wenn Erdbebenwellen an die Erdoberberfläche gelangen). Für die Erfassung von Vorläuferprozessen und die Auslegung von Ampelsystemen zur Steuerung und ggf. Abschaltung hydraulischer Stimulation und Zirkulation in der Geothermie wird eine Erfassung von Erdbeben bereits ab M_L 1 angestrebt.

Eine Abschätzung der Empfindlichkeit für das seismische Messnetz der deutschen Erdgasproduzenten (BVEG Netz) wurde auf Basis des zuletzt gemessenen M_L 2.2 Bebens östlich Emstek am 08.07.2017 vorgenommen (Fig. 4). Die Abbildung zeigt die mit ihrem Frequenzgehalt aufgelösten Seismogramme, sog. Sonogramme von 34 Stationen, die nach zunehmender Entfernung zum Bebenherd angeordnet sind. Zur Beschreibung von Sonogrammen siehe Sick et al. (2012, 2013). Die beiden für dieses Beben nächsten Stationen FAHL und SEVE werden von der BGR betrieben, die nächste BVEG Station AME1S ist in Großenkneten installiert.

Für die seismische Überwachung des Untersuchungsraumes ist zunächst die Station PW17S relevant. Sie liegt in Vechta und soll als DEN Station (siehe Beschreibung BVEG Netz, www.seis-info.de) primär die auftretenden Schwinggeschwindigkeiten nach DIN 4150 erfassen. Dazu ist sie in einem Gebäude installiert und wird höheren Störpegeln, z.B. durch Autoverkehr ausgesetzt. Trotzdem ist das Signal des 15 km entfernten Bebens klar erkennbar, was aber teilweise auf die am Wochenende geringeren Störpegel zurückzuführen ist – der 08.07.2017 war ein Samstag. Für eine Erdbebenortung sind auch umliegende Stationen notwendig. Für Goldenstedt Z23 bzw. die Region Vechta sind dies die fünf in Fig. 5 markierten BVEG Stationen:

Essen/Oldenburg (ESSNB) in 18 km W,
Molbergen (MOLBB) in 27 km NW,
Beckeln (BECKB) in 25 km NO,
Sulingen (SULIB) in 30 km SO,
Brockum (BROKB) in 35 km S.

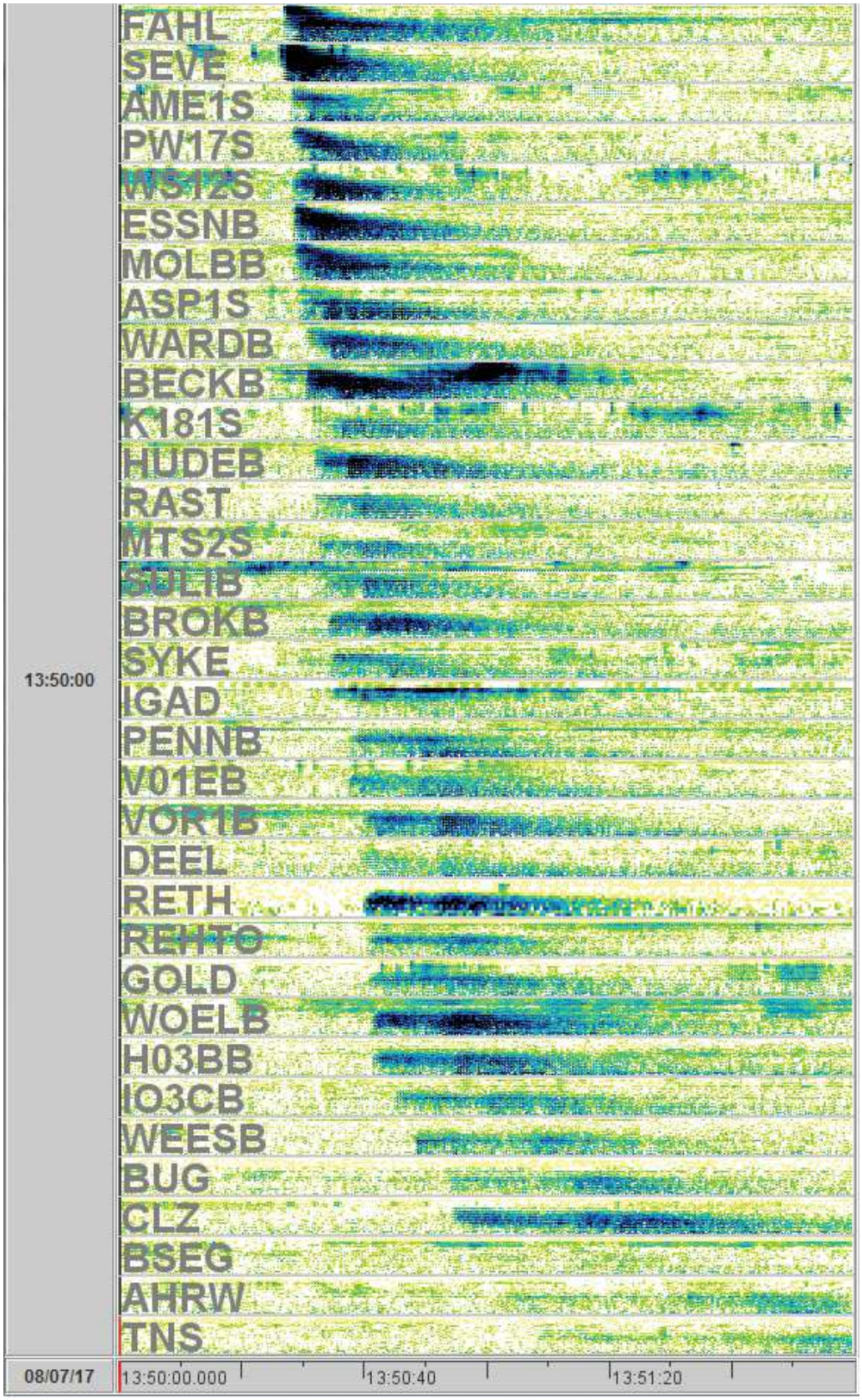


Fig. 4 Aufzeichnung des M_L 2.2 Bebens am 08.07.2017 bei Emstek. Die gezeigten Sonogramme sind Optimaldarstellungen für die Erdbebendetektion, sie kodieren Signalenergie über Frequenz (vertikal) und Zeit (horizontal) in 13 Farbstufen. Einer Verdopplung der Amplitude entspricht ein Zuwachs um zwei Farbstufen; schwarz markiert Skalenüberschreitung (weitere Details siehe Text)

Damit ist das Netz geografisch gut verteilt und liefert eine hohe Ortungsgenauigkeit. Auch die Erfassung der max. Schwinggeschwindigkeit für eine Bewertung nach DIN 4150 im baulichen Bereich von Vechta (Schutzgut Sach- und Kulturgüter) ist durch die Station PW17S gegeben. Die seismische Überwachung ist damit hinreichend, um ein prinzipiell mögliches Auftreten von Seismizität erfassen und beurteilen zu können. Insbesondere für die Beweissicherung bei Auftreten fühlbarer oder schadensrelevanter Erdbeben ist das Netz vollumfänglich ausreichend. Die entfernten Stationen sind zwar als empfindlichere SON Stationen ausgeführt, erreichen aber bei etwa M_L 1.4 ihre Detektionsgrenze, also bei etwa 15 % der Amplituden eines M_L 2.2 Bebens wie in Fig. 4.

Im Vergleich zu den FKPE Anforderungen für Tiefe Geothermie (FKPE, 2012) erreicht diese Empfindlichkeit noch nicht ganz die vorgeschlagenen Richtwerte. Das Ergebnis der Feldstudie von Seismic Solutions, Tübingen (Anhang B) zeigt jedenfalls, dass bei entsprechendem Aufwand für die Stationssuche eine Empfindlichkeit von M_L 1.0 bei 5 km Epizentral-Entfernung und 6 dB (Faktor 2) Rauschabstand erreichbar ist. Es sollte deshalb im Falle eines tatsächlich aufgetretenen Bebens im Untersuchungsgebiet von Fig. 2 das seismische Messnetz für eine Erhöhung der Empfindlichkeit und Erfassung von Vorläufer-Beben mit einer SON Station nahe Vechta verdichtet werden und die Möglichkeit der Triggerung durch Einzelstation implementiert sein (sonst ist mindestens eine zweite Zusatzstation für Koinzidenz-Auswertung vorzusehen).

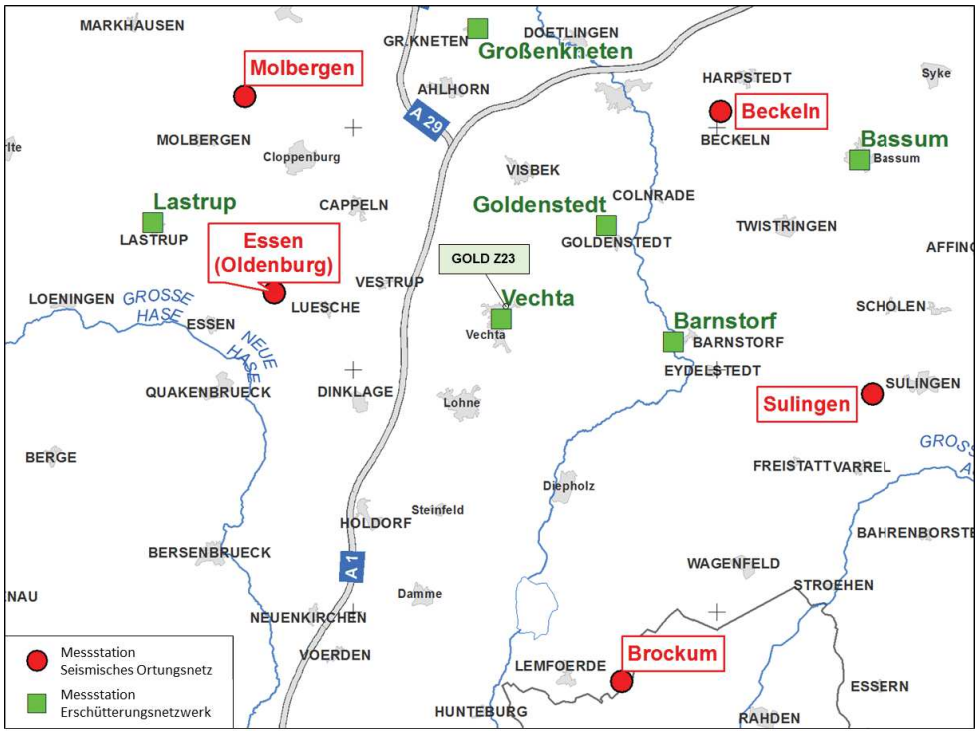


Fig. 5 Stationsverteilung des BVEG Netzes um Goldenstedt Z23 / Vechta

5. Bewertung

Der Untersuchungsraum Goldenstedt Z23 hat weder historisch noch aktuell ein Auftreten von Erdbeben gezeigt. Dabei wurde die Empfindlichkeitsschwelle von den in Chroniken notierten Schadensbeben und den von Menschen bemerkten Erschütterungen innerhalb der letzten Jahrzehnte bis zu den nur noch instrumentell erfassten Bruchprozessen gesenkt. Ohne erfasste Erdbeben entfällt allerdings die wesentliche Grundlage für die Durchführung einer probabilistischen seismischen Gefährdungsanalyse (PSHA). Damit kann sich eine Bewertung der seismischen Gefährdung, also der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von schadensrelevanten Bodenerschütterungen durch Erdbeben nur auf allgemeine Erfahrungswerte, Plausibilitäten und ggf. Modellierungen stützen.

Erster Befund ist, dass die Region des Gasfeldes Goldenstedt-Oythe keine Seismizität gezeigt hat. Darüber hinaus ist die gesamte bisher aufgetretene, induzierte Seismizität der weiteren Region Goldenstedt im Bereich von Erdgasproduktion des Ca2 Speicherhorizonts aufgetreten. Goldenstedt Z23 produziert ausschließlich im tiefer liegenden, wesentlich dichteren Karbon.

Zweiter Befund ist das bisherige Ausbleiben einer beobachtbaren Subsidenz oberhalb der Lagerstätte Goldenstedt-Oythe. Dies deutet auf eine stabile Gesteinsmatrix hin und kann durch Salzformationen von Zechstein und Rötsalinar begünstigt sein, die eine geomechanische Entkopplung von Lagerstätte und Deckgebirge bewirken.

Dritter Befund ist eine kleinräumige Struktur unterschiedlich ausgerichteter Störungen, die nur teilweise optimal für eine Reaktivierung im regionalen Spannungsfeld ausgerichtet sind. Die aktivierbaren maximalen Segmentlängen liegen im Kilometer-Bereich.

Vierter Befund ist eine insgesamt stark gegliederte, vertikal wie lateral inhomogene Lagerstätte von geringer Permeabilität, noch verstärkt durch eine mit der Tiefe zunehmende Wassersättigung und mit einzelnen Klüften für einen weiterreichenden Gastransport.

Der fünfte Befund stützt sich auf eine hydraulische Modellierung. Mit diesen Ergebnissen kann zwischen potentiell weniger und mehr gespannten Bereichen unterschieden werden. Die Modellierung liefert aber keine Schwellwerte für die Abschätzung eines Bruchversagens. Nach den Ergebnissen werden nur an der westlichen Randverwerfung (2), (2a), (2b) in Fig. 1 in Zukunft steigende, hohe lokale Druckgradienten erzeugt. Die an der Kompartmentgrenze (1) auftretenden Druckdifferenzen unterscheiden sich nicht mehr signifikant von aktuellen Werten und gleichen sich nach

Produktionsende aus. Auch eine wachsende poro-elastische Beeinflussung durch Gasförderung im höheren Ca2 Horizont fällt gering aus, da sowohl Permeabilität, zukünftiger Druckabfall und Schichtmächtigkeit nur noch gering sind.

Der Zusammenhang zwischen Druckabbau und Bruchversagen wird in gekoppelten, hydraulisch-mechanischen (HM) Modellierungen behandelt, ggf. ergänzt um thermische (T) bzw. chemische (C) Effekte. Im vorläufigen Untersuchungsrahmen der UVS im Schreiben des LBEG vom 13.09.2017 wird deshalb die Durchführung und Begutachtung einer dezidierten, quantitativen THMC Modellierung vorgeschlagen. Dies wird aktuell über die bereits dargestellte hydraulische Modellierung hinaus nicht aufgegriffen. Ohne Kenntnis und Berücksichtigung der Heterogenitäten von Permeabilität und Druckabfall liefert eine geomechanische Berechnung nur Durchschnittswerte für Verformung, Spannungsaufbau und Bruchverhalten. Aus diesen Durchschnittswerten lässt sich kein punktuelles Überschreiten des Bruchkriteriums bestimmen. Es fehlen für Goldenstedt-Oythe die beobachteten Erdbeben, anhand deren eine durchschnittliche seismische Aktivierungsrate auf Basis von mittleren Modellparametern ableitbar wäre.

Zusammenfassend ist auf Basis oben genannter Befunde für das Gasfeld Goldenstedt-Oythe nicht von einer Zunahme der seismischen Gefährdung auszugehen, die durch die tägliche Fördervolumen-erhöhung der Goldenstedt Z23 induziert würde. Dabei wirkt sich auch die Heterogenität der Lagerstätte günstig aus, die einem großflächigen Aufbau zusätzlicher Spannungsfelder entgegenwirkt. Als Obergenze eines theoretisch anzusetzenden Bebens wird nach bisherigem Kenntnisstand bei teilweisem Bruch von optimal orientierten Teilsegmenten (2a) oder (2b) eine Magnitude M_L 3+ abgeschätzt, also deutlich unterhalb M_L 4. Diese Abschätzung folgt aus einer angesetzen Bruchfläche unter 1 km² und der Annahme eines mittleren Spannungsabfalls von 1 MPa (Fig. 6; Zoback & Gorelick, 2012). Die Bruchfläche entlang der existierenden Schwächezonen errechnet sich hier aus Teilsegmentlänge (ca. 1 km, siehe Seite 8) mal Sprunghöhe (max. 500 m, siehe Seite 7), wird aber konservativ als quadratische Fläche der maximalen Längenausdehnung abgeschätzt. Bei einer Herdtiefe von 4-5 km und der Annahme vergleichbarer makroseismischer Auswirkungen wie beim Emstek 2014 M_L 3.1 Beben mit ähnlichem geologischen Aufbau des Deckgebirges sind für das theoretisch anzusetzende Maximalbeben Bodenschwinggeschwindigkeiten zu erwarten, die maximal und nur an wenigen Stellen in den Bereich des Grenzwertes nach DIN 4150 kommen, ab dem geringfügige Schäden an Gebäuden möglich sind. Auf dieser Basis von vereinzelten, lediglich geringfügigen Gebäudeschäden durch das theoretisch angesetzte Maximalbeben ist nicht von einer Gefährdung für Leben oder Gesundheit auszugehen.

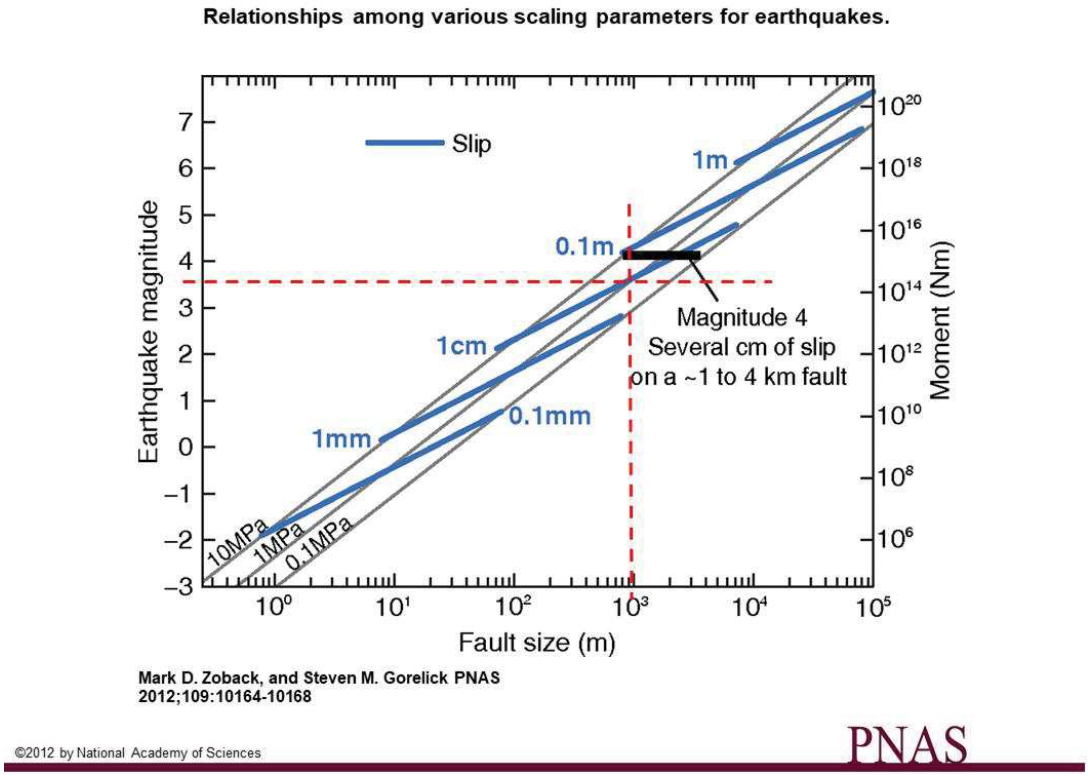


Fig. 6 Abschätzung der Bebenmagnitude 3+ für eine Bruchfläche von 1 km^2

Eine weitergehende, im Gefährdungsfall gebotene Analyse der zu erwartenden seismischen Immission nach DIN 4150, ggf. mit der Konsequenz einer Magnituden-abhängigen Vergrößerung des betroffenen Untersuchungsraumes der UVS wird nicht durchgeführt, da im Untersuchungsraum bisher keine Erdbeben aufgetreten sind. Damit liegt weder ein erkennbarer Gefährdungsfall vor noch steht eine Datengrundlage zur Beschreibung oberflächennaher Schwingungsverstärkungen zur Verfügung.

Im Gegensatz zu dem theoretisch angesetzten Maximalbeben erfasst ein seismisches Monitoring die tatsächlich gemessenen Schwinggeschwindigkeiten und das mögliche Auftreten weit schwächerer, meist nicht fühlbarer Mikrobeben. Dabei erfüllt auch für Goldenstedt Z23 und die Region Vechta das bestehende seismische Monitoring Netz des BVEG die Anforderungen an eine seismische Überwachung entsprechend der bergamtlichen Auflagen des LBEG. Wie bereits oben dargelegt, konnte damit der Nachweis einer bisher oberhalb M_L 2 aseismischen Gasförderung erbracht werden. Nur im Falle eines prinzipiell möglichen Erfassens von künftigen Mikrobeben im Raum Vechta wird empfohlen, die Empfindlichkeit des BVEG Netzes durch Installation einer weiteren lokalen SON Messstation entsprechend der FKPE Richtlinie (FKPE 2012) zu erhöhen, um damit eine erweiterte seismologische Datengrundlage zu schaffen.

6. Literatur

Bischoff, M., C. Bönnemann, L. Ceranna, J. Fritz, N. Gestermann, M. Pasternak, T. Plenefisch (2015). Kurzbericht zum Erdbeben bei Emstek, LBEG/BGR, Hannover.

FKPE (2012). Empfehlungen zur Überwachung induzierter Seismizität – Positionspapier des FKPE, Deutsche Geophysikalische Gesellschaft - Mitteilungen (Rote Blätter), 2012 (1). 27-31.

Gestermann, N., (2017). Erdbeben am 28.3.1999 im Bereich des Erdgasfeldes Goldenstedt/Visbek, Kurzbericht, BGR, Hannover.

Leydecker, G. (2011). Erdbebenkatalog für Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 800 bis 2008, *Geolog. Jahrbuch*, Reihe E, Heft 59, 1-198.

Sick, B., Walter, M., & Joswig, M. (2012). Visual Event Screening of Continuous Seismic Data by Supersonograms. Recent Advances in Nuclear Explosion Monitoring Vol. 2 - Pure and Applied Geophysics, PAGEOPH. doi:10.1007/s00024-012-0618-x

Sick, B., M. Walter & M. Joswig (2013). Near-surface fracture and impact discovery from landslides and sinkholes by sonogram screening; *First Break*, **31**, August, 95-101.

Uta, P. (2017). Recent intraplate earthquakes in northern Germany – glacial isostatic adjustment and/or a consequence of hydrocarbon production? Dissertation, Universität Hannover.

Zoback, M. D. & S. M. Gorelick (2012). Earthquake triggering and large-scale geologic storage of carbon dioxide, Proceedings Nat. Acad. Sci. June 2012, DOI: 10.1073/pnas.1202473109.

Anhang A:

Walter, M. (2017a) Neubewertung der lokalen Seismizität in der Region Cloppenburg, Niedersachsen, Seismic Solutions, Tübingen.

Anhang B:

Walter, M. (2017b) Seismische Messungen am Erdgasfeld Goldenstedt/Visbek, Seismic Solutions, Tübingen.

Seismic Solutions
Tailored Services & Consulting

Bericht von Seismic Solutions

Projekt-ID: 17401

im Auftrag von **ExxonMobil Production Germany GmbH**

Riethorst 12
D - 30659 Hannover

Neubewertung der lokalen Seismizität in der Region Cloppenburg, Niedersachsen

Dr. Marco Walter (Geschäftsführer)

21.11.2017

Seismic Solutions
Bismarckstrasse 136
72072 Tübingen
Deutschland

Tel. +49 7071 935525
Mobil +49 177 3549707
Fax +49 7071 935530
E-mail Marco.Walter@seismicsolutions.de

Web www.seismicsolutions.de

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung....3
2. Beschreibung der seismologischen Auswertungen....7
2.1 Schaffung der Datenbasis....7
2.2 Relokalisierung der Erdbeben....9
2.3 Ähnlichkeitsuntersuchungen....12
2.4 Ereignisdetektion mit definierten Ereignismustern....13
3. Ergebnisse der seismischen Untersuchungen....15
3.1 Relokalisierung der Erdbeben....15
3.1.2 Ereignis 1 vom 07.05.1993....15
3.1.3 Ereignis 2 vom 10.12.1998....15
3.1.4 Ereignis 3 vom 28.03.1999....17
3.1.5 Ereignis 4 vom 10.09.2002....18
3.1.6 Ereignis 5 vom 17.12.2005....19
3.1.7 Ereignis 6 vom 02.07.2006....20
3.1.8 Ereignis 7 vom 20.12.2013....21
3.1.9 Ereignis 8 vom 28.07.2014....23
3.1.10 Ereignis 9 vom 02.09.2014....25
3.1.11 Ereignis 10 vom 19.12.2014....27
3.1.12 Ereignis 11 vom 27.10.2016....29
3.1.13 Ereignis 12 vom 08.07.2017....31
3.1.14 Zusammenfassung der Relokalisierungsergebnisse....33
3.2 Ähnlichkeitsuntersuchungen....35
3.3 Ereignisdetektion mit definierten Ereignismustern....44
4. Zusammenfassung....45
5. Referenzen....47
Anhang 1 – Epizentren der Einzelereignisse (externe Bulletins)....49
Anhang 2 – Übersicht der genutzten Stationen....61
Anhang 3 – Ereignisbulletin....63

1. Einleitung

Die *Seismic Solutions GbR* wurde von der *ExxonMobil Production Deutschland GmbH* (nachfolgend EMPG genannt) beauftragt, die in der Vergangenheit im Raum Cloppenburg, Niedersachsen, aufgetretene Seismizität neu zu bewerten. Das zu untersuchende Gebiet erstreckt sich geografisch in einem Radius von ungefähr 20 km um Cloppenburg, von den Ortschaften Grossenkneten im Norden, Goldenstedt im Osten, Vechta im Südosten bis Lastrup im Westen. In diesem Gebiet befinden sich mehrere Erdgas-Reservoirs, die zum Teil von der EMPG wirtschaftlich genutzt werden.

Seit 1993 traten in dem Gebiet 12 seismische Ereignisse mit Lokalmagnituden bis zu M_L=3.1 auf. Das stärkste Erdbeben ereignete sich am 19.12.2014 in der Region bei Emstek (Bischoff et al. 2015). In Bischoff et al. (2015) sind insgesamt 10 seismische Ereignisse in der Region Cloppenburg lokalisiert worden, außerdem wurden durch das vom Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V. (BVEG) betriebene seismische Netzwerk zwei weitere Ereignisse in den Jahren 2016 und 2017 registriert, die vom beauftragten Unternehmen (DMT GmbH & Co. KG) in der Region Cloppenburg lokalisiert wurden. Die insgesamt 12 Ereignisse wurden von unterschiedlichen Behörden und Institutionen (Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen - LBEG, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Hannover – BGR), von dem vom BVEG zur seismischen Überwachung der norddeutschen Erdgasfelder beauftragtem Unternehmen (DMT GmbH & Co. KG) sowie in der Dissertation von Uta (2017) lokalisiert und interpretiert. Dafür wurden unterschiedliche Daten als Grundlage für die Ereignislokalisierungen herangezogen sowie verschiedene Untergrundmodelle genutzt. Die Ergebnisse der Untersuchungen der 12 Ereignisse wurden in Bischoff et al. (2015), Uta (2017), auf den Homepages der Betreiber, Behörden und Institutionen sowie in den Jahresberichten des vom BVEG beauftragten Betreibers des seismischen Messnetzwerks (DMT (2015, 2016, 2017)) veröffentlicht. Seismic Solutions wurde neben der vorliegenden Studie von der EMPG beauftragt, die lokale Seismizität bei Dötlingen, Niedersachsen neu zu bewerten (Seismic Solutions (2017)), wodurch zwei der hier diskutierten Ereignisse bereits im Rahmen jener Studie untersucht wurden. In Tabelle 1 sind alle zur Verfügung stehenden Lokalisierungsergebnisse der 12 Ereignisse zusammengefasst. Die Abbildung 1 zeigt die in Tabelle 1 gelisteten Epizentren der 12 zwischen 1993 und 2017 aufgetretenen Erdbeben in der Region Cloppenburg. Geografische Darstellungen der verschiedenen Epizentren der Einzelereignisse kann Anhang 1 entnommen werden.

Ereignis	Datum	Herdzeit (UTC)	Latitude	Longitude	Tiefe (km)	Magnitude (Ml)	Quelle
1	07.05.1993	16:19:47	52,900	7,900	-	2,9	Bischoff et al. (2015)
			52,881	7,865	5,0 f	2,5	Uta (2017)
2	10.12.1998	00:21:33	52,870	8,170	2,0 f	2,2	Bischoff et al. (2015)
			52,748	8,338	5,0 f	2,4	Uta (2017)
3	28.03.1999	20:32:51	52,730	8,370	3,0 f	2,2	Bischoff et al. (2015)
		20:32:51	52,770	8,190	-	2,1	BGR HP
			52,747	8,326	5,0 f	2,0	Uta (2017)
4	10.09.2002	23:01:46	52,860	8,130	2,0 f	2,6	Bischoff et al. (2015)
			52,907	8,128	5,0 f	2,5	Uta (2017)
5	17.12.2005	11:56:58	52,810	8,420	5,0 f	2,5	Bischoff et al. (2015)
			52,862	8,190	5,0 f	2,2	Uta (2017)
6	02.07.2006	14:37:38	52,800	8,110	2,0 f	2,8	Bischoff et al. (2015)
			52,799	7,863	5,0 f	2,7	Uta (2017)
			52,803	7,833	7,9	2,7	Uta (2017)
7	20.12.2013	19:57:00	52,830	8,150	5,0 f	2,4	Bischoff et al. (2015)
			52,854	8,125	5,0 f	2,4	Uta (2017)
			52,851	8,149	9,5	2,4	Uta (2017)
8	28.07.2014	20:03:46	52,96600	8,25700	5,0 f	2,0	Uta (2017)
		20:03:48	-	-	-	2,1	BVEG HP
		20:03:46	52,95000	8,25000	5,0 f	2,1	Bischoff et al. (2015)
		20:03:46	52,95000	8,24000	5,0 f	2,1	BGR HP
		20:03:46	52,9155	8,3084	4,3	2,1	Seismic Solutions (2017)
9	02.09.2014	00:12:09	52,790	8,190	5,0 f	2,8	Bischoff et al. (2015)
			52,802	8,203	5,0 f	2,7	Uta (2017)
			52,792	8,205	-	2,7	Uta (2017)
10	19.12.2014	04:12:31	52,840	8,200	5,1	3,1	Bischoff et al. (2015)
			52,833	8,188	5,4	2,9	Uta (2017)
			52,843	8,199	5,5	2,9	Uta (2017)
11	27.10.2016	12:34:13	52,941	8,239	5,0 f	2,1	BGR HP
		12:34:14	52,96500	8,23400	10,6	2,3	Uta (2017)
		12:34:13	52,91200	8,28800	-	2,3	Uta (2017)
		12:33:49	52,90900	8,30800	4,2	2,1	DMT (2017)
		12:34:13	52,9155	8,3084	4,3	2,1	Seismic Solutions (2017)
12	08.07.2017	13:50:22	52,836	8,185	-	2,2	BVEG HP
		13:50:25	52,848	8,188	-	2,3	BGR HP

[f] Herdtiefe manuell gesetzt

Tabelle 1. Ermittelte Herdparameter der einzelnen Behörden, Firmen und Institutionen der 12 zwischen 1993 und 2017 aufgetretenen Erdbeben in der Region Cloppenburg.

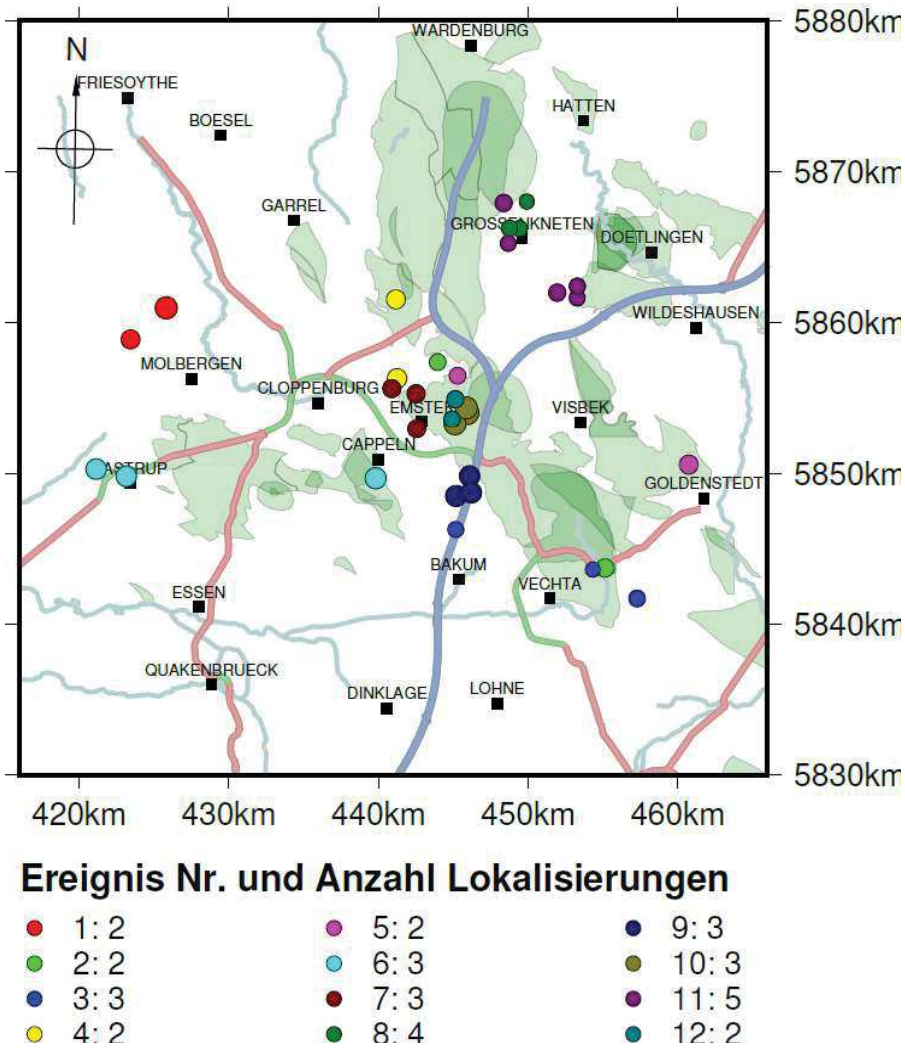


Abbildung 1. Geografische Darstellung der in Tabelle 1 gelisteten Epizentren der 12 zwischen 1993 und 2017 aufgetretenen Erdbeben in der Region Cloppenburg (vgl. Tabelle 1). Dargestellt sind zusätzlich die entsprechende Ereignisnummer und die Anzahl der Lokalisierungsergebnisse pro Ereignis.

Aus Abbildung 1 wird ersichtlich, dass die ermittelten Epizentren gleicher Ereignisse einerseits in vergleichbaren Arealen lokalisiert wurden, andererseits aber auch stark geografisch streuen. Insbesondere die verschiedenen Epizentren der Ereignisse vom 10.12.1998 (Ereignis 2), vom 28.03.1999 (Ereignis 3), vom 17.12.2005 (Ereignis 5) und vom 02.07.2006 (Ereignis 6) weisen erhebliche Entfernungen von bis ca. 20km zueinander auf. Darüber hinaus sind auch geringere geografische Abweichungen der Epizentren relevant, da dadurch die Ereignisse unterschiedlichen Reservoirs zugeordnet werden können (z.B. Ereignisse vom 10.09.2002 (Ereignis 4) und vom 27.10.2016 (Ereignis 11)).

Die Gründe für die verschiedenen Lokalisierungsergebnisse sind neben der prinzipiellen Schwierigkeit, die Einsatzzeiten seismischer Wellenphasen bei schwachen Erdbeben und gleichzeitig weit entfernten Stationen exakt zu bestimmen, vielfältig. Entscheidend für die Güte einer Lokalisierung ist die Datengrundlage (Stationsdichte, azimutale Abdeckung, Anzahl der Stationen, die die Ereignisse registriert haben, Hypozentraldistanzen der Stationen, etc.), die gerade bei den früheren Ereignissen sehr schlecht war und somit nur wenige und gleichzeitig sehr entfernte seismische Stationen zur Verfügung standen. Darüber hinaus beeinflussen die Wahl des Lokalisierungsverfahrens (z.B. Inversionsverfahren) und der dazugehörigen Software, die Wahl des für die Lokalisierung verwendeten Untergrundmodells sowie die Wahl der genutzten Stationen entscheidend die Güte eines Lokalisierungsergebnisses. Bei der Unterscheidung der Unsicherheit des ermittelten Epizentrums im Vergleich zur ermittelten Herdtiefe ist besonders die Wahl des Untergrundmodells ausschlaggebend, da das gewählte Laufzeitmodell bei der Tiefenbestimmung eines Erdbebens den wesentlichen Effekt darstellt.

Bei den diskutierten Ereignissen sind die Datengrundlage und somit die Güte der Lokalisierungsergebnisse höchst unterschiedlich. Für die frühen Ereignisse (bis ca. 2006, Ereignisse 1-6) wurden lediglich wenige seismische Stationen des GRSN (German Regional Seismic Network) bzw. temporäre Stationen der BGR genutzt, die sich ausserdem in großer Herddistanz befanden. Erst seit ungefähr 2008 wurden weitere Stationen im Bereich der norddeutschen Gasfelder betrieben, seit 2014 befinden sich zwei seismische Stationen (FAHL in Ahlhorn und SEVE in Sevelten) in unmittelbarer Nähe der Gasfelder bei Cloppenburg. Darüber hinaus betreibt der BVEG seit 2012 ein eigenes seismisches Netzwerk in den norddeutschen Gasfeldern, welches seit 2015/2016 auch das Areal bei Cloppenburg abdeckt.

Aufgrund der zum Teil für seismologische Auswertungen ungünstigen Datengrundlage erlauben die bisherig vorliegenden, unterschiedlichen Lokalisierungsergebnisse der 12 Ereignisse in der Region Cloppenburg keine eindeutige Zuordnung zu einzelnen Gasreservoirs und bilden daher nur bedingt eine Basis für die Analyse derer Seismizität im Zusammenhang mit produktionsbedingten Änderungen der Reservoireigenschaften.

2. Beschreibung der seismologischen Auswertungen

Um die in rezente Seismizität im Raum Cloppenburg, Niedersachsen, neu zu bewerten, wurden verschiedene seismologische Verfahren angewendet:

- Schaffung einer vollständigen Datenbasis
- neue Absolutlokalisierung der Einzelereignisse
- Bewertung der Güte der Absolutlokalisierungen
- Untersuchung der Ähnlichkeit der seismischen Ereignisse untereinander mit Hilfe von Kreuzkorrelationsverfahren
- Definieren von typischen Ereignismustern
- Automatisches Screenen kontinuierlich registrierter Daten mit den Ereignismustern an ausgewählten Stationen

Auf Basis der Ergebnisse dieser Auswertungen soll eine neue Interpretation der lokalen Seismizität in der Region Cloppenburg, insbesondere unter Berücksichtigung der Ähnlichkeit seismischer Ereignisse untereinander trotz unterschiedlicher Güte der jeweiligen Lokalisierungsergebnisse, erfolgen.

2.1 Schaffung der Datenbasis

Zunächst wurde versucht, eine möglichst vollständige Datengrundlage für alle 12 seismischen Ereignisse zu schaffen. Hierfür wurden von verschiedenen Behörden, Institutionen und Universitäten länderübergreifend seismische Daten für die in Frage kommenden Zeiträume der 12 Ereignisse angefragt bzw. von den entsprechenden Datenservern heruntergeladen, sofern diese öffentlich zugänglich waren. Bisher wurden die Ereignisse ausschließlich mit nationalen, zum Großteil lediglich mit von der jeweiligen Behörde/Institution eigens betriebenen Stationen ausgewertet. Ziel war es, neue seismische Stationen zu finden, die das jeweilige Ereignis registriert haben, aber entweder geringere Herddistanzen als die bisherig genutzten Stationen aufweisen (besseres Signal-Rausch-Verhältnis) oder bisherige 'azimutale Lücken' schließen, um die Güte der Ergebnisse der Absolutlokalisierungen der Ereignisse zu verbessern. In Tabelle 2 ist die Daten-verfügbarkeit von insgesamt 59 seismischen Stationen für die 12 zu untersuchenden Ereignisse dargestellt. Es wurden 20 seismische Stationen, die teilweise im Rahmen des GRSN bzw. temporär vorrangig von der BGR, aber auch von anderen Universitäten und Institutionen, 5 Stationen, die vom KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut) in den Niederlanden und 34 Stationen, die über die DMT vom BVEG betrieben werden, herangezogen.

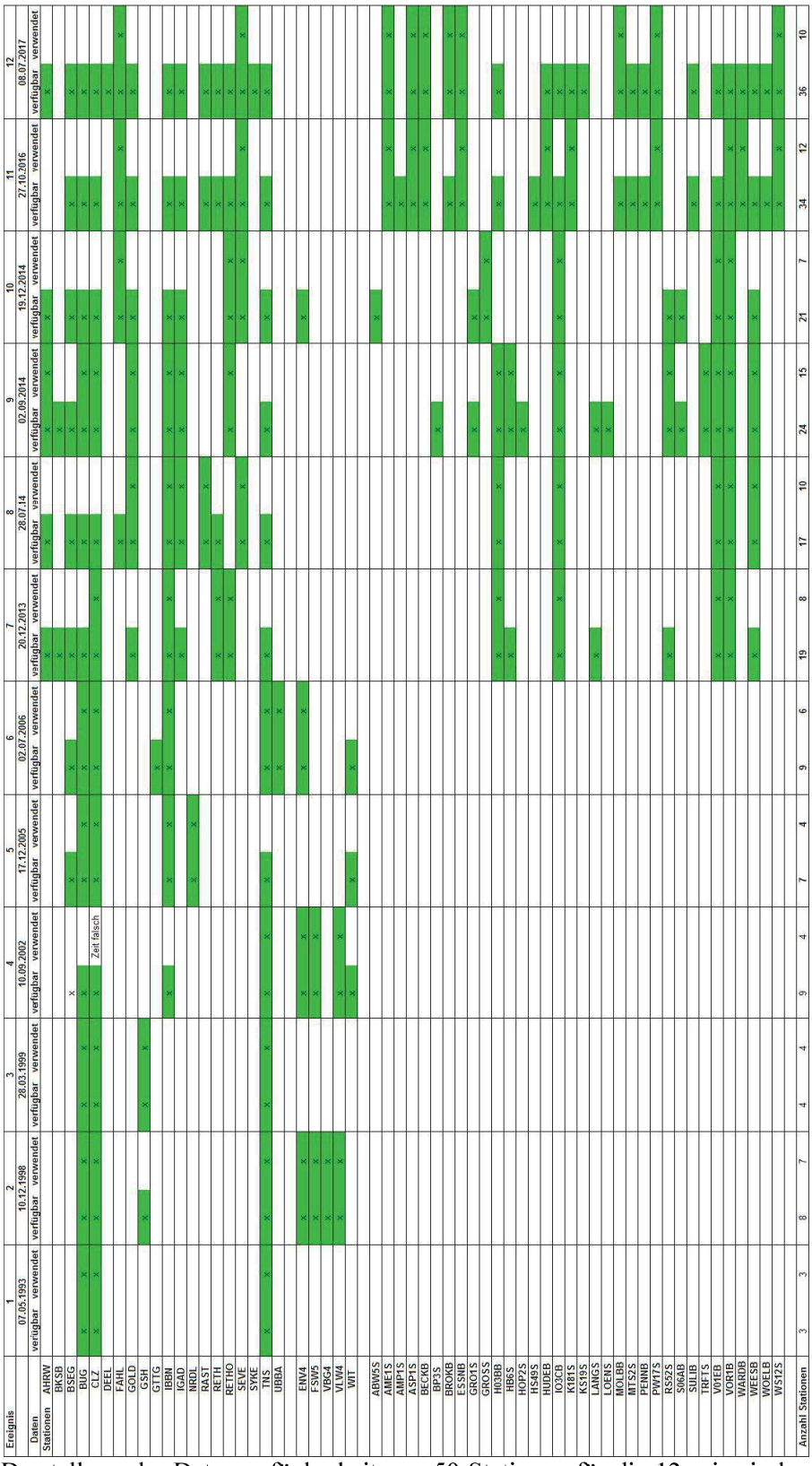


Tabelle 2. Darstellung der Datenverfügbarkeit von 59 Stationen für die 12 seismischen Ereignisse im Raum Cloppenburg.

Die Beschaffung der registrierten Daten von den vom KNMI betriebenen Stationen gestaltete sich dabei herausfordernd, da die Daten nicht ohne Weiteres vollständig online zur Verfügung stehen. Daher konnten nur von einigen der zu untersuchenden Ereignisse die Daten dieser Stationen genutzt werden. Eine vollständige Übersicht über die genutzten seismischen Stationen mit dem jeweiligen Stationscode, dem Ortsnamen, den Stationskoordinaten sowie Angaben zu Betreiber, Art der Instrumentierung und Zeitpunkt ihrer Inbetriebnahme befindet sich im Anhang 2.

Die Tabelle 2 zeigt, dass sich die Anzahl der prinzipiell zur Verfügung stehenden Stationen, die die Ereignisse aufgrund der Abschätzung der Herddistanz potentiell registriert haben könnten, im Laufe der Zeit deutlich ansteigt. Durch die sukzessive Verdichtung des seismischen Überwachungsnetzes in Norddeutschland (siehe Kapitel 1) standen für das Ereignis 1 am 07.05.1993 lediglich 3 seismische Stationen zur Verfügung (BUG, CLZ und TNS), die sich in ca. 200 km zum ermittelten Herd befanden, wohingegen das letzte zu untersuchende Erdbeben 12 vom 08.07.2017 von mindestens 36 Stationen in Entfernungen zwischen ca. 20 km und 200 km erfasst wurde. Durch die für jedes zu untersuchende Ereignis individuell zu betrachtende Datengrundlage, ist davon auszugehen, dass die Güte der Lokalisierungsergebnisse schwankt und uneinheitlich zu betrachten ist.

2.2 Relokalisierung der Erdbeben

Eine der Kernaufgaben der vorliegenden Untersuchungen ist die Relokalisierung der 12 Erdbeben mit Hilfe der neu zusammengestellten Datenbasis (siehe Kapitel 2.1). Die Lokalisierungen wurden als Absolutlokalisierungen mit Hilfe der Software *HypoLine* durchgeführt. Im Gegensatz zu Inversionsverfahren wird in der Software *HypoLine* die Auswirkung eines jeden Parameters auf die Berechnung der Hypozentralparameter grafisch ersichtlich. Die Lokalisierung in *HypoLine* basiert auf einer algebraischen Lösung und nicht auf der Linearisierung des Lokalisierungsproblems. Somit kann der Observator den Einfluss der einzelnen Informationen auf die Lösung gegeneinander abwägen und gewichten, um die Lokalität der Quelle zu bestimmen. Es lassen sich zahlreiche Lösungsvariationen innerhalb kürzester Zeit auf Plausibilität überprüfen. Das gewählte Epi- bzw. Hypozentrum eines seismischen Ereignisses entspricht daher der plausibelsten Lösung unter Berücksichtigung aller Einflussfaktoren.

Die Lokalisierung seismischer Ereignisse erfolgt mit Hilfe der Hyperbelmethode und der Differenzlaufzeit zwischen der P- und S-Phase (t_S-t_P). Dabei wird grundsätzlich der kleinste Fehler (Residuum) zwischen den determinierten und den theoretischen Einsatzzeiten eines ermittelten Hypozentrums berücksichtigt. Details zum angewendeten Verfahren mit Hilfe der Software

HypoLine können Joswig (2008) entnommen werden.

Für die Lokalisierungen wurde ein modifiziertes 1D-Modell nach Dahm et al. (2007) als Untergrundmodell verwendet, welches für das norddeutsche Tiefland aktuell von Behörden und Institutionen verlässlich angewendet wird. Allerdings hat sich während der Auswertungen herausgestellt, dass jenes Untergrundmodell nur eingeschränkt einsetzbar ist. Das Untergrundmodell geht über die Tiefe von einem konstanten v_P/v_S-Verhältnis von 1,78 aus. Während der Auswertungen hat sich allerdings herausgestellt, dass dieses v_P/v_S-Verhältnis zu gering ist und erst ein v_P/v_S-Verhältnis von 2,1 plausiblere Lokalisierungsergebnisse mit geringeren Residuen liefert. Diese Annahme bezieht sich im Wesentlichen auf zum Herdort nah gelegene Stationen in einem Radius von ca. 200 km. Daher wurde für die durchgeführten Lokalisierungen das benannte Modell nach Dahm et al. (2007) mit einem v_P/v_S-Verhältnis von 2,1 verwendet.

Des Weiteren ist während der Auswertungen aufgefallen, dass an einigen Stationen, die im Vergleich zu anderen Stationen ähnliche Herddistanzen aufweisen, die Signale der Erdbeben geschwächt (mit vergleichsweise geringerer Amplitude) und/oder mögliche Einsatzzeiten aufgrund einer 'verschmierten Registrierung' nicht eindeutig bestimmbar waren. Weiterführende Analysen zeigen, dass vor allem Stationen im Nordosten Niedersachsen davon betroffen sind. Die Abbildung 2 zeigt Horizontalspuren der Registrierungen des Erdbebens 11 vom 27.10.2016 an den Stationen IO3CB (Wiedingen) und WOELB (Wölpinghausen).

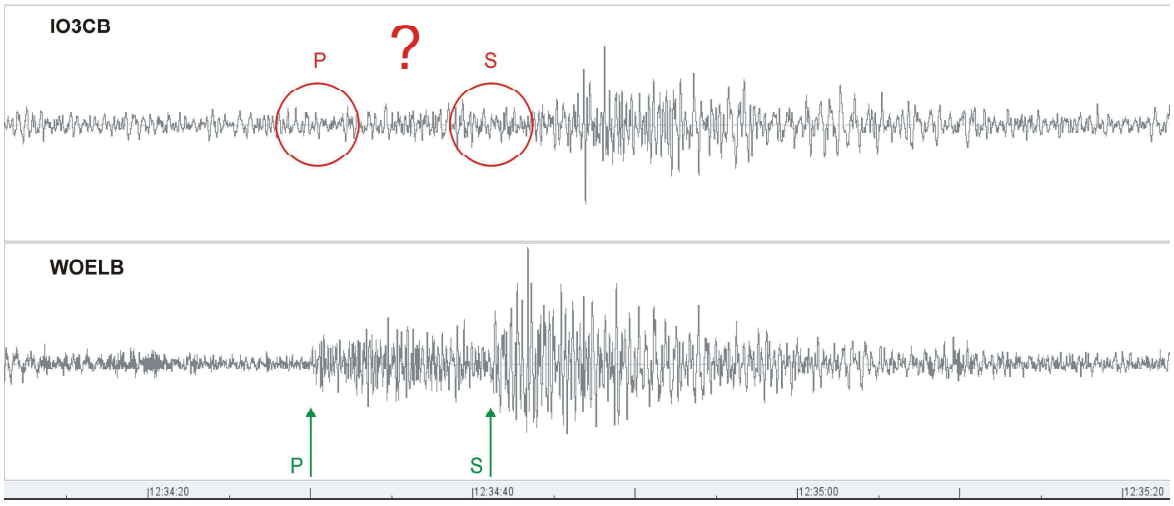


Abbildung 2. Horizontalspuren der Registrierung des Erdbebens 11 vom 27.10.2016 an den Stationen IO3CB (Wiedingen, oben) und WOELB (Wölpinghausen, unten). Die Seismogramme sind zwischen 1-15 Hz gefiltert, die Amplituden sind normiert.

Die in Abbildung 2 abgebildeten Seismogramme sind zwischen 1-15 Hz Bandpass gefiltert, die Amplituden sind normiert. Die Stationen IO3CB und WOELB befinden sich in einer vergleichbaren Distanz (ca. 85 km WOELB, ca. 100 km IO3CB) zur Lokation des Erdbebens. Die Station IO3CB ist in ca. 200 m Tiefe mit einem kurzperiodischen Bohrlochseismometer, die Station WOELB an der Oberfläche mit einem Breitbandseismometer instrumentiert. Man erkennt in Abbildung 2, dass die Bodenunruhe an der Station WOELB hochfrequente Anteile hat, die an der Station IO3CB nicht auftreten, was an der tiefen Instrumentierung in einem Bohrloch liegt. An der Station WOELB sind die impulshaften Einsätze der P- und S-Phasen deutlich zu erkennen. Dahingegen sind die Wellenphasen auf der Station IO3CB nur bedingt erkennbar, die Einsatzzeiten der einzelnen Wellenphasen lassen sich aber nicht exakt bestimmen. Obwohl beide Stationen in vergleichbarer Herdentfernung liegen und die Station IO3CB in einem Bohrloch instrumentiert ist, wo man ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis erwarten würde, sind erstaunlicherweise die exakten Einsatzzeiten einzelner Wellenphasen an jener Station nicht bestimmbar.

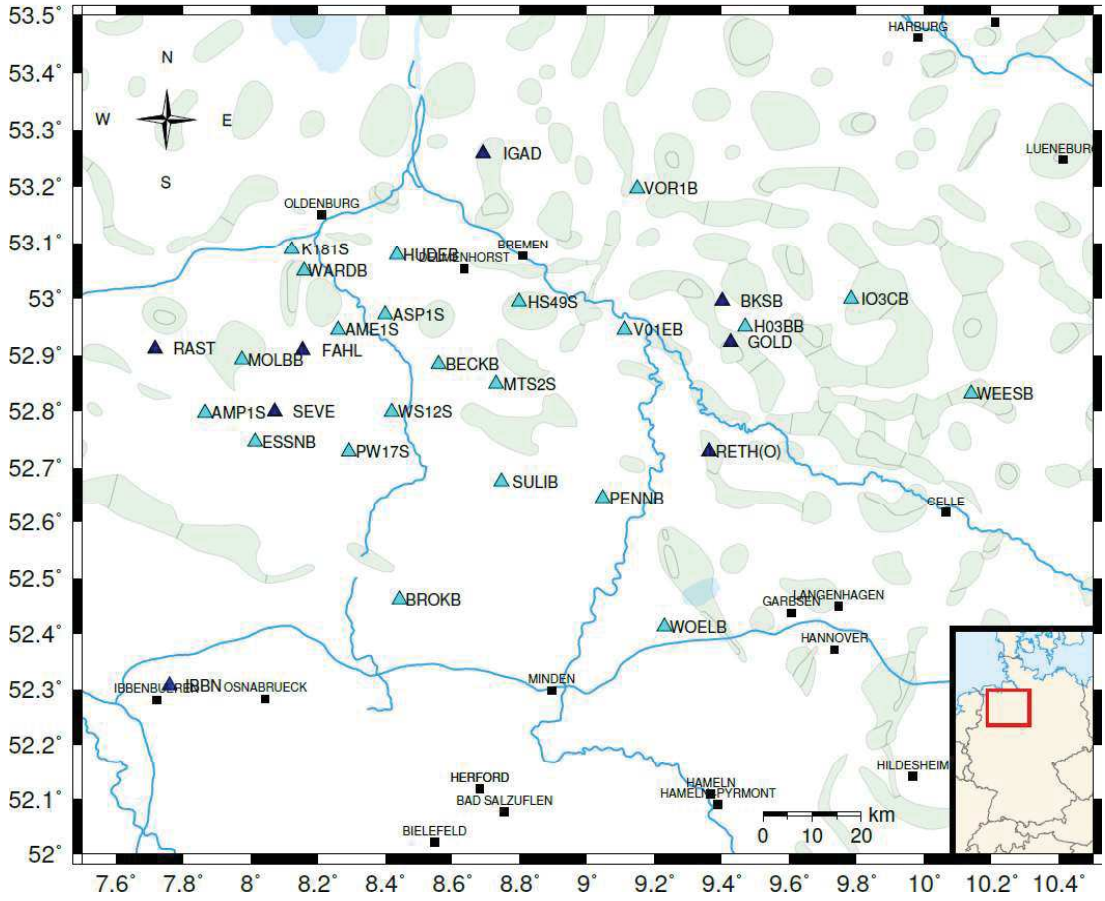


Abbildung 3. Seismische Stationen des BVEG (cyan) sowie der BGR und anderen Behörden (blau) in Mittel-Niedersachsen. Zusätzlich sind die im Untergrund gelegenen Salzstrukturen dargestellt.

Diese Beobachtung tritt vornehmlich bei den schwächeren Ereignissen, aber immer an den gleichen Stationen auf. Die Abbildung 3 zeigt die in Mittel-Niedersachen im Untergrund liegenden Salzstrukturen sowie die vom BVEG sowie der BGR und weiteren Behörden und Institutionen installierten seismischen Stationen. Aus der Abbildung 3 wird erkennbar, dass einige Stationen direkt auf im Untergrund gelegenen Salzstrukturen errichtet wurden. Prinzipiell können Salzkörper seismische Registrierungen lokaler Erdbeben auf unterschiedliche Art und Weise beeinflussen. In Salzkörpern können in Abhängigkeit der chemischen Zusammensetzung seismische Kompressionswellen Ausbreitungsgeschwindigkeiten zwischen 3.5-6.5 km/s aufweisen (Jones & Davison 2014), die, sofern in den verwendeten Untergrundmodellen unberücksichtigt, zu früheren Einsätzen von Wellenphasen führen können. Salzstrukturen können zu Beugungs- und Reflektionseffekten führen, die wiederum zu einer Ablenkung der Wellenenergie und zu geringeren Signalamplituden führen, was bei mehreren Stationen im Osten der Überwachungsnetze beobachtet wurde (vgl. Abbildung 2 und Abbildung 3).

Aus den genannten Gründen kann davon ausgegangen werden, dass bei einer Nutzung von herdnahen Stationen bei gleichzeitiger Nutzung entfernter Stationen die Güte der Lokalisierungsergebnisse negativ beeinflusst wird. Daher wurde versucht, für jedes Ereignis möglichst herdnahe Stationen in möglichst gleicher azimutaler Verteilung zu finden, anstatt alle zur Verfügung stehenden Daten zu verwenden. Außerdem wurden Stationen, die für einzelne Ereignisse offensichtlich korrupt waren, z.B. fehlerhafte Zeitsynchronisation sowie Registrierungen mit mehrdeutigen Phaseneinsätzen nicht genutzt. In Tabelle 2 sind für alle zu untersuchenden Ereignisse die zur Verfügung stehenden sowie die für die Relokalisierung verwendeten Stationen gelistet. Außerdem sind die verwendeten Stationen für jedes Ereignis in Kapitel 3 dargestellt.

2.3 Ähnlichkeitsuntersuchungen

Da die bisherig vorliegenden Lokalisierungsergebnisse der 12 Erdbeben im Raum Cloppenburg keine eindeutige Zuordnung zu tektonischen Störungszonen und/oder Erdgasreservoirs zulassen, erfolgte zusätzlich zu den Relokalisierungen der Ereignisse eine Untersuchung der Ähnlichkeit der Erdbeben untereinander. Hierfür wurde das sog. Kreuzkorrelationsverfahren (CCF – engl. Cross Correlation Function) angewendet. Dafür werden bei den einzelnen Registrierungen die Amplituden normiert, die Seismogramme gefiltert und die einzelnen Amplitudenwerte zweier Registrierungen verglichen. Diese Analyse wird daher immer paarweise durchgeführt, das Ergebnis ist ein sog. Kreuzkorrelationskoeffizient (CCC – engl. Cross Correlation Coefficient), der die Ähnlichkeit zweier Ereignisse beschreibt. Wird eine Registrierung mit Hilfe der Kreuzkorrelation sich selbst

verglichen, beträgt der CCC-Wert 1.0. Die Kreuzkorrelation ist ein sehr robustes Verfahren, da die Ähnlichkeiten zweier Registrierungen entscheidend vom Laufweg abhängen. Daher können für die Kreuzkorrelation nur gleiche Stationen verwendet werden.

Für die vorliegenden Untersuchungen konnten lediglich drei Stationen (BUG – Bochum Universität, CLZ – Clausthal-Zellerfeld, TNS – Taunus) ermittelt werden, die alle 12 zu untersuchenden Ereignisse registriert haben. Alle drei Stationen befinden sich leider in großer Entfernung von ca. 200 km zum Herdgebiet. Die Kreuzkorrelationen wurden für die gesamten Seismogramme mit einem Zeitfenster von 60s im Frequenzbereich von 1-10 Hz gerechnet. Die Ergebnisse der Ähnlichkeitsuntersuchungen der 12 Ereignisse befinden sich in Kapitel 3.2.

2.4 Ereignisdetektion mit definierten Ereignismustern

Basierend auf den Ergebnissen der Ähnlichkeitsuntersuchungen sollen Ereignismuster definiert werden, deren Signatur anschließend in den kontinuierlich registrierten Daten ausgewählter Stationen gesucht werden sollen. Hierfür wird, wie bei den Ähnlichkeitsuntersuchungen (siehe Kapitel 2.3), das Verfahren der Kreuzkorrelation angewendet. Die kontinuierlich registrierten Daten werden im gleichen Frequenzband wie die Ereignismuster gefiltert (1-10 Hz), das Muster soll anschließend im Zeitbereich über die gesamte Registrierungsdauer detektiert werden. Ein CCF-Ereignisdetektor ist in der Regel nur über ca. 2 Magnituden gültig, da aufgrund des veränderten Bruchverhaltens bei niedrigeren bzw. stärkeren Erdbeben, die registrierten Seismogramme zu unähnlich zum definierten Ereignismuster sind, um automatisch detektiert werden zu können. Da die potentiell zur Verfügung stehenden Ereignismuster lediglich an entfernten Stationen (BUG, CLZ, TNS) vollständig registriert wurden, wo das Signal-Rausch-Verhältnis sehr gering ist, ist es unwahrscheinlich, etwaige Erdbeben geringerer Stärke zu detektieren. Daher sollen in Abhängigkeit der Ergebnisse der Ähnlichkeitsuntersuchungen Ereignismuster gewählt werden, die ggf. von näher gelegenen Stationen registriert wurden. Somit könnten auch schwächere Ereignisse mit Hilfe des CCF-Ereignisdetektors automatisch detektiert werden. Die Ergebnisse der automatischen Ereignisdetektion mit Hilfe definierter Ereignismuster können Kapitel 3.3 entnommen werden.

3. Ergebnisse der seismischen Untersuchungen

Die Ergebnisse der seismischen Untersuchungen der 12 in der Region Cloppenburg, Niedersachsen, aufgetretenen Erdbeben können diesem Kapitel entnommen werden. Die Untersuchungen umfassen die Relokalisierung der 12 Ereignisse (Absolutlokalisierung), die Untersuchung der Ähnlichkeit der Ereignisse untereinander mit Hilfe der Kreuzkorrelation und das automatisierte screenen kontinuierlich registrierter seismischer Daten mit vorher definierten Ereignismustern.

3.1 Relokalisierung der Erdbeben

Alle 12 in der Vergangenheit in der Region Cloppenburg, Niedersachsen, aufgetretenen Erdbeben (siehe Kapitel 1) wurden mit Hilfe der neu geschaffenen Datenbasis (siehe Kapitel 2.1) relokalisiert (Absolutlokalisierung). Hierfür wurde das modifizierte 1D-Untergrundmodell nach Dahm et al. (2007) verwendet (siehe Kapitel 2.2). Die Ergebnisse der Relokalisierungen sind, chronologisch nach dem Auftreten der Erdbeben sortiert, in diesem Kapitel zusammengefasst.

3.1.2 Ereignis 1 vom 07.05.1993

Das Ereignis 1 ereignete sich am 07.05.1993 und wurde von der BGR sowie von Uta (2017) außerhalb von Gasreservoirs, ca. 5 km nordwestlich der Ortschaft Molbergen mit Magnituden von M_L = 2.5 bzw. M_L = 2.9 lokalisiert (siehe Abbildung A1-1 im Anhang). Es konnten für dieses Ereignis mit den Stationen BUG, CLZ und TNS lediglich 3 Stationen gefunden werden, die das Ereignis registriert haben. Somit konnte keine Absolutlokalisierung durchgeführt werden, da die Residuen aus den ermittelten und simulierten Welleneinsatzzeiten mit >20 s keine plausible Lokalisierung zuließen. Die externen Lokalisierungsergebnisse wurden wahrscheinlich mit den gleichen Stationen durchgeführt, wodurch von vergleichbaren Unsicherheiten in der Güte der Ergebnisse ausgegangen werden kann.

3.1.3 Ereignis 2 vom 10.12.1998

Das Ereignis 2 ereignete sich am 10.12.1998 und wurde von der BGR, dem LBEG (Bischoff et al. 2015) sowie von Uta (2017) mit Magnituden zwischen M_L = 2.2 und M_L = 2.4 lokalisiert (siehe Abbildung A1-2 im Anhang). Eines der Lokalisierungsergebnisse befindet liegt außerhalb der Gasfelder ca. 5 km nördlich von Emstek, das andere in ca. 20 km Entfernung in einem Gasfeld ca. 5 km nordöstlich von Vechta.

Für dieses Erdbeben konnten 4 in Deutschland betriebene Stationen (BUG, CLZ, GSH, TNS) sowie 4 vom KNMI in den Niederlanden betriebene Stationen (ENV4, FSW5, VBG4, VLW4) gefunden

werden, die das Ereignis registriert haben. Die Abbildung 4 zeigt die zur Verfügung stehenden Stationen, die für die Lokalisierung verwendeten Stationen sowie das ermittelte Epizentrum als geografische Übersicht.

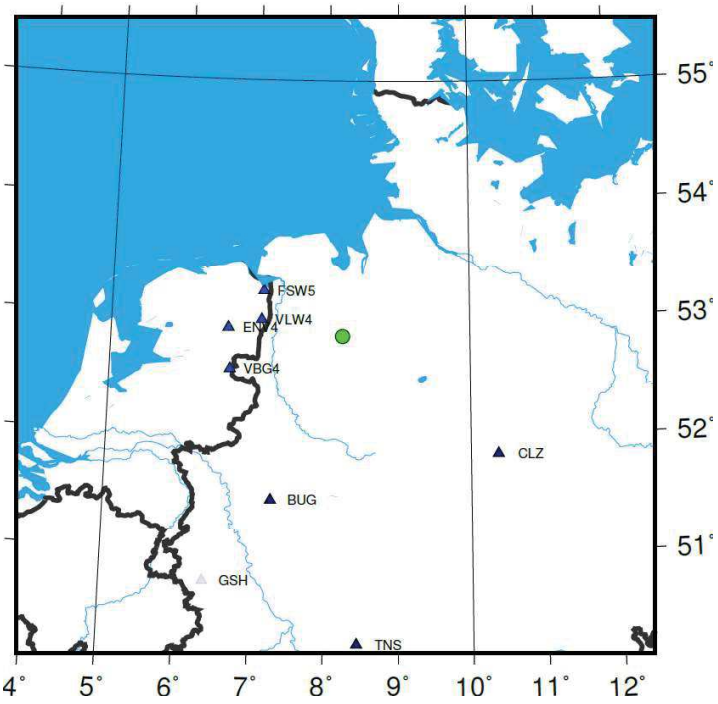


Abbildung 4. Darstellung der für die Lokalisierung des Ereignisses 2 vom 10.12.1998 zur Verfügung stehenden (Dreiecke) und genutzten Stationen (blaue Dreiecke) sowie das ermittelte Epizentrum des Ereignisses.

Mit Hilfe von sieben der genannten Stationen konnte das Ereignis ca. 5 km östlich von Emstek und ca. 5 km westlich von Visbek im Bereich der Gasfelder lokalisiert werden. Trotz der Tatsache, dass sich mit der Nutzung der vom KNMI betriebenen Stationen die Lokalisierungsgenauigkeit stark verbessert hat, liegen die Residuen zwischen ermittelten und simulierten Welleneinsatzzeiten bei ca. 7s, weshalb die Ungenauigkeit der Lokalisierung relativ hoch ist und mit mehreren Kilometern abgeschätzt wird. Das Erdbeben mit einer Magnitude von M_L = 2.2 und einer Tiefe von 4,8 km wurde im Bereich der Gasfelder lokalisiert. Die Abbildung 5 zeigt das ermittelte Epizentrum des Ereignisses.

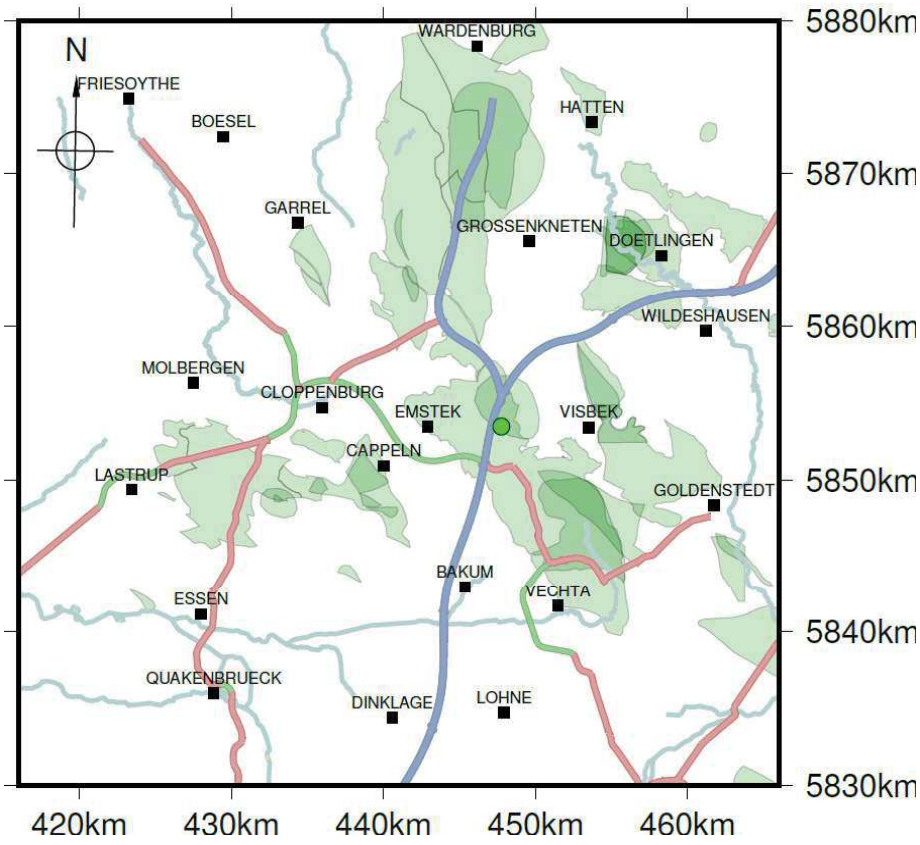


Abbildung 5. Geografische Lage des ermittelten Epizentrums des Ereignisses 2 vom 10.12.1998 (grüner Kreis).

3.1.4 Ereignis 3 vom 28.03.1999

Das Ereignis 3 ereignete sich am 28.03.1999 und wurde von der BGR, dem LBEG (Bischoff et al. 2015) sowie von Uta (2017) in einem Radius von ca. 5 km östlich bis nordwestlich der Ortschaft Vechta mit Magnituden zwischen M_L = 2.0 und M_L = 2.1 lokalisiert (siehe Abbildung A1-3 im Anhang). Von diesen drei Lokalisierungsergebnissen liegt eine innerhalb des Gasreservoirs nördlich von Vechta, die beiden anderen östlich bzw. westlich davon. Eine neue Auswertung seitens der BGR vom 15.09.2017 kommt zu dem Schluss, dass das Ereignis wenige Kilometer östlich von Emstek stattgefunden hat (Gestermann 2017). In diese Lokalisierung sind neue Daten der vom KNMI betriebenen Stationen eingeflossen, die uns leider unzugänglich waren. Es konnten somit für dieses Ereignis mit den Stationen BUG, CLZ, GSH und TNS lediglich 4 Stationen gefunden werden, die das Ereignis registriert haben. Somit konnte keine Absolutlokalisierung durchgeführt werden, da die Residuen aus den ermittelten und simulierten Welleneinsatzzeiten mit >15 s keine plausible Lokalisierung zuließen.

3.1.5 Ereignis 4 vom 10.09.2002

Das Ereignis 4 ereignete sich am 10.09.2002 und wurde von der BGR, dem LBEG (Bischoff et al. 2015) sowie von Uta (2017) mit Magnituden zwischen M_L = 2.5 und M_L = 2.6 lokalisiert (siehe Abbildung A1-4 im Anhang). Beide ermittelten Epizentren befinden sich wenige Kilometer nördlich von Emstek, wobei ein Ergebnis innerhalb der Gasfelder liegt. Für dieses Erdbeben konnten 5 in Deutschland betriebene Stationen (BSEG, BUG, CLZ, IBBN, TNS) sowie 4 vom KNMI in den Niederlanden betriebene Stationen (ENV4, FSW5, VLW4, WIT) gefunden werden, die das Ereignis potentiell registriert haben könnten. Leider konnten lediglich 4 Stationen für die Lokalisierung genutzt werden. Die Abbildung 6 zeigt die zur Verfügung stehenden Stationen, die für die Lokalisierung verwendeten Stationen sowie das ermittelte Epizentrum als geografische Übersicht.

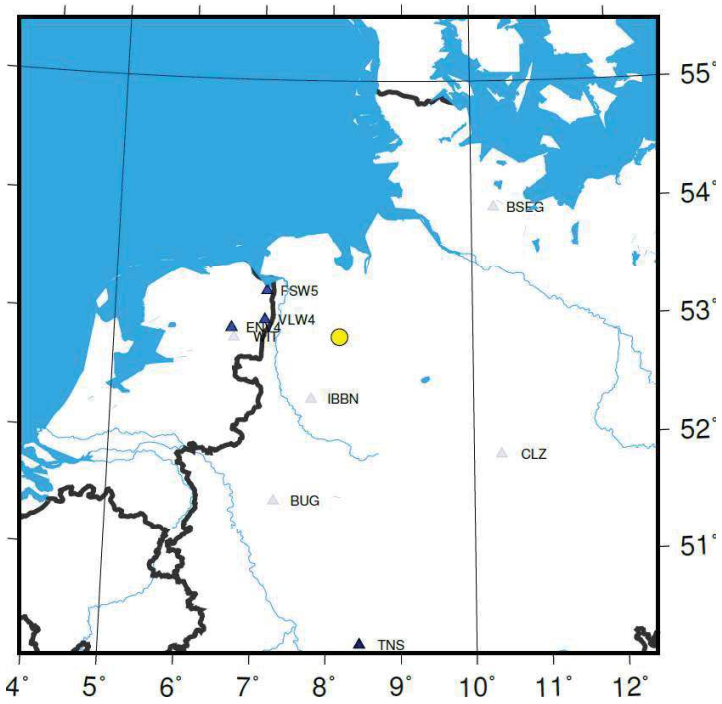


Abbildung 6. Darstellung der für die Lokalisierung des Ereignisses 4 vom 10.09.2002 zur Verfügung stehenden (Dreiecke) und genutzten Stationen (blaue Dreiecke) sowie das ermittelte Epizentrum des Ereignisses.

Trotz der Tatsache, dass sich mit der Nutzung der vom KNMI betriebenen Stationen die Lokalisierungsgenauigkeit stark verbessert hat, liegen die Residuen zwischen ermittelten und simulierten Welleneinsatzzeiten bei ca. 6.5 s, weshalb die Ungenauigkeit der Lokalisierung relativ hoch ist und mit mehreren Kilometern abgeschätzt wird.

Das Erdbeben mit einer Magnitude von M_L = 2.6 und einer Tiefe von 5,2 km wurde am Rand eines Gasfelds direkt bei der Ortschaft Emstek lokalisiert. Die Abbildung 7 zeigt das ermittelte Epizentrum des Ereignisses.

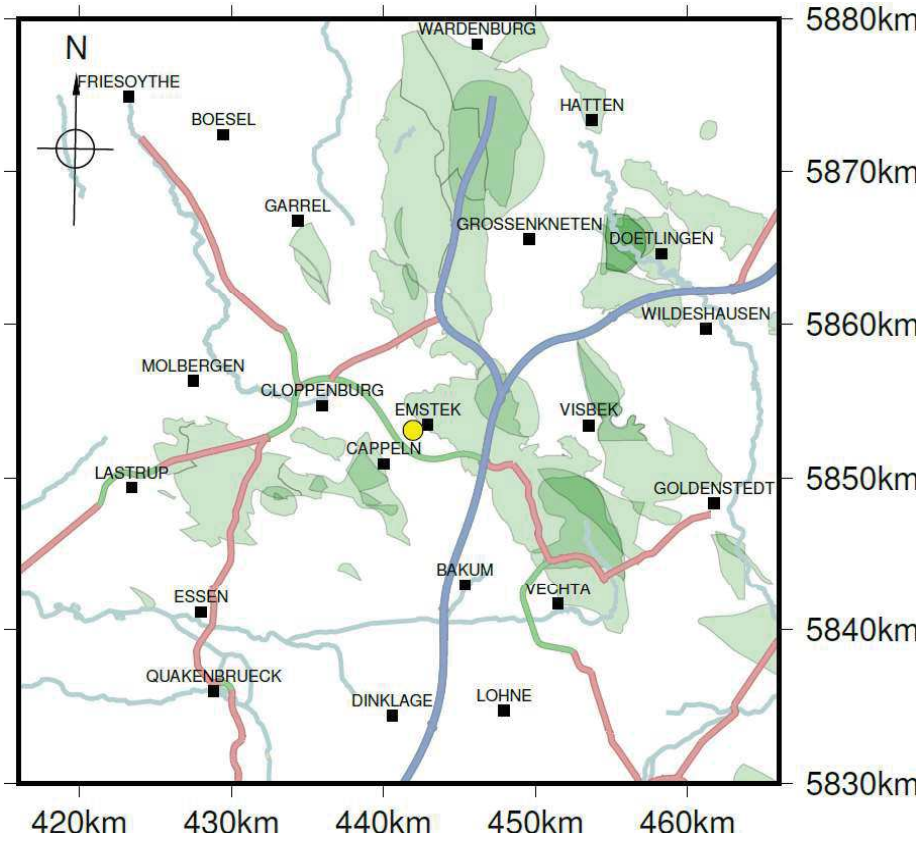


Abbildung 7. Geografische Lage des ermittelten Epizentrums des Ereignisses 4 vom 10.09.2002 (gelber Kreis).

3.1.6 Ereignis 5 vom 17.12.2005

Das Ereignis 5 ereignete sich am 17.12.2005 und wurde gemeinsam von der BGR und dem LBEG (Bischoff et al. 2015) sowie von Uta (2017) mit Magnituden zwischen M_L = 2.2 und M_L = 2.5 lokalisiert. Eine Lösung liegt ca. 5 km nordöstlich von Emstek in einem Gasreservoir, die zweite Lösung, in ca. 20 km Entfernung, wenige Kilometer nordwestlich von Goldenstedt in einem anderen Gasreservoir (siehe Abbildung A1-5 im Anhang). Es konnten für dieses Ereignis mit den Stationen BSEG, BUG, CLZ, IBBN, NRDL, TNS sowie der vom KNMI betriebenen Station WIT immerhin 7 Stationen gefunden werden, die das Ereignis potentiell registriert haben. Leider stellte sich aber heraus, dass die Registrierungen von der Mehrheit der Stationen aufgrund lokaler

Bodenunruhe bzw. aufgrund eines geringen Signal-Rausch-Verhältnisses nur bedingt genutzt werden konnten. Letztlich wurden für den Versuch der Lokalisierung die Stationen BUG, CLZ, IBBN und NRDL benutzt, jedoch konnte aufgrund der Residuen aus den ermittelten und simulierten Welleneinsatzzeiten mit >15 s keine plausible Lokalisierung erfolgen.

3.1.7 Ereignis 6 vom 02.07.2006

Das Ereignis 6 ereignete sich am 02.07.2006 und wurde von der BGR, dem LBEG (Bischoff et al. 2015) sowie von Uta (2017) mit Magnituden zwischen M_L = 2.7 und M_L = 2.8 lokalisiert (siehe Abbildung A1-6 im Anhang). Insgesamt wurden drei Epizentren ermittelt, die sich bei der Ortschaft Lastrup (2 Lösungen außerhalb von Gasfeldern) sowie wenige Kilometer südlich von Cappeln in ca. 20 km Entfernung zu den anderen beiden Lösungen innerhalb eines Gasfeldes befinden. Für dieses Erdbeben konnten 7 in Deutschland betriebene Stationen (BSEG, BUG, CLZ, GTTG, IBBN, TNS, UBBA) sowie 2 vom KNMI in den Niederlanden betriebene Stationen (ENV4, WIT) gefunden werden, die das Ereignis potentiell registriert haben könnten. Von diesen insgesamt 9 Stationen konnten 6 für eine plausible Lokalisierung mit Residuen von <1.0 s verwendet werden. Die Abbildung 8 zeigt die zur Verfügung stehenden Stationen, die für die Lokalisierung verwendeten Stationen sowie das ermittelte Epizentrum als geografische Übersicht.

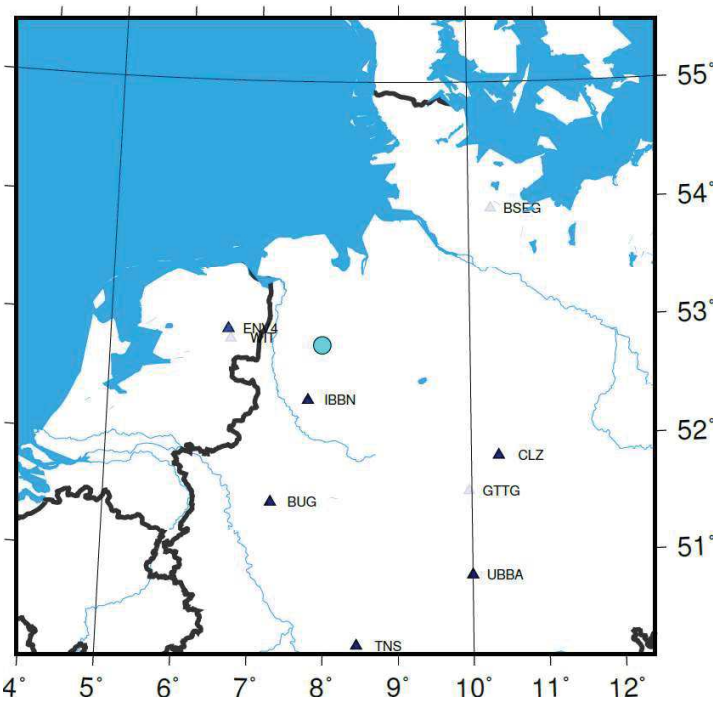


Abbildung 8. Darstellung der für die Lokalisierung des Ereignisses 6 vom 02.07.2006 zur Verfügung stehenden (Dreiecke) und genutzten Stationen (blaue Dreiecke) sowie das ermittelte Epizentrum des Ereignisses.

Das Erdbeben mit einer Magnitude von M_L = 2.7 und einer Tiefe von 4,6 km wurde am Rand eines Gasfelds ca. 5 km südöstlich von Lastrup lokalisiert. Die Abbildung 9 zeigt das ermittelte Epizentrum des Ereignisses.

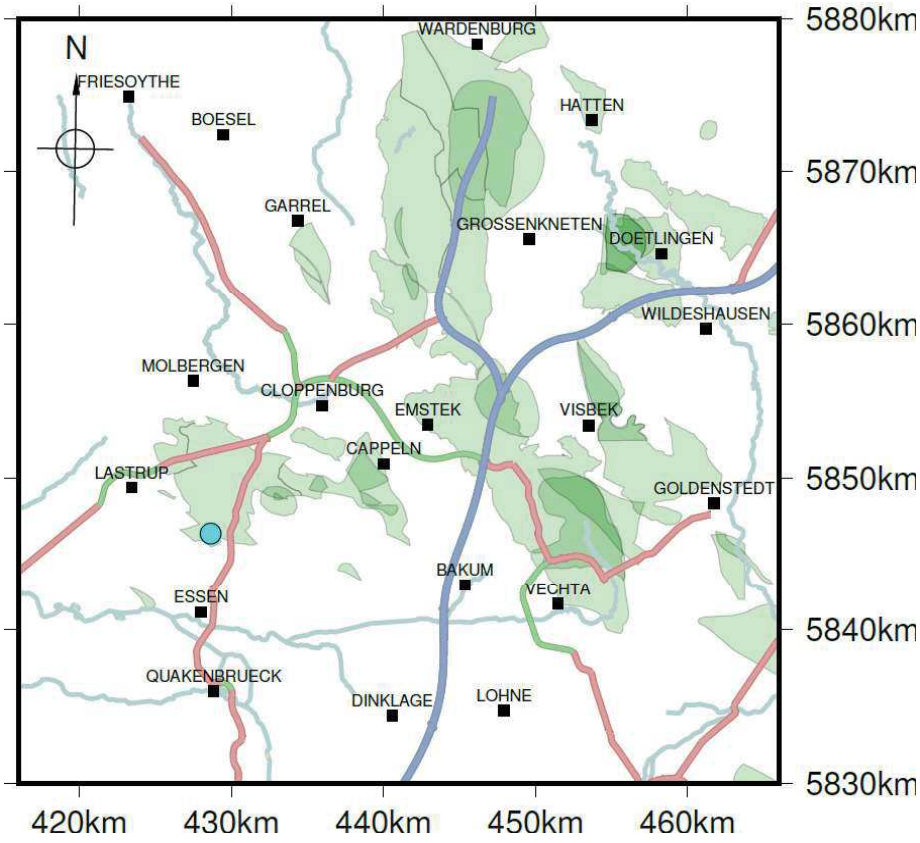


Abbildung 9. Geografische Lage des ermittelten Epizentrums des Ereignisses 6 vom 02.07.2006 (cyaner Kreis).

3.1.8 Ereignis 7 vom 20.12.2013

Das Ereignis 7 ereignete sich am 20.12.2013 und wurde von der BGR, dem LBEG (Bischoff et al. 2015) sowie von Uta (2017) mit Magnituden von M_L = 2.4 lokalisiert (siehe Abbildung A1-7 im Anhang). Insgesamt wurden drei Epizentren ermittelt, die sich alle am Rand eines Gasfeldes bei der Ortschaft Emstek befinden. Für dieses Erdbeben konnten aufgrund der Installation des seismischen Überwachungsnetzes des BVEG in 2013 19 in Deutschland betriebene Stationen gefunden werden, die das Ereignis potentiell registriert haben könnten (siehe Tabelle 2). Von diesen wurden 8 Stationen für eine plausible Lokalisierung mit Residuen von <1.0 s verwendet. Die Abbildung 10

zeigt die zur Verfügung stehenden Stationen, die für die Lokalisierung verwendeten Stationen sowie das ermittelte Epizentrum als geografische Übersicht.

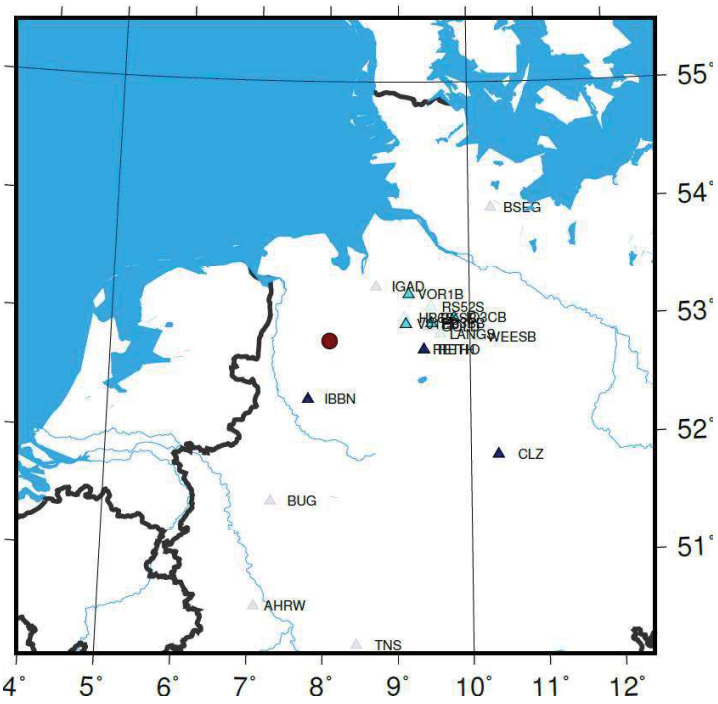


Abbildung 10. Darstellung der für die Lokalisierung des Ereignisses 7 vom 20.12.2013 zur Verfügung stehenden (Dreiecke) und genutzten Stationen (blaue Dreiecke) sowie das ermittelte Epizentrum des Ereignisses.

Das Erdbeben mit einer Magnitude von $M_L = 2.4$ und einer Tiefe von 4,8 km wurde innerhalb eines Gasfelds ca. 5 km südwestlich von Cappeln lokalisiert. Die Abbildung 11 zeigt das ermittelte Epizentrum des Ereignisses.

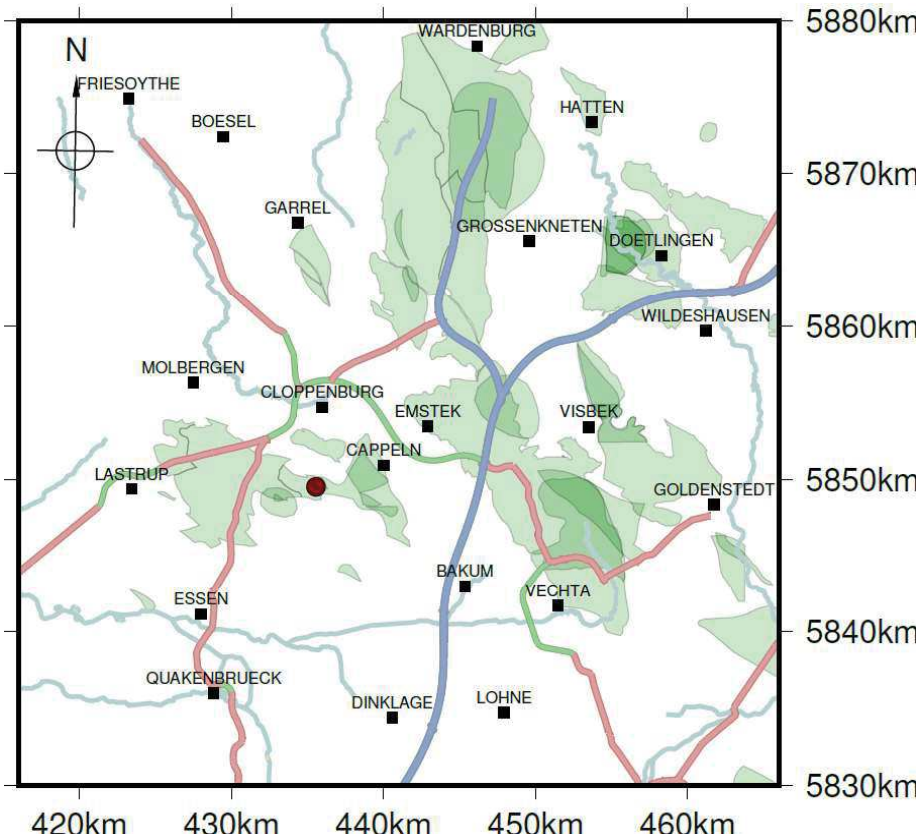


Abbildung 11. Geografische Lage des ermittelten Epizentrums des Ereignisses 7 vom 20.12.2013 (brauner Kreis).

3.1.9 Ereignis 8 vom 28.07.2014

Das Ereignis 8 ereignete sich am 28.07.2014 und wurde von der BGR, dem LBEG (Bischoff et al. 2015), der DMT als Betreiber des BVEG-Netzes sowie von Uta (2017) mit Magnituden zwischen M_L = 2.0 und M_L = 2.1 lokalisiert (siehe Abbildung A1-8 im Anhang). Insgesamt wurden vier Epizentren ermittelt, die sich alle in wenigen Kilometern Entfernung zur Ortschaft Grossenkneten befinden. Ein ermitteltes Epizentrum befindet sich am Rand eines Gasfeldes ca. 5 km südwestlich von Dötlingen. Für dieses Erdbeben konnten aufgrund der 2013 erfolgten Installation des seismischen Überwachungsnetzes des BVEG in 19 in Deutschland betriebene Stationen gefunden werden, die das Ereignis potentiell registriert haben könnten (siehe Tabelle 2). Von diesen wurden 10 Stationen für eine plausible Lokalisierung mit Residuen von <1.0 s verwendet. Die Abbildung 12 zeigt die zur Verfügung stehenden Stationen, die für die Lokalisierung verwendeten Stationen sowie das ermittelte Epizentrum als geografische Übersicht.

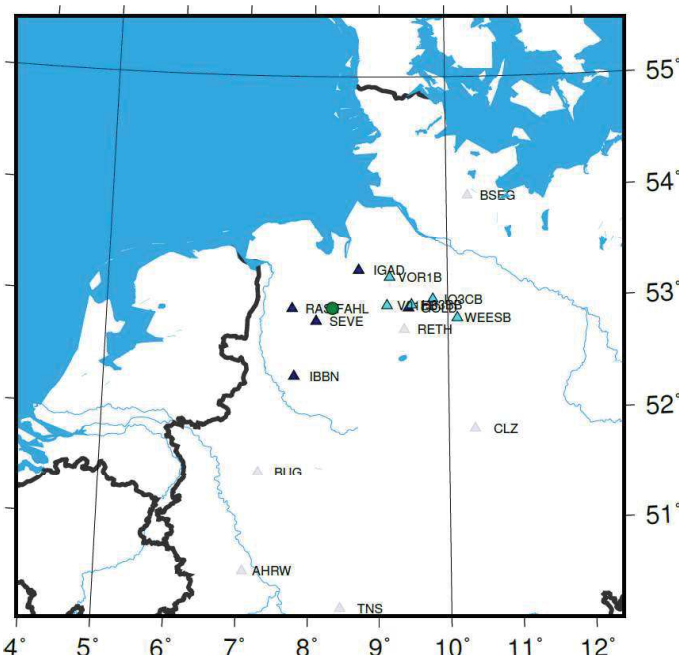


Abbildung 12. Darstellung der für die Lokalisierung des Ereignisses 8 vom 28.07.2014 zur Verfügung stehenden (Dreiecke) und genutzten Stationen (gefüllte Dreiecke) sowie das ermittelte Epizentrum des Ereignisses.

Vergleichbar zu diesen vorliegenden Untersuchungen wurden in einer vorangegangenen Studie Erdbeben im Raum Dötlingen analysiert, neu absolut lokalisiert und auf Ähnlichkeiten hin untersucht. Das Ereignis 8 vom 28.07.2014 mit einer Magnitude von $M_L = 2.0$ als auch das Ereignis 11 vom 27.10.2016 mit einer Magnitude von $M_L = 2.1$ wurden in einer Tiefe von 4,3 km lokalisiert. Aufgrund der großen Ähnlichkeit der beiden Ereignisse wurden die Epizentren auf die gleiche Herdlokation gesetzt (Seismic Solutions 2017). Die ermittelten Epizentren liegen ca. 5 km südwestlich von Dötlingen am Rand eines Gasfeldes. Die Abbildung 13 zeigt die ermittelten Epizentren der Ereignisse.

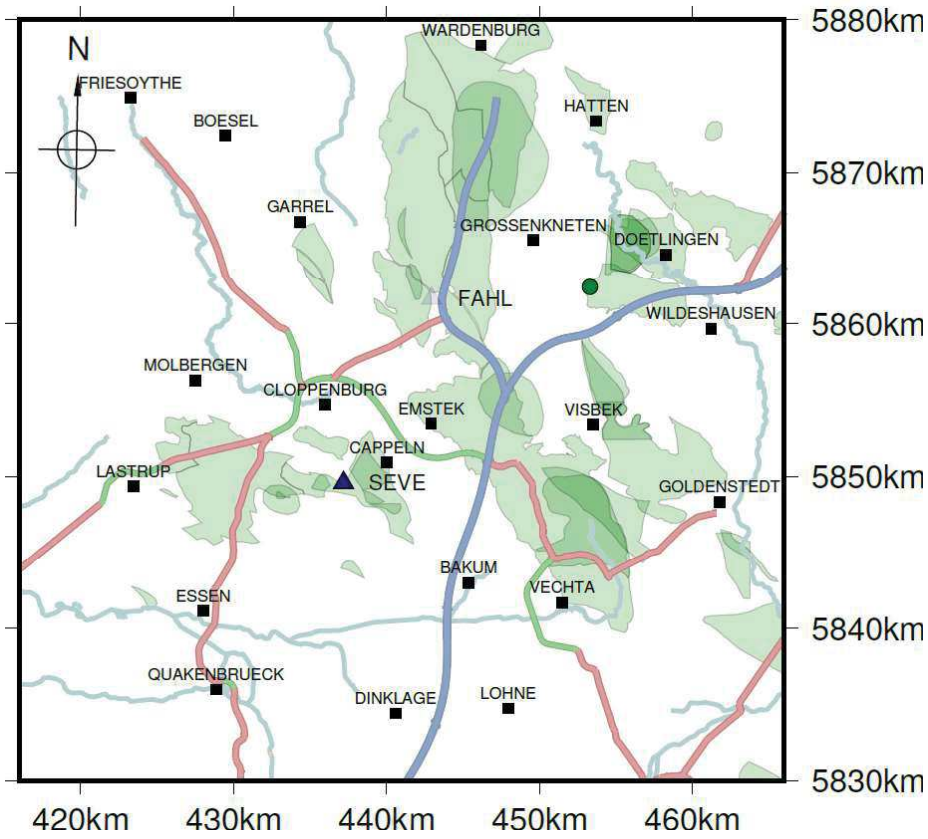


Abbildung 13. Geografische Lage des ermittelten Epizentrums des Ereignisses 8 vom 28.07.2014 (grüner Kreis).

3.1.10 Ereignis 9 vom 02.09.2014

Das Ereignis 9 ereignete sich am 02.09.2014 und wurde von der BGR, dem LBEG (Bischoff et al. 2015) sowie von Uta (2017) mit Magnituden zwischen M_L = 2.7 und M_L = 2.8 lokalisiert (siehe Abbildung A1-9 im Anhang). Insgesamt wurden drei Epizentren ermittelt, die sich am Rand eines Gasfeldes ca. 5 km südöstlich der Ortschaft Emstek befinden. Für dieses Erdbeben konnten aufgrund der Installation des seismischen Überwachungsnetzes des BVEG in 2013 24 in Deutschland betriebene Stationen gefunden werden, die das Ereignis potentiell registriert haben könnten (siehe Tabelle 2). Von diesen wurden 15 Stationen für eine plausible Lokalisierung mit Residuen von <1.0 s verwendet. Die Abbildung 14 zeigt die zur Verfügung stehenden Stationen, die für die Lokalisierung verwendeten Stationen sowie das ermittelte Epizentrum als geografische Übersicht.

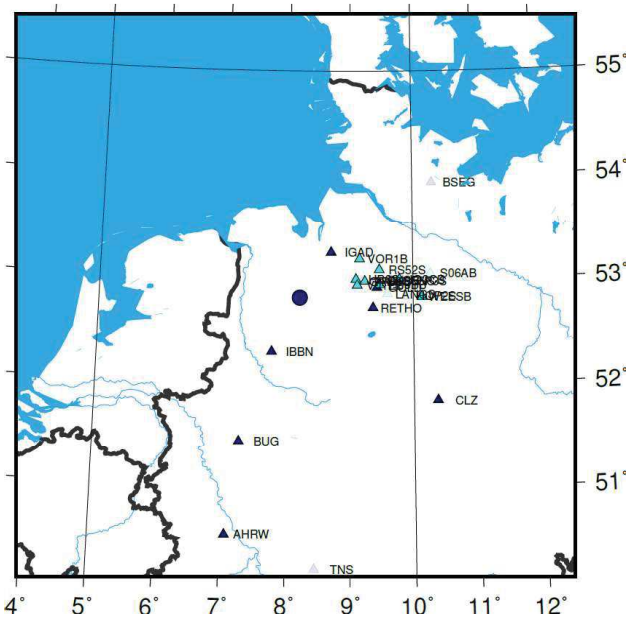


Abbildung 14. Darstellung der für die Lokalisierung des Ereignisses 9 vom 02.09.2014 zur Verfügung stehenden (Dreiecke) und genutzten Stationen (gefüllte Dreiecke) sowie das ermittelte Epizentrum des Ereignisses.

Das Erdbeben mit einer Magnitude von M_L = 2.7 und einer Tiefe von 4,7 km wurde am Rand eines Gasfelds ca. 3 km südöstlich von Emstek lokalisiert. Die Abbildung 15 zeigt das ermittelte Epizentrum des Ereignisses.

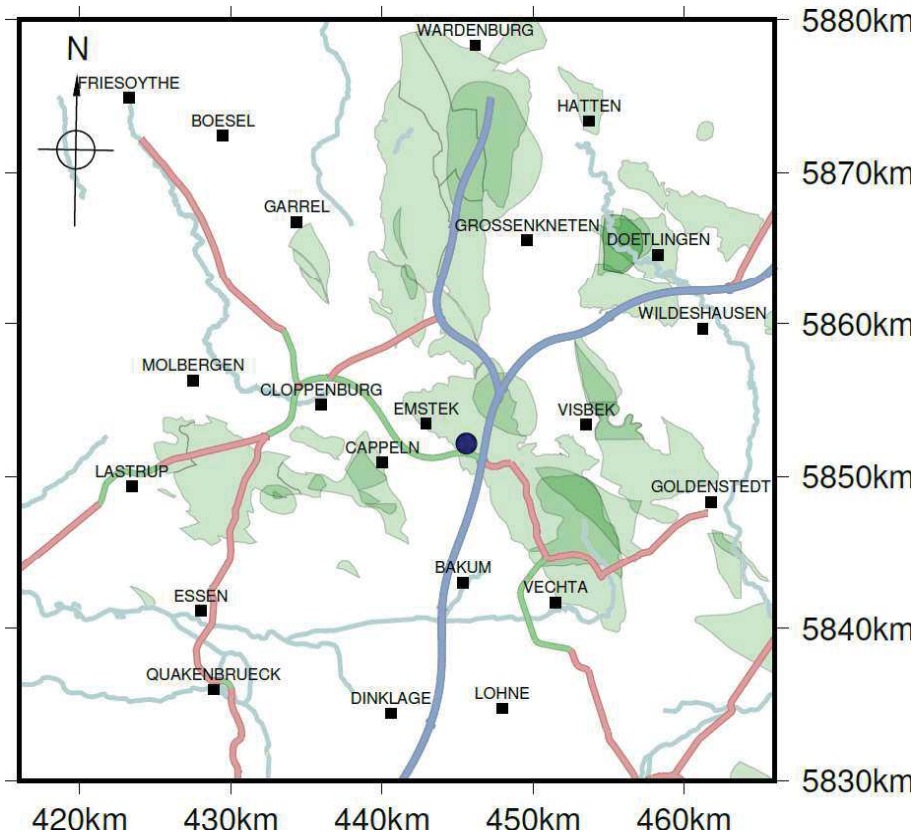


Abbildung 15. Geografische Lage des ermittelten Epizentrums des Ereignisses 9 vom 02.09.2014 (blauer Kreis).

3.1.11 Ereignis 10 vom 19.12.2014

Das Ereignis 10 ereignete sich am 19.12.2014 und wurde von der BGR, dem LBEG (Bischoff et al. 2015) sowie von Uta (2017) mit Magnituden zwischen M_L = 2.9 und M_L = 3.1 lokalisiert (siehe Abbildung A1-10 im Anhang). Insgesamt wurden drei Epizentren ermittelt, die sich innerhalb eines Gasfeldes ca. 3 km östlich der Ortschaft Emstek befinden. Für dieses Erdbeben konnten aufgrund der Installation des seismischen Überwachungsnetzes des BVEG in 2013 21 in Deutschland betriebene Stationen gefunden werden, die das Ereignis potentiell registriert haben könnten (siehe Tabelle 2). Von diesen wurden 7 Stationen für eine plausible Lokalisierung mit Residuen von <1.0 s verwendet. Die Abbildung 16 zeigt die zur Verfügung stehenden Stationen, die für die Lokalisierung verwendeten Stationen sowie das ermittelte Epizentrum als geografische Übersicht.

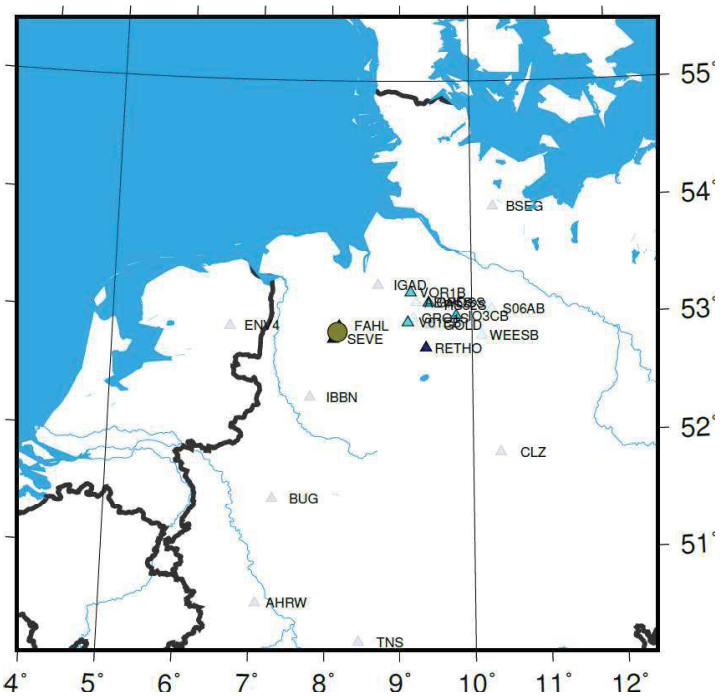


Abbildung 16. Darstellung der für die Lokalisierung des Ereignisses 10 vom 19.12.2014 zur Verfügung stehenden (Dreiecke) und genutzten Stationen (gefüllte Dreiecke) sowie das ermittelte Epizentrum des Ereignisses.

Das Erdbeben mit einer Magnitude von M_L = 3.0 und einer Tiefe von 4,2 km wurde am Rand eines Gasfelds ca. 3 km nordwestlich von Emstek lokalisiert. Die Abbildung 17 zeigt das ermittelte Epizentrum des Ereignisses.

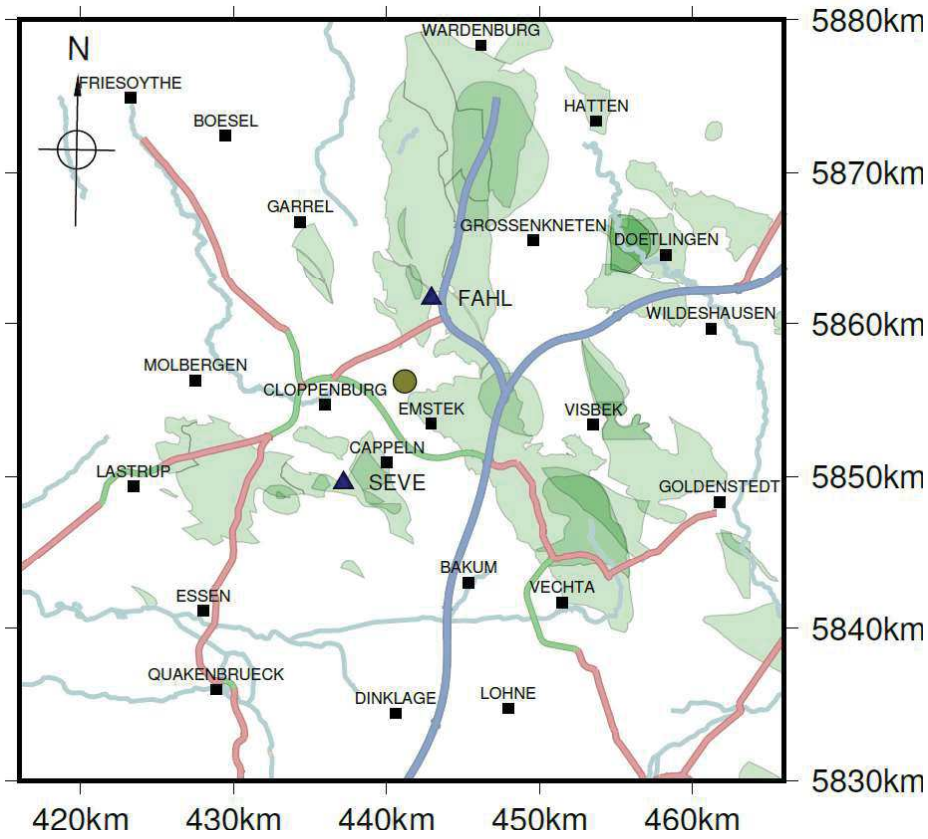


Abbildung 17. Geografische Lage des ermittelten Epizentrums des Ereignisses 10 vom 19.12.2014 (brauner Kreis).

3.1.12 Ereignis 11 vom 27.10.2016

Das Ereignis 11 ereignete sich am 27.10.2016 und wurde von der BGR, dem LBEG (Bischoff et al. 2015), der DMT als Betreiber des BVEG-Netzes sowie von Uta (2017) mit Magnituden zwischen M_L = 2.1 und M_L = 2.3 lokalisiert (siehe Abbildung A1-11 im Anhang). Insgesamt wurden vier Epizentren ermittelt, die sich in einem Radius von ca. 5 km um die Ortschaft Grossenkneten befinden. Davon wurde ein Epizentrum in einem sich nordwestlich von Grossenkneten befindlichen Gasreservoir und ein weiteres in einem sich südöstlich davon sich befinden Gasreservoir ermittelt. Für dieses Erdbeben konnten aufgrund der 2013 erfolgten Installation des seismischen Überwachungsnetzes des BVEG in 34 in Deutschland betriebene Stationen gefunden werden, die das Ereignis potentiell registriert haben könnten (siehe Tabelle 2). Von diesen wurden 12 Stationen für eine plausible Lokalisierung mit Residuen von <1.0 s verwendet. Die Abbildung 18 zeigt die zur Verfügung stehenden Stationen, die für die Lokalisierung verwendeten Stationen sowie das ermittelte Epizentrum als geografische Übersicht.

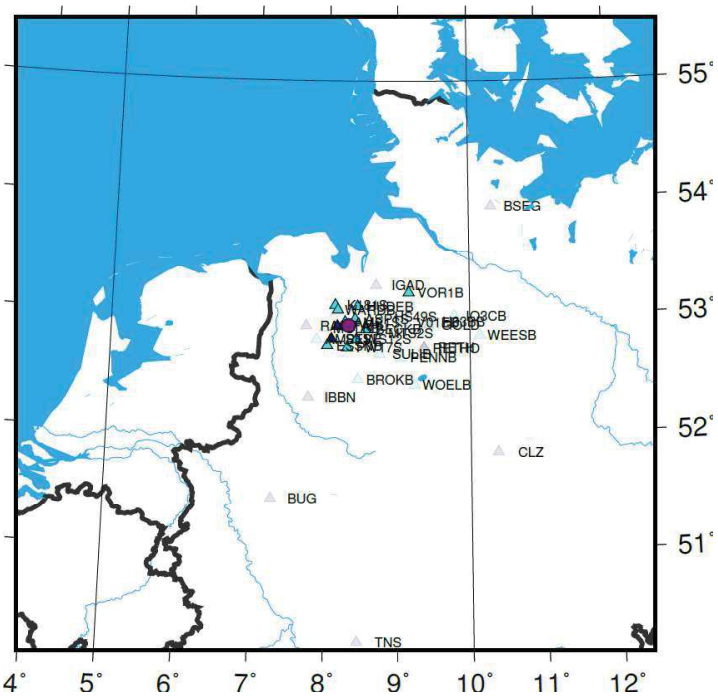


Abbildung 18. Darstellung der für die Lokalisierung des Ereignisses 11 vom 27.10.2016 zur Verfügung stehenden (Dreiecke) und genutzten Stationen (gefüllte Dreiecke) sowie das ermittelte Epizentrum des Ereignisses.

Vergleichbar zu diesen vorliegenden Untersuchungen wurden in einer vorangegangenen Studie Erdbeben im Raum Dötlingen analysiert, neu absolut lokalisiert und auf Ähnlichkeiten hin untersucht. Das Ereignis 8 vom 28.07.2014 mit einer Magnitude von $M_L = 2.0$ als auch das Ereignis 11 vom 27.10.2016 mit einer Magnitude von $M_L = 2.1$ wurden in einer Tiefe von 4,3 km lokalisiert. Aufgrund der großen Ähnlichkeit der beiden Ereignisse wurden die Epizentren auf die gleiche Herdlokation gesetzt (Seismic Solutions 2017). Die ermittelten Epizentren liegen ca. 5 km südwestlich von Dötlingen am Rand eines Gasfeldes. Die Abbildung 19 zeigt das ermittelte Epizentrum des Ereignisses (vgl. Kapitel 3.1.9).

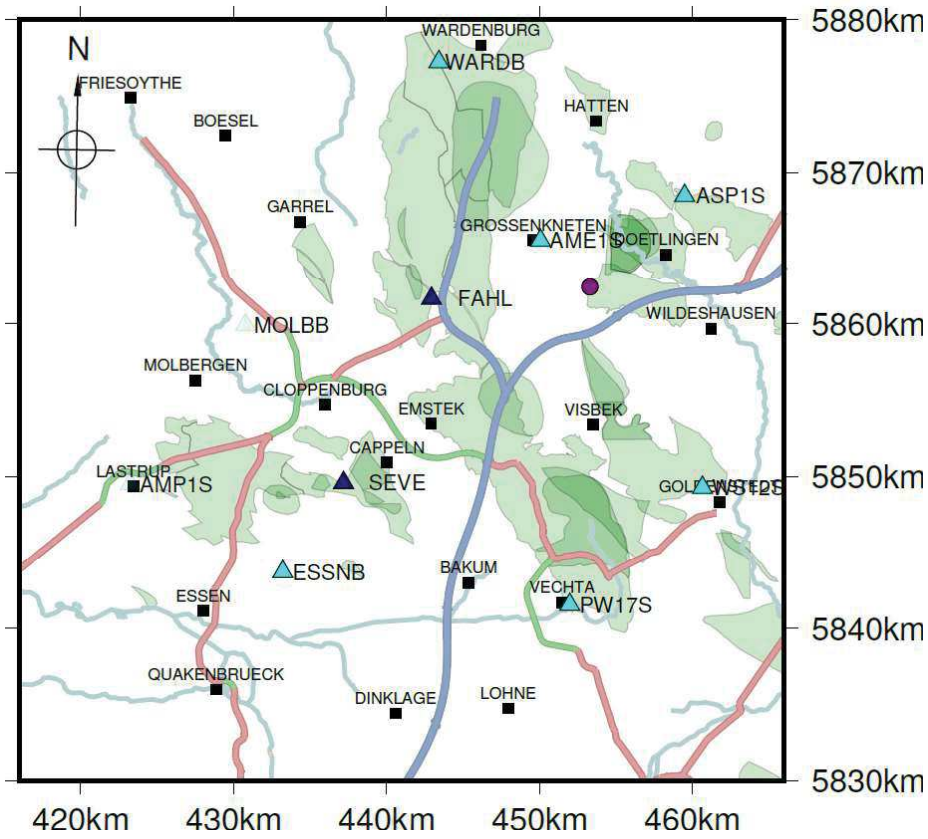


Abbildung 19. Geografische Lage des ermittelten Epizentrums des Ereignisses 11 vom 27.10.2016 (lila Kreis).

3.1.13 Ereignis 12 vom 08.07.2017

Das Ereignis 12 ereignete sich am 08.07.2017 und wurde von der BGR sowie von dem BVEG mit Magnituden zwischen M_L = 2.2 und M_L = 2.3 lokalisiert (siehe Abbildung A1-12 im Anhang). Beide ermittelten Epizentren befinden sich innerhalb eines Gasfeldes ca. 3 km östlich von der Ortschaft Emstek. Für dieses Erdbeben konnten aufgrund der Installation des seismischen Überwachungsnetzes des BVEG in 2013 36 in Deutschland betriebene Stationen gefunden werden, die das Ereignis potentiell registriert haben könnten (siehe Tabelle 2). Von diesen wurden 10 Stationen für eine plausible Lokalisierung mit Residuen von <1.0 s verwendet. Die Abbildung 20 zeigt die zur Verfügung stehenden Stationen, die für die Lokalisierung verwendeten Stationen sowie das ermittelte Epizentrum als geografische Übersicht.

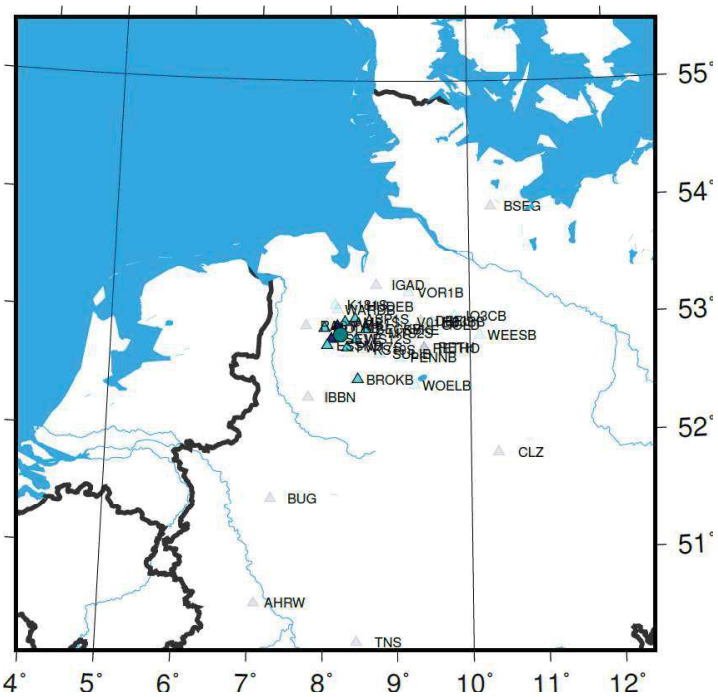


Abbildung 20. Darstellung der für die Lokalisierung des Ereignisses 12 vom 08.07.2017 zur Verfügung stehenden (Dreiecke) und genutzten Stationen (gefüllte Dreiecke) sowie das ermittelte Epizentrum des Ereignisses.

Das Erdbeben mit einer Magnitude von $M_L = 2.2$ und einer Tiefe von 5,3 km wurde vergleichbar zu den bereits vorliegenden Lokalisierungsergebnissen innerhalb eines Gasfelds ca. 3 km östlich von Emstek lokalisiert. Die Abbildung 21 zeigt das ermittelte Epizentrum des Ereignisses sowie die für die Lokalisierung genutzten Stationen.

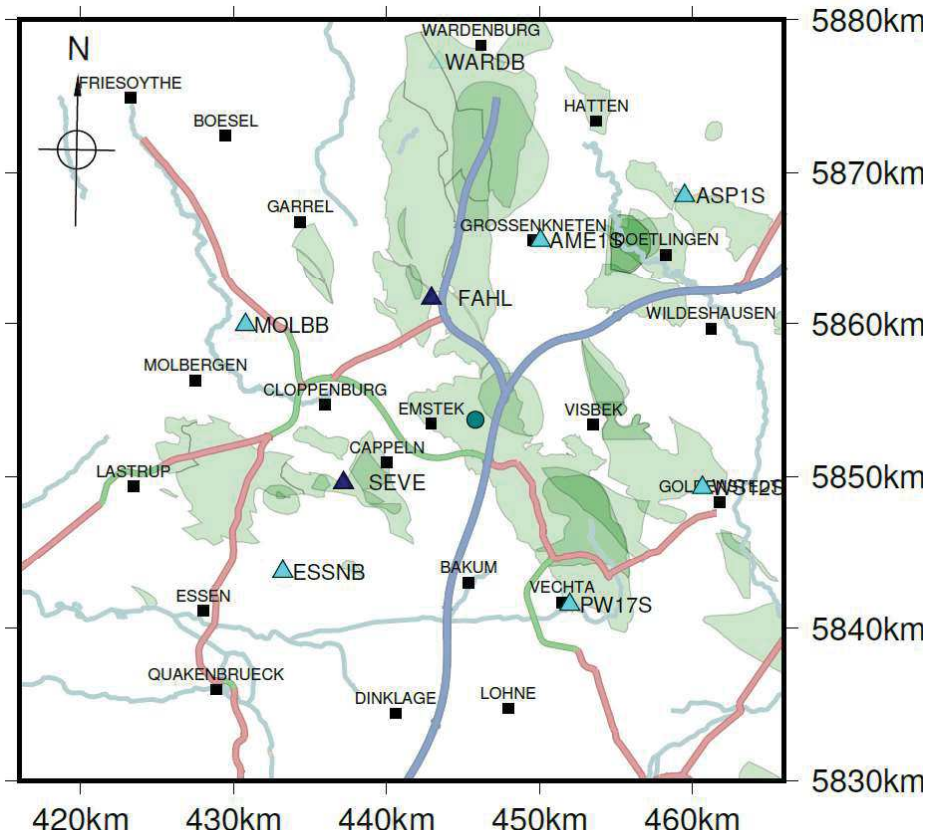


Abbildung 20. Geografische Lage des ermittelten Epizentrums des Ereignisses 12 vom 08.07.2017 (grüner Kreis) sowie die für die Lokalisierung genutzten Stationen (Dreiecke).

3.1.14 Zusammenfassung der Relokalisierungsergebnisse

Von den 12 zu untersuchenden Ereignissen konnten 9 absolut relokalisiert werden. Die Ereignisse 1 vom 07.05.1993, 3 vom 28.03.1999 und 5 vom 17.12.2005 konnten aufgrund der schlechten Datengrundlage nicht plausibel lokalisiert werden. Bei den Ereignissen 2 vom 10.12.1998 und 4 vom 10.09.2002 resultieren die Lokalisierungsergebnisse aufgrund der schlechten Datenbasis in relativ hohen Residuen zwischen den ermittelten und simulierten Einsatzzeiten seismischer Wellenphasen, so dass diese Ergebnisse eine hohe Ungenauigkeit von mehreren Kilometern aufweisen. Die übrigen zu untersuchenden Erdbeben (6-12) konnten dagegen plausibel relokalisiert werden. Dabei wurden die Ereignisse 8 vom 28.07.2014 und 11 vom 27.10.2016 bereits in einer vorgehenden Studie untersucht. Die beiden Epizentren konnten durch individuelle Relokalisierung und Ähnlichkeitsuntersuchungen dem gleichen Herdort zugeordnet werden (Seismic Solutions 2017). Die bisher vorliegenden Lokalisierungsergebnisse sind für die jeweils herangezogene Datenbasis zwar plausibel, doch mit zum Teil erheblichen Unsicherheiten verbunden. Erst die Schaffung der neuen Datenbasis (Einbindung neuer Stationen) erlaubte eine plausible

Relokalisierung der lokalen Erdbeben. Die Abbildung 21 zeigt zusammenfassend die ermittelten Epizentren der untersuchten Erdbeben.

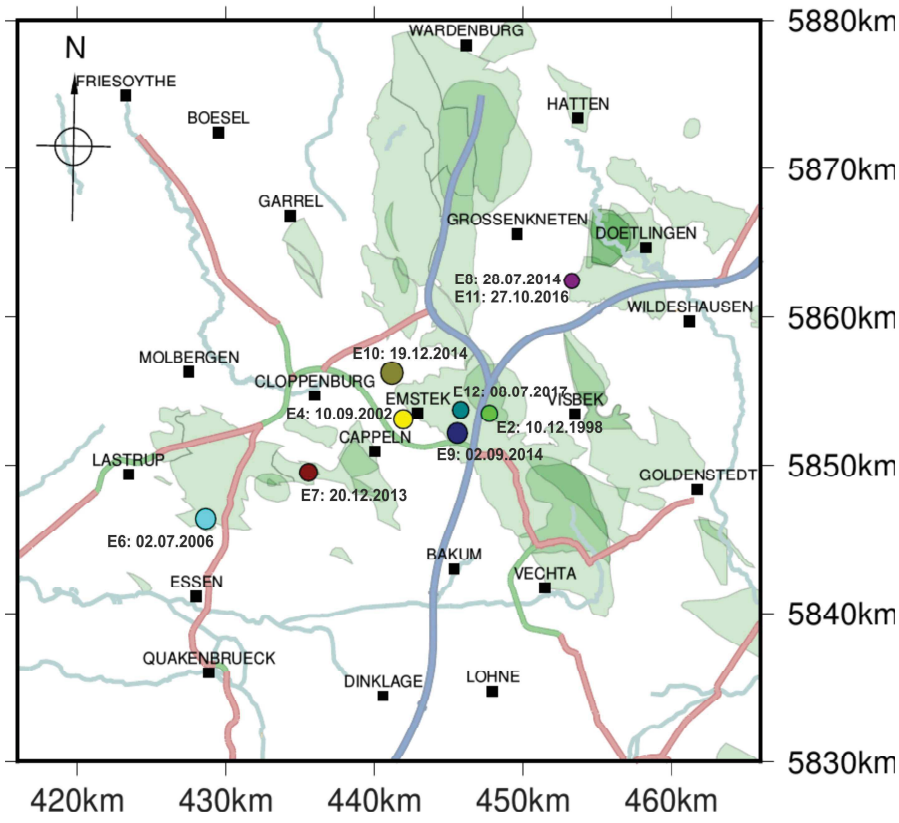


Abbildung 21. Geografische Lage der ermittelten Epizentren der Ereignisse 2 vom 10.12.1998, 4 vom 10.09.2002, 6 vom 02.07.2006, 7 vom 20.12.2013, 8 vom 28.07.2014, 9 vom 02.09.2014, 10 vom 19.12.2014, 11 vom 27.10.2016 und 12 vom 08.07.2017. Die Ereignisse 8 und 11 haben den gleichen Herdort südwestlich von Dötlingen, die Ereignisse 1 vom 07.05.1993, 3 vom 28.03.1999 und 5 vom 17.12.2005 fehlen in der Abbildung, da diese nicht plausibel relokalisiert werden konnten.

Vergleicht man die Ausgangssituation (Abbildung 1) mit den in Abbildung 21 dargestellten Ergebnissen, wird ersichtlich, dass nun alle ermittelten Epizentren innerhalb bzw. am Rand von verschiedenen Gasfeldern liegen. Prinzipiell lassen sich dabei 3 verschiedene Bereiche bzw. Gasfelder unterscheiden: Gasfelder bei Emstek, Gasfelder zwischen Lastrup und Cappeln sowie Gasfelder bei Dötlingen. Im Gegensatz zu den bereits vorliegenden Ergebnissen (vgl. Kapitel 1), konnten keine seismischen Ereignisse in den Gasfeldern zwischen Visbek, Goldenstedt und Vechta ermittelt werden. Allerdings konnten die Ereignisse 1 vom 07.05.1993, 3 vom 28.03.1999 und 5 vom 17.12.2005 nicht plausibel lokalisiert werden und fehlen somit in der bisherigen Diskussion der Ergebnisse. Alle Erdbeben wurden in einer Tiefe zwischen 4,2 und 5,3 km in ungefährer

Teufenlage der lokalen Gasreservoirs lokalisiert, was zusätzlich zu den ermittelten Epizentren darauf hindeutet, dass die Ereignisse im Zusammenhang mit der lokalen Gasproduktion stehen könnten.

Ein Ereignisbulletin, welches die ermittelten Einsatzzeiten von Wellenphasen für alle Erdbeben und alle für die jeweilige Lokalisierung verwendeten seismischen Stationen darstellt, kann dem Anhang A3 entnommen werden.

3.2 Ähnlichkeitsuntersuchungen

Für die Ähnlichkeitsuntersuchungen konnten lediglich drei Stationen (BUG – Bochum Universität, CLZ – Clausthal-Zellerfeld, TNS – Taunus) ermittelt werden, die alle 12 zu untersuchenden Ereignisse registriert haben (siehe Kapitel 2.3, Abbildung 22). Für die Berechnungen der Kreuzkorrelationen wurden die gesamten Seismogramme (60 s Fensterlänge, 1-10 Hz Bandpass gefiltert) aller 12 Ereignisse für die 3 Stationen verwendet. Lediglich für die Ereignisse 2 vom 10.12.1998 und 3 vom 28.03.1999 konnten für die Station CLZ keine für den gewählten Frequenzbereich passenden Daten gefunden werden. Die Abbildung 22 zeigt die für die Kreuzkorrelation verwendeten Stationen sowie das Herdgebiet als geografischen Überblick.

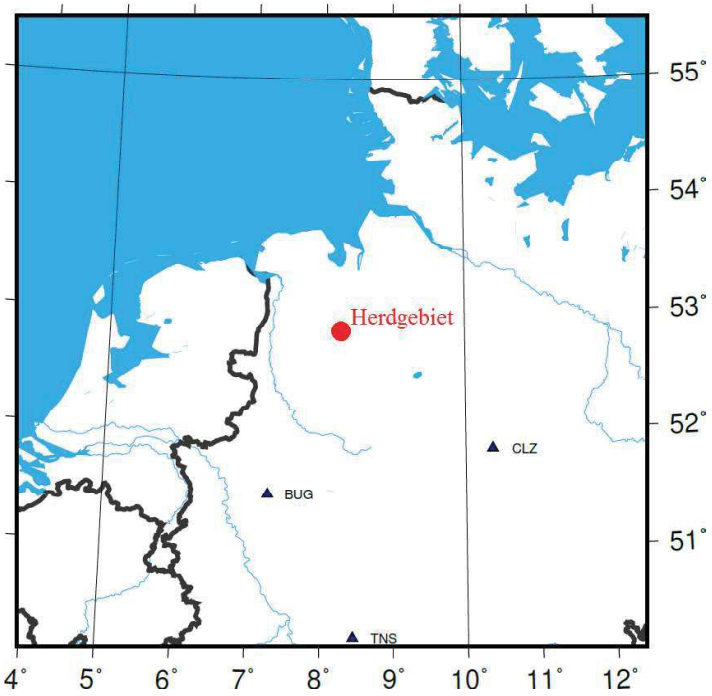


Abbildung 22. Geografische Lage der für die Kreuzkorrelation verwendeten Stationen BUG, CLZ und TNS zum Herdgebiet.

Für alle Ereignispaare wurden mit den genannten Parametern die Kreuzkorrelationskoeffizienten ermittelt. Somit wurden, mit Ausnahme der Station CLZ für die Ereignisse 2 und 3, für jede der drei Stationen 144 Kreuzkorrelationen gerechnet. Die Abbildung 23 zeigt die drei Kreuzkorrelationsmatrizen mit den für jedes Ereignispaar berechneten Kreuzkorrelationskoeffizienten für die Stationen BUG, CLZ und TNS für die 12 zu untersuchenden Ereignisse.

BUG 60s 1-10Hz		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		07.05.1993	10.12.1998	28.03.1999	10.09.2002	17.12.2005	02.07.2006	20.12.2013	28.07.2014	02.09.2014	19.12.2014	27.10.2016	08.07.2017
1	07.05.1993	1.00	0.13	0.17	0.15	0.21	0.42	0.15	0.12	0.19	0.21	0.11	0.23
2	10.12.1998	0.13	1.00	0.15	0.14	0.14	0.13	0.14	0.15	0.75	0.13	0.13	0.14
3	28.03.1999	0.17	0.15	1.00	0.23	0.53	0.13	0.20	0.11	0.15	0.50	0.10	0.74
4	10.09.2002	0.15	0.14	0.23	1.00	0.31	0.16	0.68	0.12	0.14	0.38	0.11	0.24
5	17.12.2005	0.21	0.14	0.53	0.31	1.00	0.17	0.29	0.12	0.14	0.44	0.11	0.60
6	02.07.2006	0.42	0.13	0.13	0.16	0.17	1.00	0.18	0.11	0.13	0.20	0.11	0.13
7	20.12.2013	0.15	0.14	0.20	0.68	0.29	0.18	1.00	0.12	0.14	0.34	0.11	0.22
8	28.07.2014	0.12	0.15	0.11	0.12	0.12	0.11	0.12	1.00	0.13	0.14	0.45	0.13
9	02.09.2014	0.19	0.75	0.15	0.14	0.14	0.13	0.14	0.13	1.00	0.16	0.11	0.17
10	19.12.2014	0.21	0.13	0.50	0.38	0.44	0.20	0.34	0.14	0.16	1.00	0.09	0.50
11	27.10.2016	0.11	0.13	0.10	0.11	0.11	0.11	0.11	0.45	0.11	0.09	1.00	0.11
12	08.07.2017	0.23	0.14	0.74	0.24	0.60	0.13	0.22	0.13	0.17	0.50	0.11	1.00

CLZ 60s 1-10Hz		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		07.05.1993	10.12.1998	28.03.1999	10.09.2002	17.12.2005	02.07.2006	20.12.2013	28.07.2014	02.09.2014	19.12.2014	27.10.2016	08.07.2017
1	07.05.1993	1.00			0.15	0.17	0.55	0.14	0.15	0.18	0.20	0.14	0.18
2	10.12.1998												
3	28.03.1999												
4	10.09.2002	0.15			1.00	0.36	0.16	0.75	0.14	0.17	0.37	0.15	0.31
5	17.12.2005	0.17			0.36	1.00	0.17	0.32	0.13	0.15	0.71	0.13	0.73
6	02.07.2006	0.55			0.16	0.17	1.00	0.11	0.11	0.18	0.15	0.11	0.13
7	20.12.2013	0.14			0.75	0.32	0.11	1.00	0.11	0.14	0.32	0.13	0.32
8	28.07.2014	0.15			0.14	0.13	0.11	0.11	1.00	0.14	0.16	0.86	0.13
9	02.09.2014	0.18			0.17	0.15	0.18	0.14	0.14	1.00	0.16	0.14	0.15
10	19.12.2014	0.20			0.37	0.71	0.15	0.32	0.16	0.16	1.00	0.17	0.71
11	27.10.2016	0.14			0.15	0.13	0.11	0.13	0.86	0.14	0.17	1.00	0.13
12	08.07.2017	0.18			0.31	0.73	0.13	0.32	0.13	0.15	0.71	0.13	1.00

TNS 60s 1-10Hz		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		07.05.1993	10.12.1998	28.03.1999	10.09.2002	17.12.2005	02.07.2006	20.12.2013	28.07.2014	02.09.2014	19.12.2014	27.10.2016	08.07.2017
1	07.05.1993	1.00	0.20	0.17	0.19	0.23	0.60	0.16	0.22	0.20	0.28	0.14	0.19
2	10.12.1998	0.20	1.00	0.19	0.18	0.21	0.24	0.17	0.19	0.86	0.23	0.21	0.20
3	28.03.1999	0.17	0.19	1.00	0.19	0.59	0.15	0.23	0.20	0.25	0.63	0.15	0.74
4	10.09.2002	0.19	0.18	0.19	1.00	0.19	0.14	0.49	0.16	0.23	0.15	0.23	0.25
5	17.12.2005	0.23	0.21	0.59	0.19	1.00	0.21	0.17	0.19	0.21	0.66	0.19	0.62
6	02.07.2006	0.60	0.24	0.15	0.14	0.21	1.00	0.15	0.23	0.21	0.21	0.13	0.16
7	20.12.2013	0.16	0.17	0.23	0.49	0.17	0.15	1.00	0.17	0.22	0.17	0.19	0.25
8	28.07.2014	0.22	0.19	0.20	0.16	0.19	0.23	0.17	1.00	0.28	0.22	0.52	0.20
9	02.09.2014	0.20	0.86	0.25	0.23	0.21	0.21	0.22	0.28	1.00	0.22	0.22	0.20
10	19.12.2014	0.28	0.23	0.63	0.15	0.66	0.21	0.17	0.22	0.22	1.00	0.20	0.59
11	27.10.2016	0.14	0.21	0.15	0.23	0.19	0.13	0.19	0.52	0.22	0.20	1.00	0.19
12	08.07.2017	0.19	0.20	0.74	0.25	0.62	0.16	0.25	0.20	0.20	0.59	0.19	1.00

Abbildung 23. Kreuzkorrelationsmatrizen für die 12 zu untersuchenden Ereignisse an den Stationen BUG (oben), CLZ (Mitte) und TNS (unten). Farblich hervorgehoben sind alle Kreuzkorrelationskoeffizienten > 0.4. Der jeweilige Maximalwert der Kreuzkorrelationskoeffizienten ähnlicher Ereignispaare ist dunkelgrün markiert.

Die in Abbildung 23 dargestellten Kreuzkorrelationsmatrizen sind symmetrisch, d.h. die Einträge sind spiegelsymmetrisch bzgl. der Hauptdiagonalen. Die Werte in den Hauptdiagonalen sind die Kreuzkorrelationskoeffizienten mit dem Wert 1.0, wenn ein Ereignis mit sich selbst verglichen wird. In Abbildung 23 sind alle Kreuzkorrelationskoeffizienten mit einem Wert >0.4 farblich

hervorgehoben. Es ist erkennbar, dass für alle drei Stationen die gleichen Ereignispaare Kreuzkorrelationskoeffizienten >0.4 aufweisen. Betrachtet man die jeweiligen Ereignispaare, wird ersichtlich, dass die berechneten Kreuzkorrelationskoeffizienten pro Ereignispaar unter den drei betrachteten Stationen stark schwanken. Die Werte der Kreuzkorrelationskoeffizienten des Ereignispaares 8-11 schwanken beispielsweise zwischen 0.45 an der Station BUG und 0.86 an der Station TNS. In Abbildung 23 sind daher die Maximalwerte der Kreuzkorrelationskoeffizienten aller drei Stationen in dunkelgrün hervorgehoben.

Anhand der Kreuzkorrelationsanalysen können folgende Ereignispaare mit maximalen Kreuzkorrelationskoeffizienten (CCC_{max}) von > 0.59 als 'sich ähnlich' betrachtet werden, wohingegen sich 'nicht ähnelnde' Ereignisse CCC-Werte von durchschnittlich < 0.2 aufweisen:

- Ereignis 1 vom 07.05.1993 und Ereignis 6 vom 02.07.2006 (CCC_{max} = 0.60 – TNS)
- Ereignis 2 vom 10.12.1998 und Ereignis 9 vom 02.09.2014 (CCC_{max} = 0.86 – TNS)
- Ereignis 3 vom 28.03.1999 und Ereignis 5 vom 17.12.2005 (CCC_{max} = 0.59 – TNS)
- Ereignis 3 vom 28.03.1999 und Ereignis 10 vom 19.12.2014 (CCC_{max} = 0.63 – TNS)
- Ereignis 3 vom 28.03.1999 und Ereignis 12 vom 08.07.2017 (CCC_{max} = 0.74 – TNS, CLZ)
- Ereignis 4 vom 10.09.2002 und Ereignis 7 vom 20.12.2013 (CCC_{max} = 0.75 – CLZ)
- Ereignis 5 vom 17.12.2005 und Ereignis 10 vom 19.12.2014 (CCC_{max} = 0.71 – TNS)
- Ereignis 5 vom 17.12.2005 und Ereignis 12 vom 08.07.2017 (CCC_{max} = 0.73 – TNS)
- Ereignis 8 vom 28.07.2014 und Ereignis 11 vom 27.10.2016 (CCC_{max} = 0.86 – CLZ)
- Ereignis 10 vom 19.12.2014 und Ereignis 12 vom 08.07.2017 (CCC_{max} = 0.71 – CLZ)

Betrachtet man die gelisteten Ereignispaare zusammen, so lassen sich folgende Ereigniscluster definieren:

- Cluster 1: Ereignisse 1 vom 07.05.1993 und 6 vom 02.07.2006
- Cluster 2: Ereignisse 2 vom 10.12.1998 und 9 vom 02.09.2014
- Cluster 3: Ereignisse 4 vom 10.09.2002 und 7 vom 20.12.2013
- Cluster 4: Ereignisse 8 vom 28.07.2014 und 11 vom 27.10.2016
- Cluster 5: Ereignisse 3 vom 28.03.1999, 5 vom 17.12.2005, 10 vom 19.12.2014 und 12 vom 08.07.2017

Bei Cluster 1 konnte das Ereignis 1 nicht plausibel absolut relokalisiert werden. Aufgrund der hohen Ähnlichkeit des Ereignisses 1 zu Ereignis 6 kann der Herdort des Ereignisses 1 dem des

Ereignisses 6 zugeordnet werden. Die Abbildung 24 zeigt die räumliche Zuordnung der beiden Ereignisse anhand der Ergebnisse der Absolutlokalisierung (Ereignis 6) und der Ergebnisse der Ähnlichkeitsuntersuchungen.

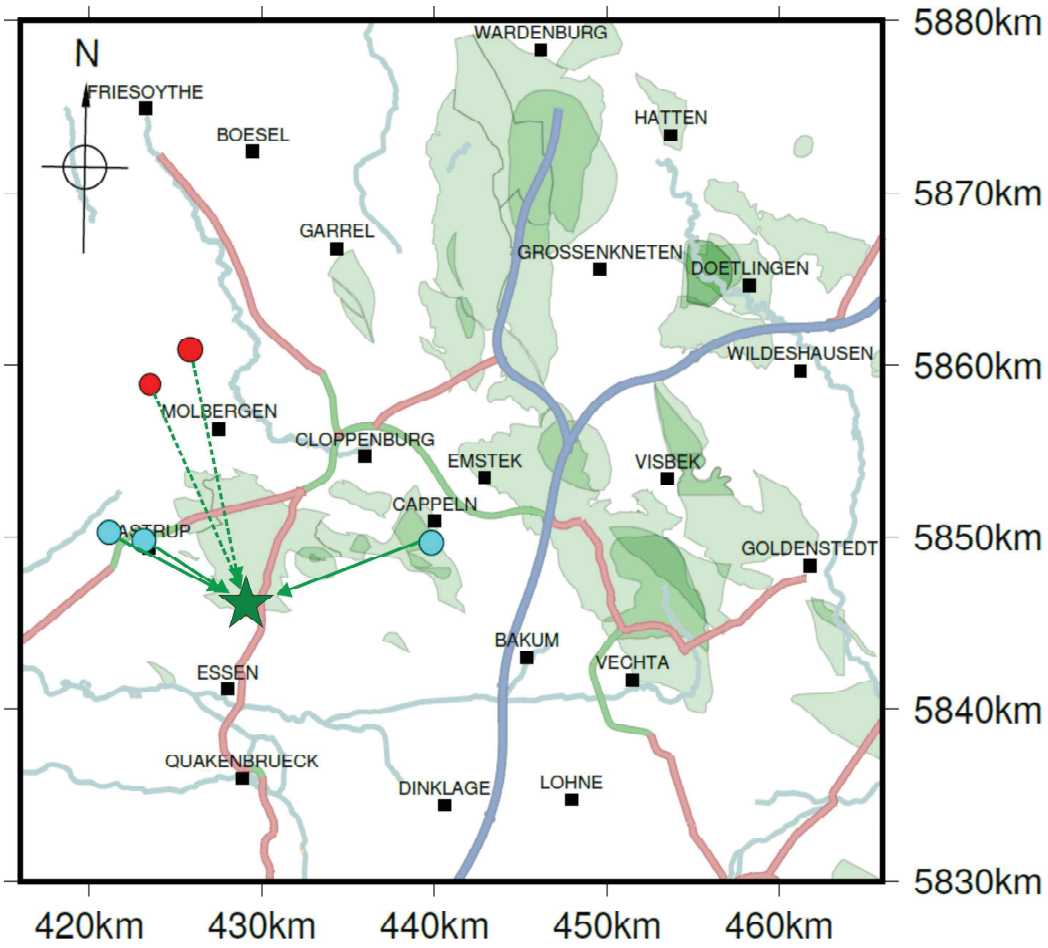


Abbildung 24. Cluster 1: Räumliche Zuordnung der Ereignisse 1 vom 07.05.1993 und 6 vom 02.07.2006 am gleichen Herdort anhand der Ergebnisse der Absolutlokalisierung (Ereignis 6) und der Ähnlichkeitsuntersuchungen. Das Ergebnis der Absolutlokalisierung ist mit durchgezogenen grünen Pfeilen, das der Zuordnung anhand des CCC-Ergebnisses mit gestrichelten, grünen Pfeilen dargestellt. Der grüne Stern markiert die Lage der beiden Ereignisse.

Bei Cluster 2 konnte das Ereignis 2 nur mit größerer Unsicherheit absolut relokalisiert werden. Aufgrund der hohen Ähnlichkeit des Ereignisses 2 zu Ereignis 9 kann der Herdort des Ereignisses 2 dem des Ereignisses 9 zugeordnet werden. Die Abbildung 25 zeigt die räumliche Zuordnung der beiden Ereignisse anhand der Ergebnisse der Absolutlokalisierung und der Ergebnisse der Ähnlichkeitsuntersuchungen.

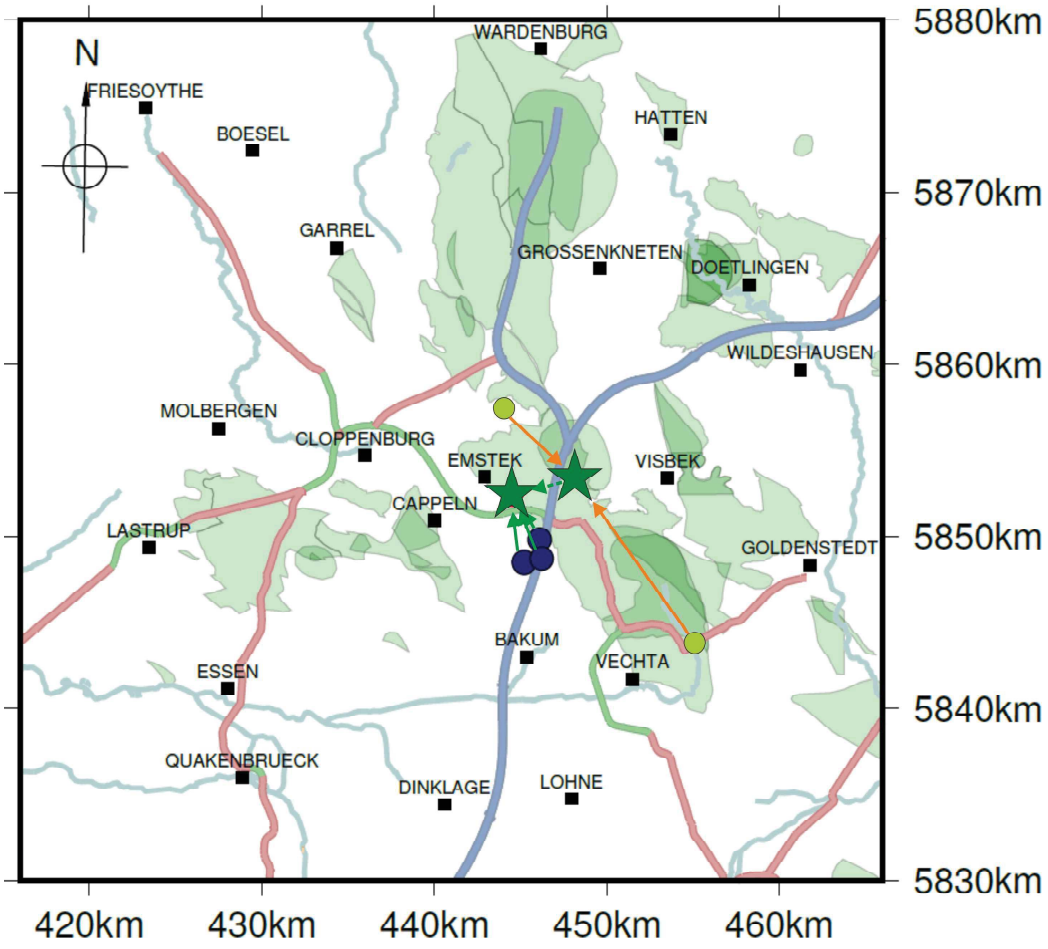


Abbildung 25. Cluster 2: Räumliche Zuordnung der Ereignisse 2 vom 10.12.1998 und 9 vom 02.09.2014 am gleichen Herdort anhand der Ergebnisse der Absolutlokalisierung und der Ähnlichkeits-untersuchungen. Das Ergebnis der Absolutlokalisierung ist mit durchgezogenen Pfeilen, das der Zuordnung anhand des CCC-Ergebnisses mit gestrichelten, grünen Pfeilen dargestellt. Der westliche grüne Stern markiert die Lage der beiden Ereignisse.

Bei Cluster 3 konnte das Ereignis 4 nur mit größerer Unsicherheit absolut relokalisiert werden. Aufgrund der hohen Ähnlichkeit des Ereignisses 4 zu Ereignis 7 kann der Herdort des Ereignisses 4 dem des Ereignisses 7 zugeordnet werden. Die Abbildung 26 zeigt die räumliche Zuordnung der beiden Ereignisse anhand der Ergebnisse der Absolutlokalisierung und der Ergebnisse der Ähnlichkeitsuntersuchungen.

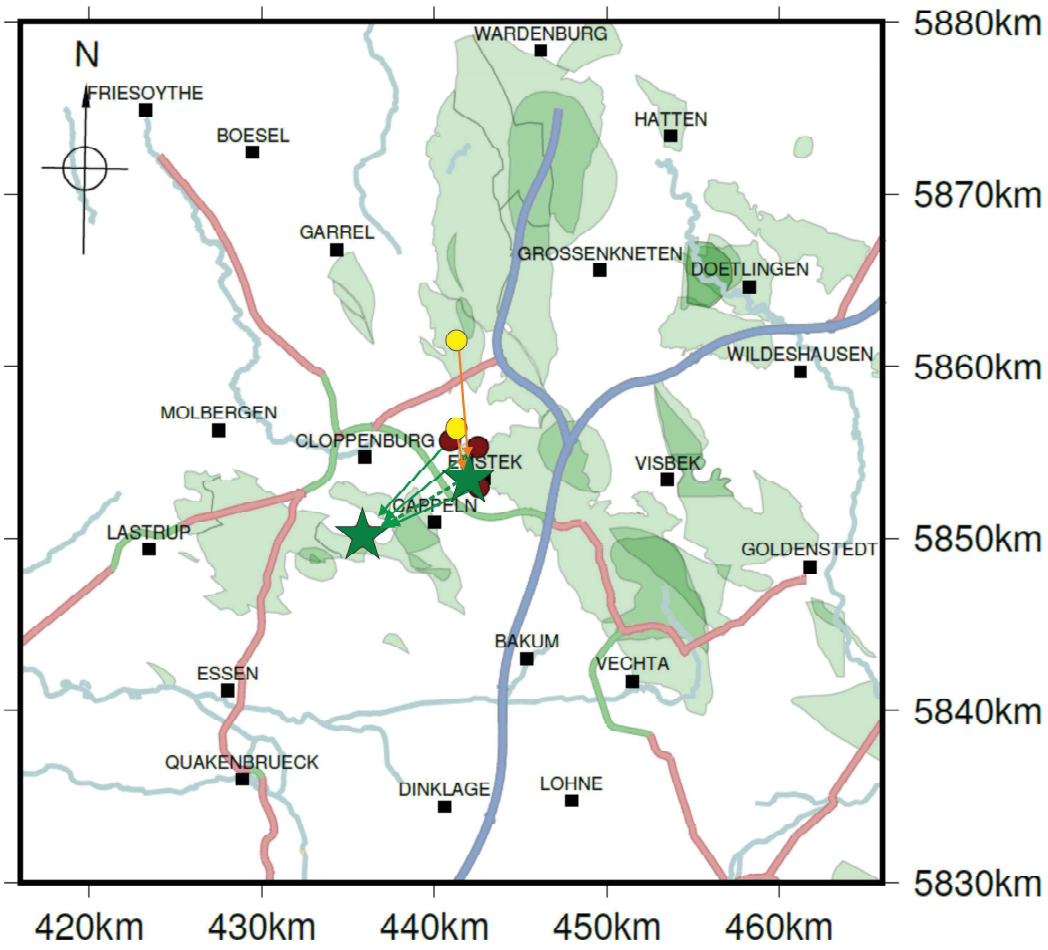


Abbildung 26. Cluster 3: Räumliche Zuordnung der Ereignisse 4 vom 10.09.2002 und 7 vom 20.12.2013 am gleichen Herdort anhand der Ergebnisse der Absolutlokalisierung und der Ähnlichkeits-untersuchungen. Das Ergebnis der Absolutlokalisierung ist mit durchgezogenen Pfeilen, das der Zuordnung anhand des CCC-Ergebnisses mit gestrichelten, grünen Pfeilen dargestellt. Der westliche grüne Stern markiert die Lage der beiden Ereignisse.

Bei Cluster 4 konnten die beiden Ereignisse plausibel absolut, am gleichen Herdort, relokalisiert werden. Die hohe Ähnlichkeit der beiden Ereignisse zueinander stützt die Lokalisierungsergebnisse. Die Abbildung 27 zeigt die räumliche Zuordnung der beiden Ereignisse anhand der Ergebnisse der Absolutlokalisierung und der Ergebnisse der Ähnlichkeitsuntersuchungen.

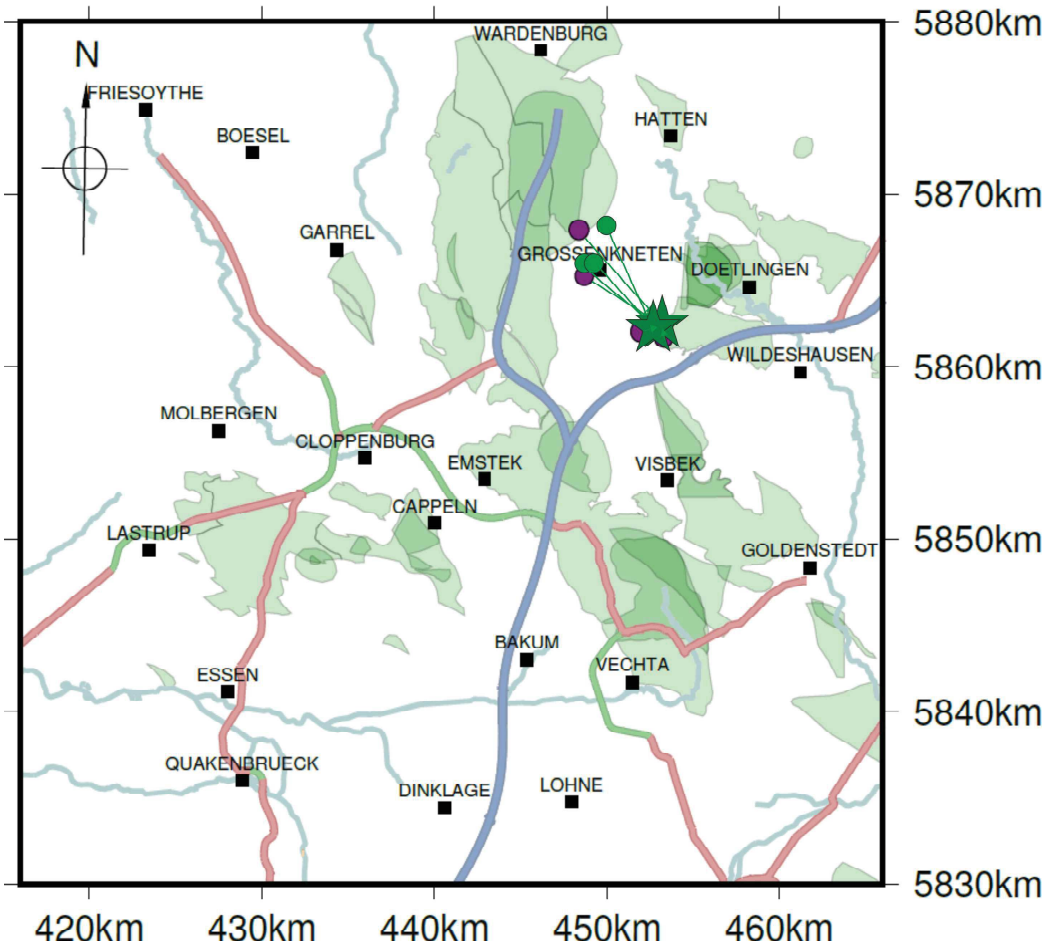


Abbildung 27. Cluster 4: Räumliche Zuordnung der Ereignisse 8 vom 28.07.2014 und 11 vom 27.10.2016 am gleichen Herdort anhand der Ergebnisse der Absolutlokalisierung und der Ähnlichkeits-untersuchungen. Das Ergebnis der Absolutlokalisierung ist mit durchgezogenen Pfeilen, das der Zuordnung anhand des CCC-Ergebnisses mit gestrichelten, grünen Pfeilen dargestellt. Die grünen Sterne markieren die Lage der beiden Ereignisse in unmittelbarer Nähe zueinander.

Bei Cluster 5 konnten, im Gegensatz zu den Ereignissen 10 und 12, die Ereignisse 3 und 5 nicht plausibel absolut relokalisiert werden. Die ermittelten Herdorte der Ereignisse 10 und 12 liegen in unmittelbarer Nähe zueinander. Aufgrund der hohen Ähnlichkeit der vier Ereignisse untereinander können die Herdorte der Ereignisse 3 und 5 plausibel denen der Ereignisse 10 und 12 zugeordnet werden. Die Abbildung 28 zeigt die räumliche Zuordnung der vier Ereignisse anhand der Ergebnisse der Absolutlokalisierung und der Ergebnisse der Ähnlichkeitsuntersuchungen.

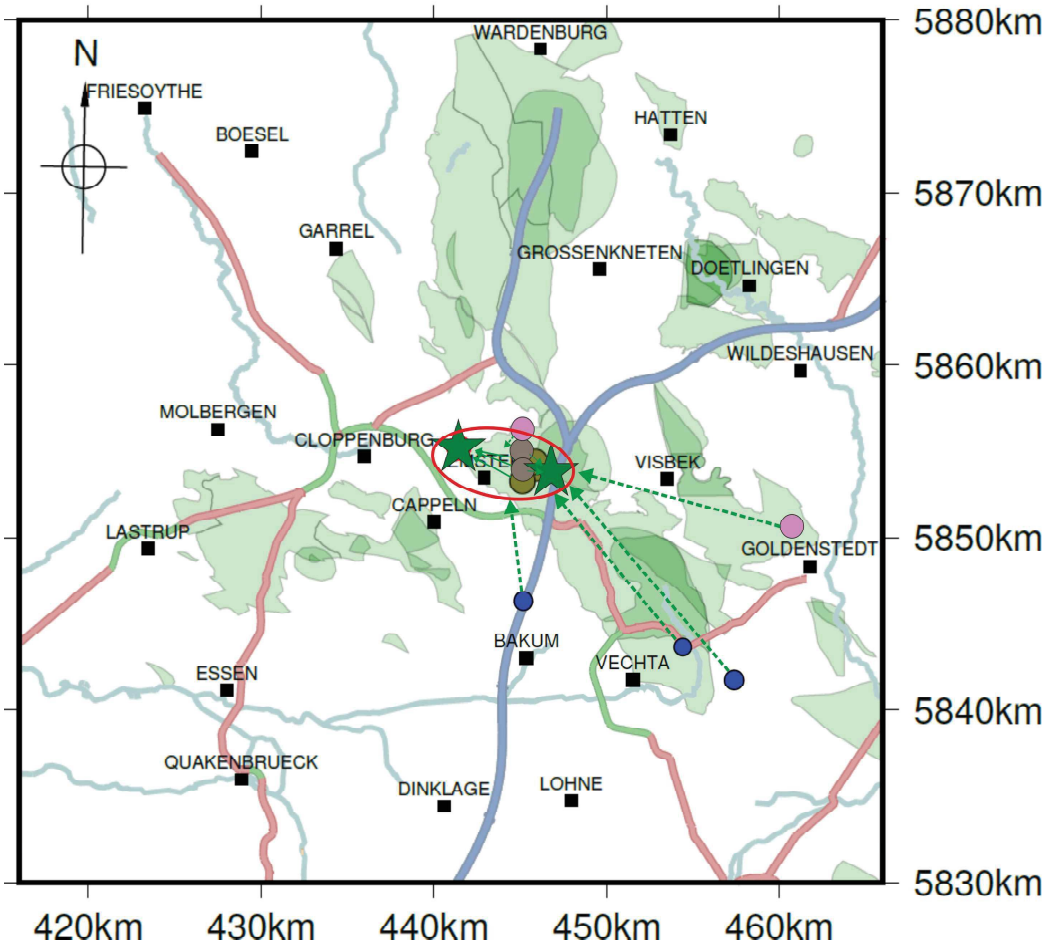


Abbildung 28. Cluster 5: Räumliche Zuordnung der Ereignisse 3 vom 28.03.1999, 5 vom 17.12.2005, 10 vom 19.12.2014 und 12 vom 08.07.2017 an zwei sich in der Nähe befindlichen Herdorten anhand der Ergebnisse der Absolutlokalisierung und der Ähnlichkeitsuntersuchungen. Das Ergebnis der Absolutlokalisierung ist mit durchgezogenen Pfeilen, das der Zuordnung anhand des CCC-Ergebnisses mit gestrichelten, grünen Pfeilen dargestellt. Die grünen Sterne markieren die Lage der beiden Herdorte in unmittelbarer Nähe zueinander.

Die Ergebnisse der Ähnlichkeitsuntersuchungen zeigen plausibel, dass sich einzelne der 12 untersuchten Ereignisse zu anderen Ereignissen zuordnen und somit räumlich clustern lassen. Mit Hilfe des Verfahrens der Kreuzkorrelation konnten fünf räumliche Cluster ermittelt werden: Cluster 1 am Rand eines Gasreservoirs wenige Kilometer südöstlich von Lastrup, Cluster 2 am Rand eines Gasreservoirs wenige Kilometer östlich von Cappeln, Cluster 3 am Rand eines Gasreservoirs wenige Kilometer südwestlich von Cappeln, Cluster 4 am Rand eines Gasreservoirs wenige Kilometer südwestlich von Dötlingen und Cluster 5 am Rand eines Gasreservoirs bei Emstek. Die Abbildung 29 zeigt die geografische Lage der fünf ermittelten Cluster.

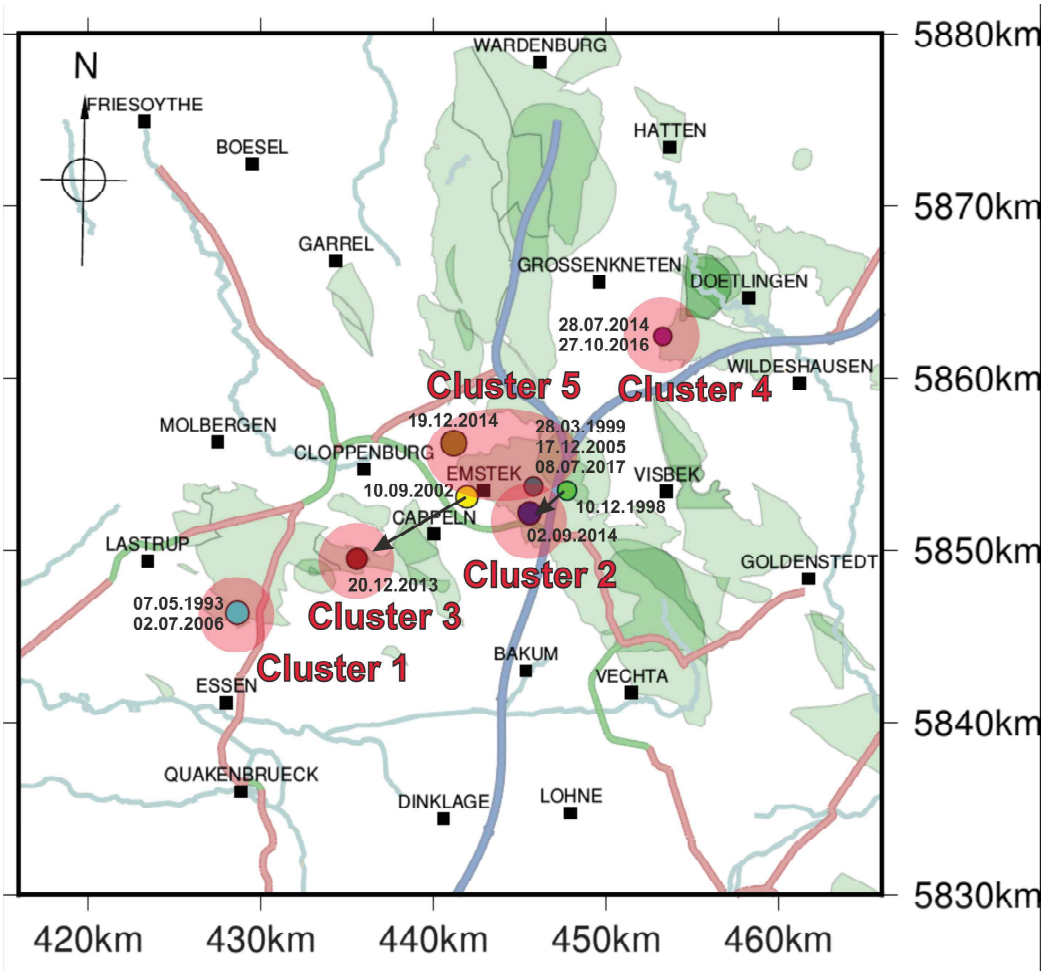


Abbildung 29. Räumliche Lage der fünf ermittelten räumlichen Ereigniscluster sowie die Epizentren der relokalisierten Ereignisse (vgl. Abbildung 21): Gasfelder sind in grün markiert, Clusterbereiche von ähnlichen Erdbeben in hellrot. Die beiden, mit großer Unsicherheit georteten, Beben am 10.12.1998 und 10.09.2002 werden aufgrund ihrer jeweiligen Ähnlichkeit zu Cluster 2 bzw. Cluster 3 zugeordnet.

Bei dem Cluster 3 (Ereignisse 4 vom 10.09.2002 und 7 vom 20.12.2013) ist es erwähnenswert, dass sich die Epizentren der externen Lokalisierungsergebnisse des Ereignisses 7 bei Emstek häufen und das Epizentrum des Ereignisses 4 ebenso bei Emstek ermittelt wurde. Das Ergebnis der Relokalisierung des Ereignisses 7 deutet aber aus unserer Sicht auf eine Lösung südwestlich von Emstek, so dass dort der Ort des Clusters liegen dürfte. Darüber hinaus ähneln sich die Ereignisse des Clusters 3 nicht mit den Ereignissen des Cluster 5, deren Ort plausibel bei Emstek zu sein scheint.

3.3 Ereignisdetektion mit definierten Ereignismustern

Da die Untersuchungen zur Ähnlichkeit der Ereignisse untereinander nur mit entfernten Stationen (BUG, CLZ und TNS) durchgeführt werden konnten, wurden diese Stationen nicht für eine Ereignisdetektion mit definierten Ereignismustern herangezogen. Die jeweils zu erwartenden Vor- bzw. Nachbeben für die untersuchten Ereignisse dürften mindestens eine Magnitude unter dem jeweiligen Hauptbeben liegen. Diese hatten ein relativ geringes Signal-Rausch-Verhältnis an den entfernten Stationen, so dass nicht erwartet werden kann, an diesen Stationen noch schwächere Ereignisse zu finden. Daher wurden die Stationen FAHL (Ahlhorn, in Betrieb seit 15.12.2014) und IBBN (Ibbenbüren, in Betrieb seit 07.12.1999) herangezogen. Die Stationen befinden sich in ca. 5 km (FAHL) bzw. 65 km Entfernung (IBBN) zum Untersuchungsgebiet. An der Station IBBN wurden 9 (ab Ereignis 4 vom 10.09.2002), an der Station FAHL lediglich 3 (ab Ereignis 10 vom 19.12.2014) der 12 zu untersuchenden Ereignisse registriert. Aufgrund der ermittelten Ähnlichkeiten (siehe Kapitel 3.2) können aber somit an der Station IBBN alle Ereigniscluster (Cluster 1-5) und an der Station FAHL die Cluster 4 und 5 untersucht werden.

Es wurden von beiden Stationen die kontinuierlich registrierten seismischen Daten herangezogen, um zum einen die an der jeweiligen Station registrierten Ereignisse als Muster zu identifizieren und um zum zweiten in den kontinuierlichen Daten mit Hilfe der Kreuzkorrelation schwächere Ereignisse zu finden. Hierfür wurden die gleichen Parameter wie die Ähnlichkeitsuntersuchungen verwendet (siehe Kapitel 3.2). Mit einer definierten Schwelle des Kreuzkorrelationskoeffizienten von CCC = 0.5 konnte kein einziges, neues Ereignis gefunden werden, welches einem der 12 untersuchten Ereignisse ähnelt. Es ist bemerkenswert, aber nicht überraschend, dass keine weiteren (schwächeren) Ereignisse mit Hilfe der Kreuzkorrelation gefunden werden konnten. Auch eine Erhöhung der lokalen Detektionsempfindlichkeit durch die Installation einer Vielzahl neuer Stationen in den letzten Jahren hat nicht zu geführt, dass schwächere Ereignisse ($M_L < 2.0$) erfasst wurden. Es scheint eine Magnitudenschwelle zu geben, unter der keine schwächeren Erdbeben, sondern nur Ereignisse mit Magnituden zwischen ungefähr $M_L = 2.0$ und $M_L = 3.0$ auftreten.

4. Zusammenfassung

Die *Seismic Solutions GbR* wurde von der *ExxonMobil Production Deutschland GmbH* beauftragt, die in der Vergangenheit im Raum Cloppenburg, Niedersachsen, aufgetretene Seismizität neu zu bewerten. Seit 1993 traten in dem Gebiet 12 seismische Ereignisse mit Lokalmagnituden bis zu M_L=3.1 auf. Das stärkste Erdbeben ereignete sich am 19.12.2014 in der Region bei Emstek (Bischoff et al. 2015). Insgesamt lagen für diese 12 Ereignisse 33 unterschiedliche plausible Lokalisierungsergebnisse von verschiedenen Behörden und Institutionen vor, die aber aufgrund der dürftigen Datenbasis mit zum Teil hohen Unsicherheiten verbunden sind und keine eindeutige Interpretation zulassen.

Die Untersuchungen zur Neubewertung der lokalen Seismizität umfassten im Wesentlichen:

- Schaffung einer vollständigen Datenbasis
- neue Absolutlokalisierung der Einzelereignisse
- Untersuchung der Ähnlichkeit der seismischen Ereignisse untereinander mit Hilfe von Kreuzkorrelationsverfahren
- Screenen kontinuierlich registrierter Daten mit den Ereignismustern an ausgewählten Stationen

Mit Hilfe der neu geschaffenen Datenbasis, für die seismische Daten von insgesamt 59 Stationen implementiert werden konnten, wurde versucht, alle 12 Ereignisse neu absolut zu lokalisieren. Von den 12 Ereignissen konnten 7 Ereignisse plausibel (P-Residuen < 1.0 s) am Rand von verschiedenen Gasreservoirs neu lokalisiert werden. Die Lokalisierungsergebnisse von 2 Ereignissen zeigen eine große Ungenauigkeit (P-Residuen > 6.0 s), 3 Ereignisse konnten nicht plausibel lokalisiert werden. Alle lokalisierten Erdbeben liegen in einem Tiefenbereich zwischen 4.2 bis 5.3 km, in ungefährer Tiefenlage der Gasreservoirs.

Mit Hilfe von Kreuzkorrelationsverfahren wurde die Ähnlichkeit der Ereignisse untereinander untersucht und festgestellt, dass sich die einzelnen Ereignisse 5 räumlichen Clustern zuordnen lassen. Die ermittelten Kreuzkorrelationskoeffizienten von Ereignissen, die als sich ähnlich interpretiert wurden, lagen mit Werten von CCC > 0.58 ungefähr Faktor 3 über den von Ereignispaaren, die sich nicht ähneln. Dabei konnten die Ereignisse, die entweder nicht bzw. nur mit größerer Ungenauigkeit absolut lokalisiert wurden, plausibel Ereignissen zugeordnet werden, die mit hoher Genauigkeit lokalisiert werden konnten. Ereigniscluster 1 befindet sich am Rand eines Gasreservoirs wenige Kilometer südöstlich von Lastrup, Cluster 2 am Rand eines Gasreservoirs wenige Kilometer östlich von Cappeln, Cluster 3 am Rand eines Gasreservoirs wenige Kilometer südwestlich von Cappeln, Cluster 4 am Rand eines Gasreservoirs wenige Kilometer südwestlich

von Dötlingen und Cluster 5 am Rand eines Gasreservoirs bei Emstek (siehe Abbildung 29). Durch die Clusterung konnten auch Erdbeben, deren Tiefenbestimmung bisher unsicher war bzw. deren Ereignistiefe manuell gesetzt wurde, den Gashorizonten zugeordnet werden. Die Clusterung deutet auf eine kurzfristige, wiederholte seismische Aktivierung hin, was allgemein typisch für durch Gasproduktion induzierte Erdbeben ist.

Mit Hilfe der definierten Ereigniscluster wurde versucht, mittels des Kreuzkorrelationsverfahrens schwächere Ereignisse in kontinuierlich registrierten Daten zu finden. Hierfür konnten aufgrund der ermittelten Cluster Stationen in geringerer Herddistanz genutzt werden als für die Untersuchung der Ereignisähnlichkeiten. Es konnten allerdings keine neuen Ereignisse geringerer Magnitude ermittelt werden. Der nachgewiesene Mangel schwacher Erdbeben ($M_L < 2.0$) ist bemerkenswert und teilweise aus aktuellen Studien mit hochauflösender seismischer Überwachung der Gasfelder Söhlingen und Hemsbünde bekannt (Joswig et al. 2017).

Aufgrund der vorliegenden Untersuchungen liegt nun zum einen eine vollständige Daten- als auch eine Erkenntnisbasis vor, mit deren Hilfe auch künftig auftretende Ereignisse plausibel einem Ereigniscluster und somit konkret einer seismisch aktiven Region zugeordnet werden können. Darüber hinaus könnte die Güte der ermittelten Lokationen der Erdbeben bzw. die der ermittelten Cluster mit Hilfe von Relativ-Lokalisierungsverfahren (Master-Slave-Events) noch verbessert werden.

5. Referenzen

Bischoff, M., Bönnemann, C., Ceranna, L., Fritz, J., Gestermann, N., Pasternak, M. & Plenefisch, T. 2015. Kurzbericht zum Erdbeben bei Emstek (Landkreis Cloppenburg) am 19.12.2014. Veröffentlichung vom Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Hannover. (Download unter: www.lbeg.niedersachsen.de/erdbebendienst)

Dahm, T., Krüger, F., Stammler, K., Klinge, K., Kind, R., Wylegalla, K., Grasso, J.-R. 2007: The 2004 Mw 4.4 Rotenburg, Northern Germany, earthquake and its possible relationship with gas recovery. Bulletin of the Seismological Society of America 97, pp. 691-704.

DMT. 2015. Jahresbericht Seismisches Messnetz-Norddeutschland. Berichtszeitraum 01-12/2014.

DMT. 2016. Jahresbericht Seismisches Messnetz-Norddeutschland. Berichtszeitraum 01-12/2015.

DMT. 2017. Jahresbericht Seismisches Messnetz-Norddeutschland. Berichtszeitraum 01-12/2017.

Gestermann, N. 2017. Erdbeben am 28.3.1999 im Bereich des Erdgasfeldes Goldenstedt/Visvek. Kurzbericht vom 15.9.2017.

Jones, I.F., Davison, I. 2014. Seismic imaging in and around salt bodies. Extended abstract in: Annual meeting of the Society of Exploration Geophysicists, 26-31 October 2014, Denver, Colorado, USA.

Joswig, M. 2008. Nanoseismic Monitoring fills the gap between microseismic networks and passive seismic. *First Break,* 26 (6), 121–128.

Joswig, M., Mokelke, G., Häfner, R., Heinrich, Z., Kolß, S., Sick, B.Walter, M. 2017. Rezente Seismizität im Raum Rothenburg-Resümee und Perspektiven. DGMK/ÖGEW Frühjahstagung, 5.-6.April 2017, Celle.

Seismic Solutions. 2017. Neubewertung der lokalen Seismizität bei Dötlingen, Niedersachsen.

Uta, P. 2017. Recent Intraplate Earthquakes in Northwest Germany – Glacial Isostatic Adjustment and/or a Consequence of Hydrocarbon Production?. Dissertation an der naturwissenschaftlichen Fakultät der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

Online-Ereignisbulletins

Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG):

https://www.lbeg.niedersachsen.de/erdbebendienst/erdbebenaktuelles/niedersaechsischer-erdbebendienst-ned-128713.html

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR):

https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Erdbeben-Gefaehrdungsanalysen/Seismologie/Seismologie/Erdbebenauswertung/D_seit_1968/d_1968_node.html

Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V. (BVEG):

http://www.seis-info.de/

Anhang 1 – Epizentren der Einzelereignisse (externe Bulletins)

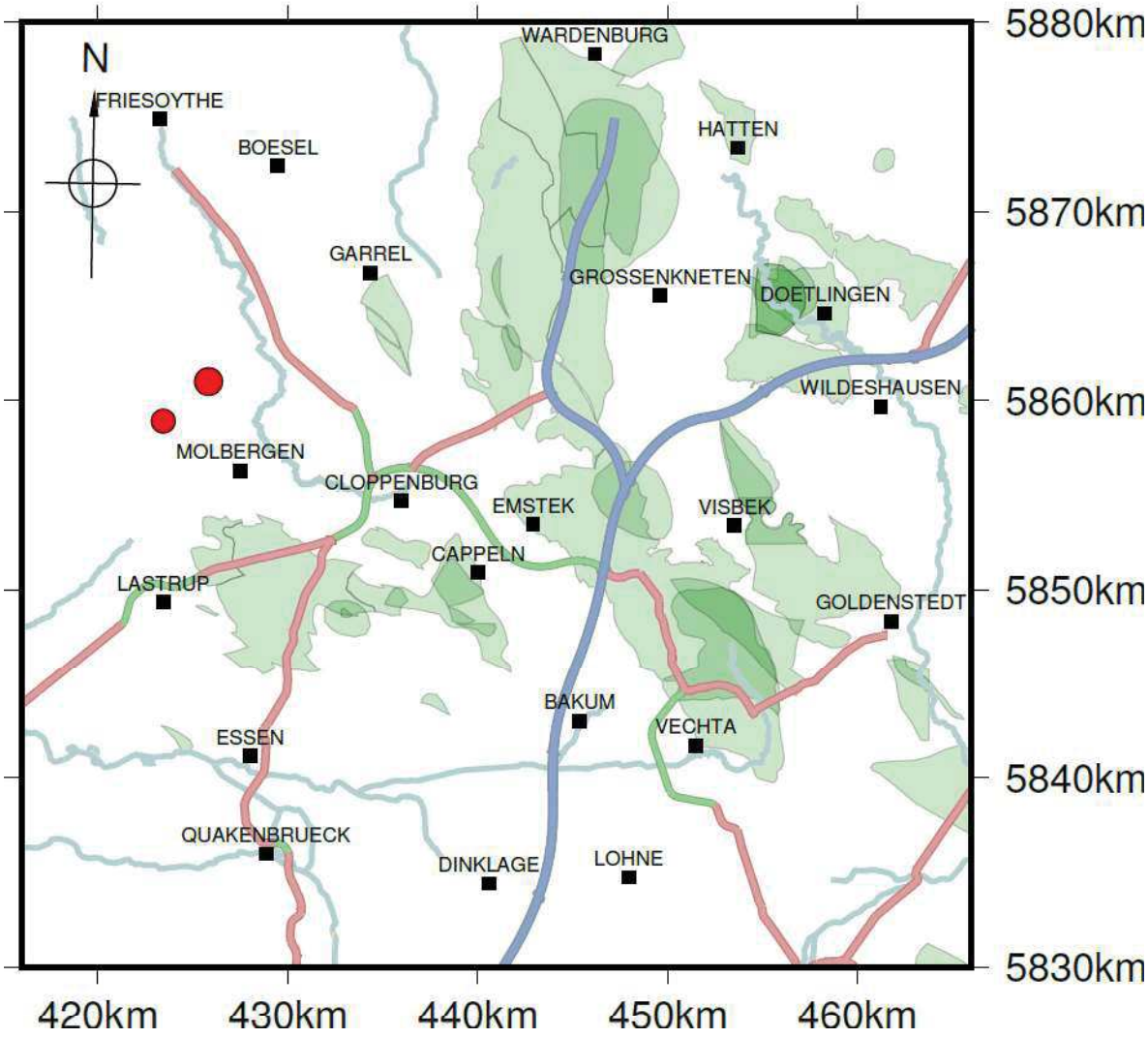


Abbildung A1-1. Geografische Darstellung der in Tabelle 1 gelisteten Epizentren des Ereignisses 1 vom 07.05.1993.

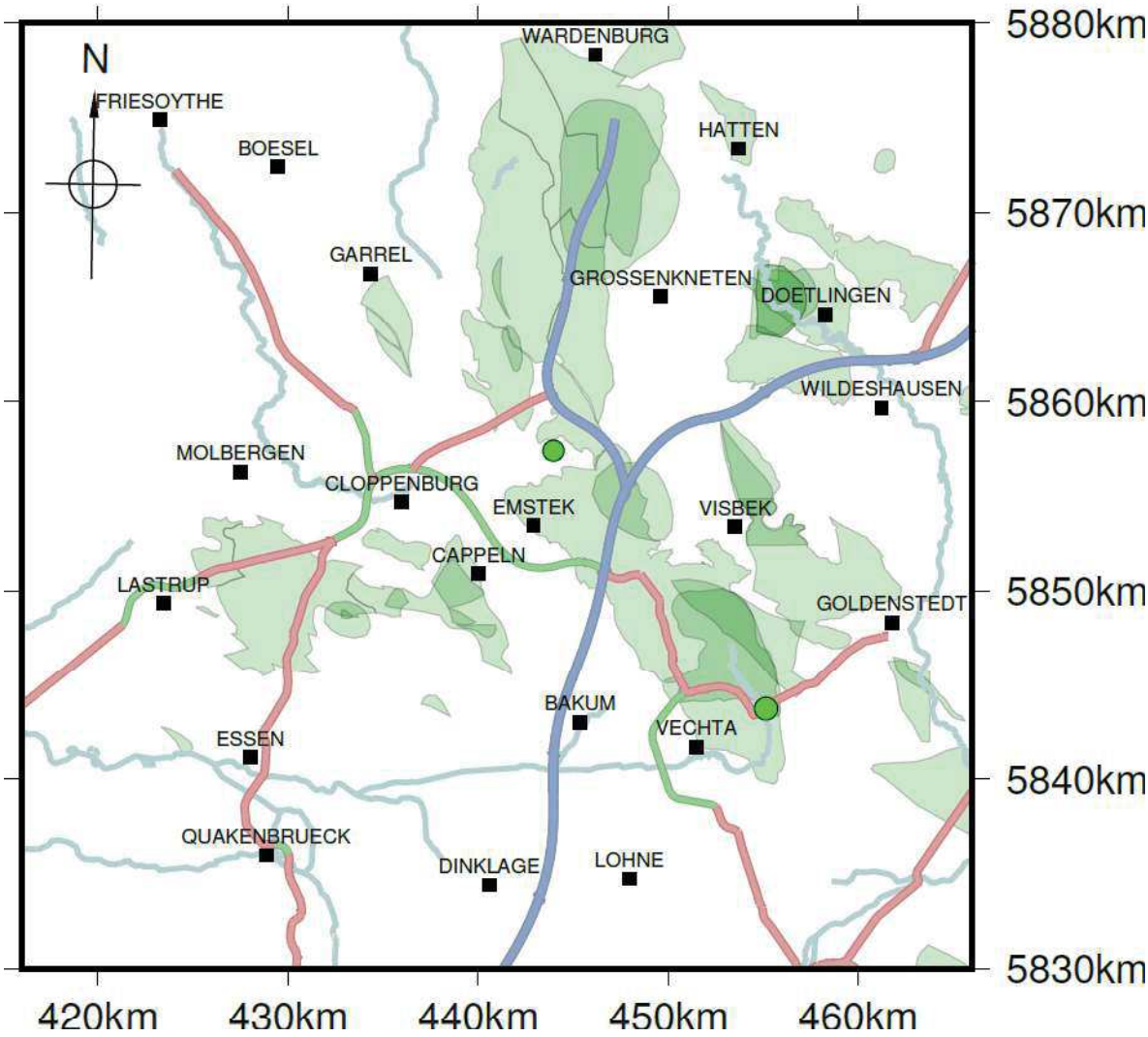


Abbildung A1-2. Geografische Darstellung der in Tabelle 1 gelisteten Epizentren des Ereignisses 2 vom 10.12.1998.

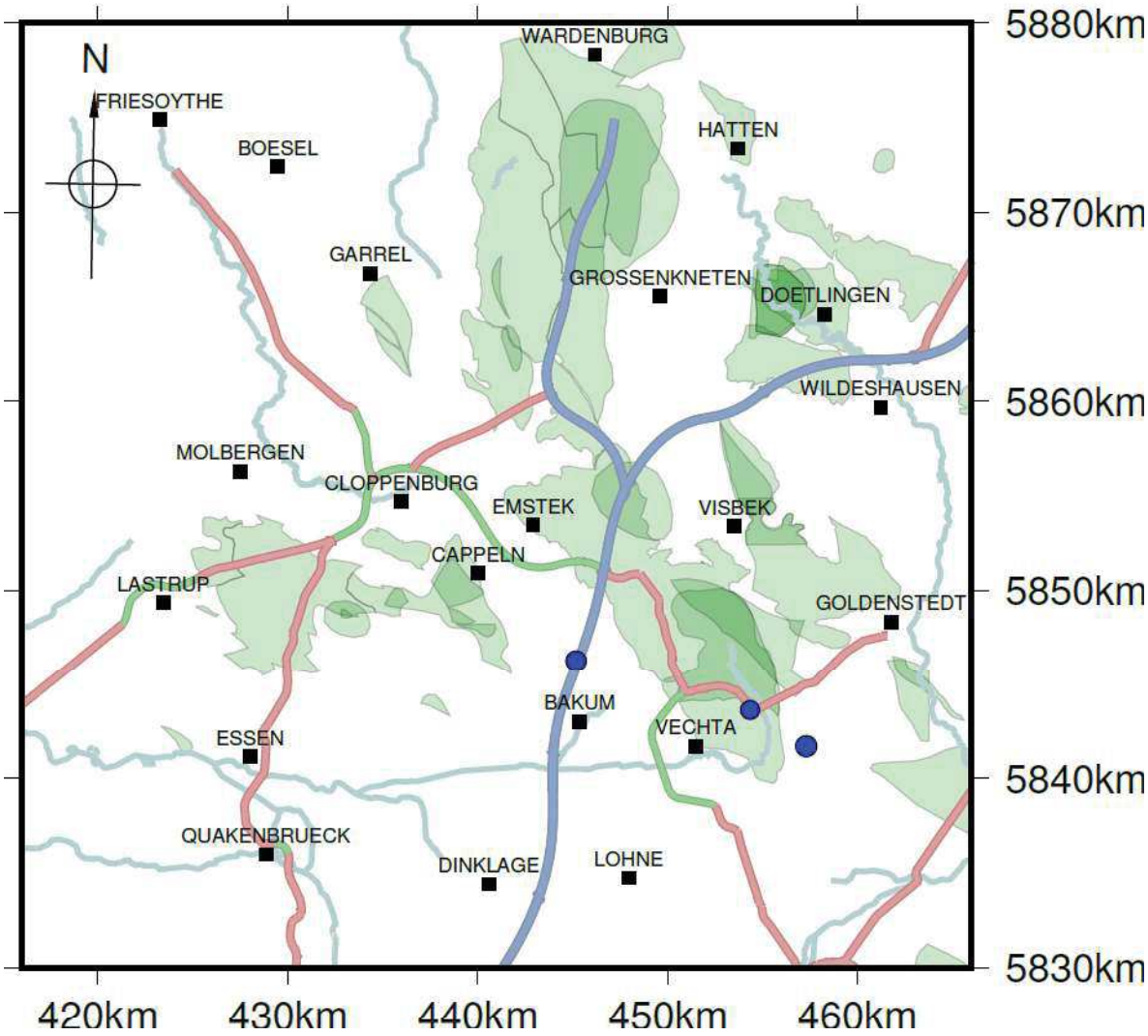


Abbildung A1-3. Geografische Darstellung der in Tabelle 1 gelisteten Epizentren des Ereignisses 3 vom 28.03.1999.

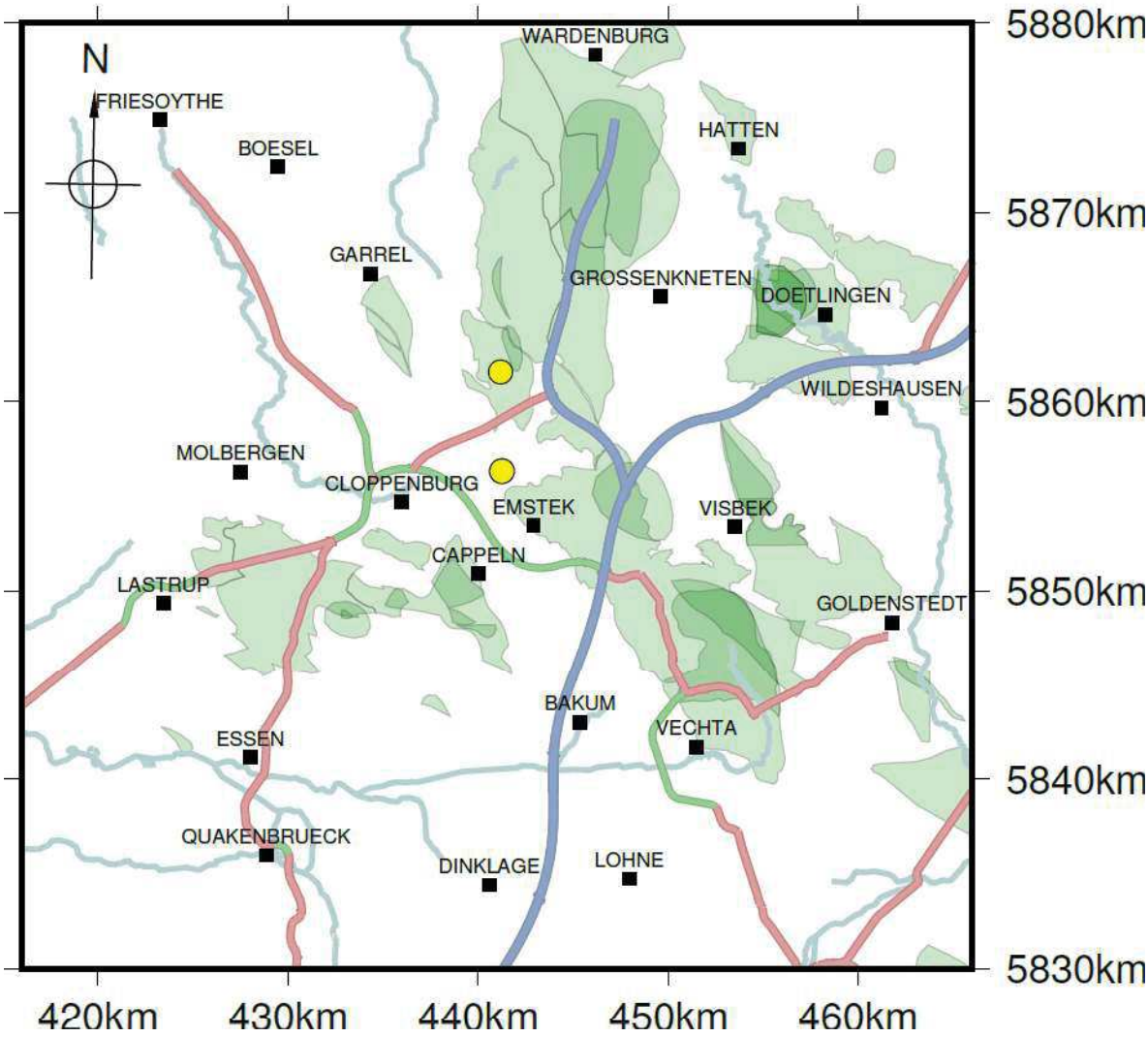


Abbildung A1-4. Geografische Darstellung der in Tabelle 1 gelisteten Epizentren des Ereignisses 4 vom 10.09.2002.

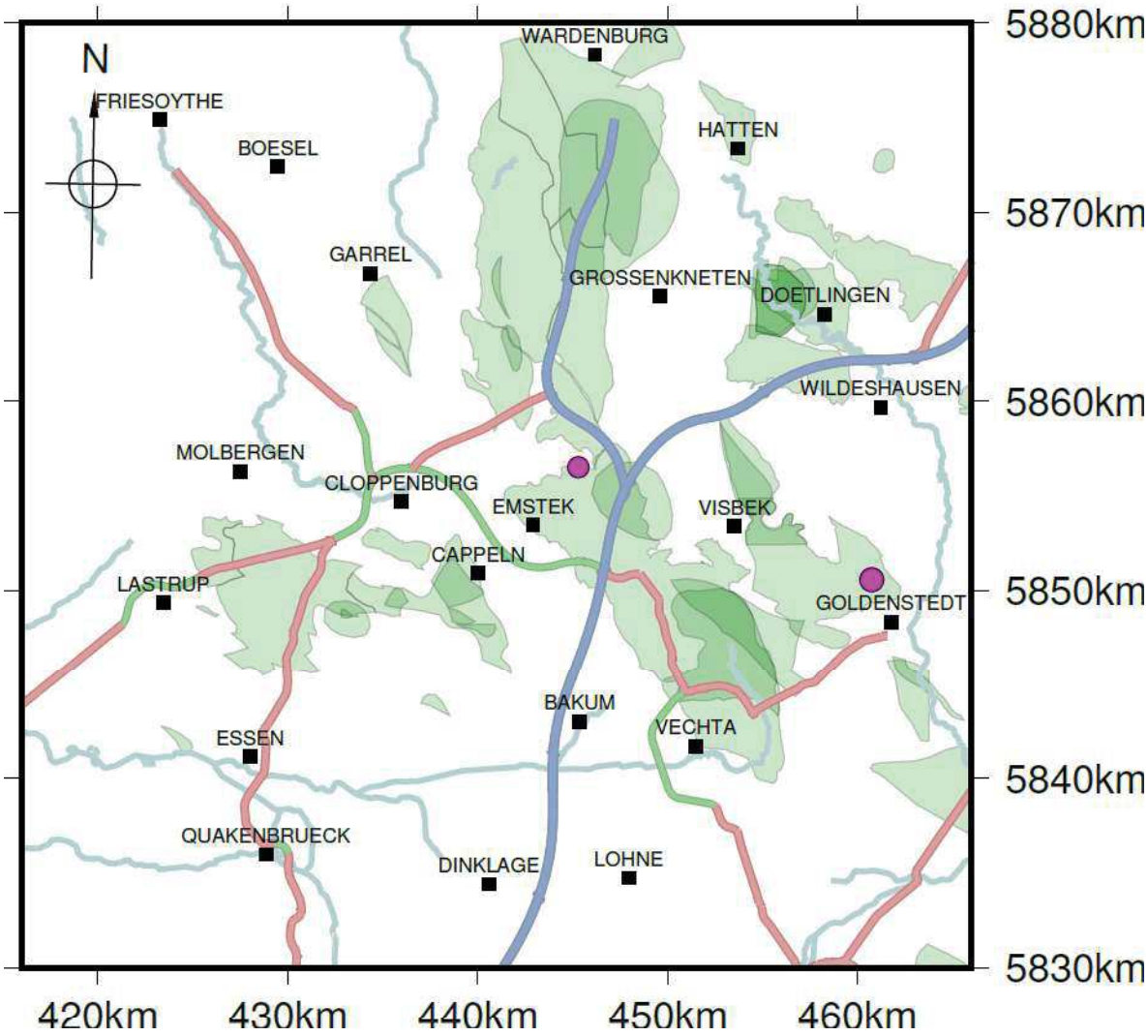


Abbildung A1-5. Geografische Darstellung der in Tabelle 1 gelisteten Epizentren des Ereignisses 5 vom 17.12.2005.

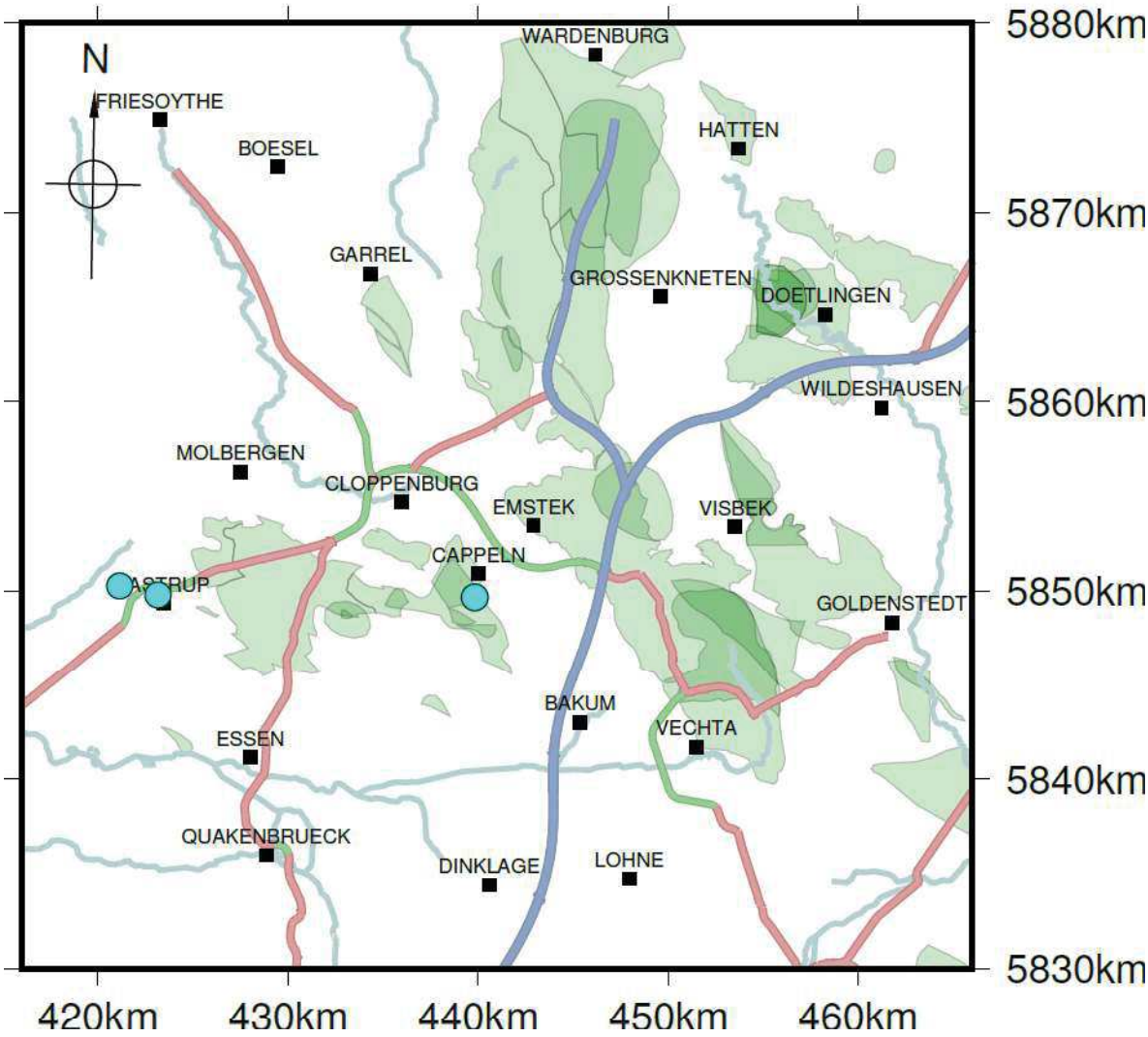


Abbildung A1-6. Geografische Darstellung der in Tabelle 1 gelisteten Epizentren des Ereignisses 6 vom 02.07.2006.

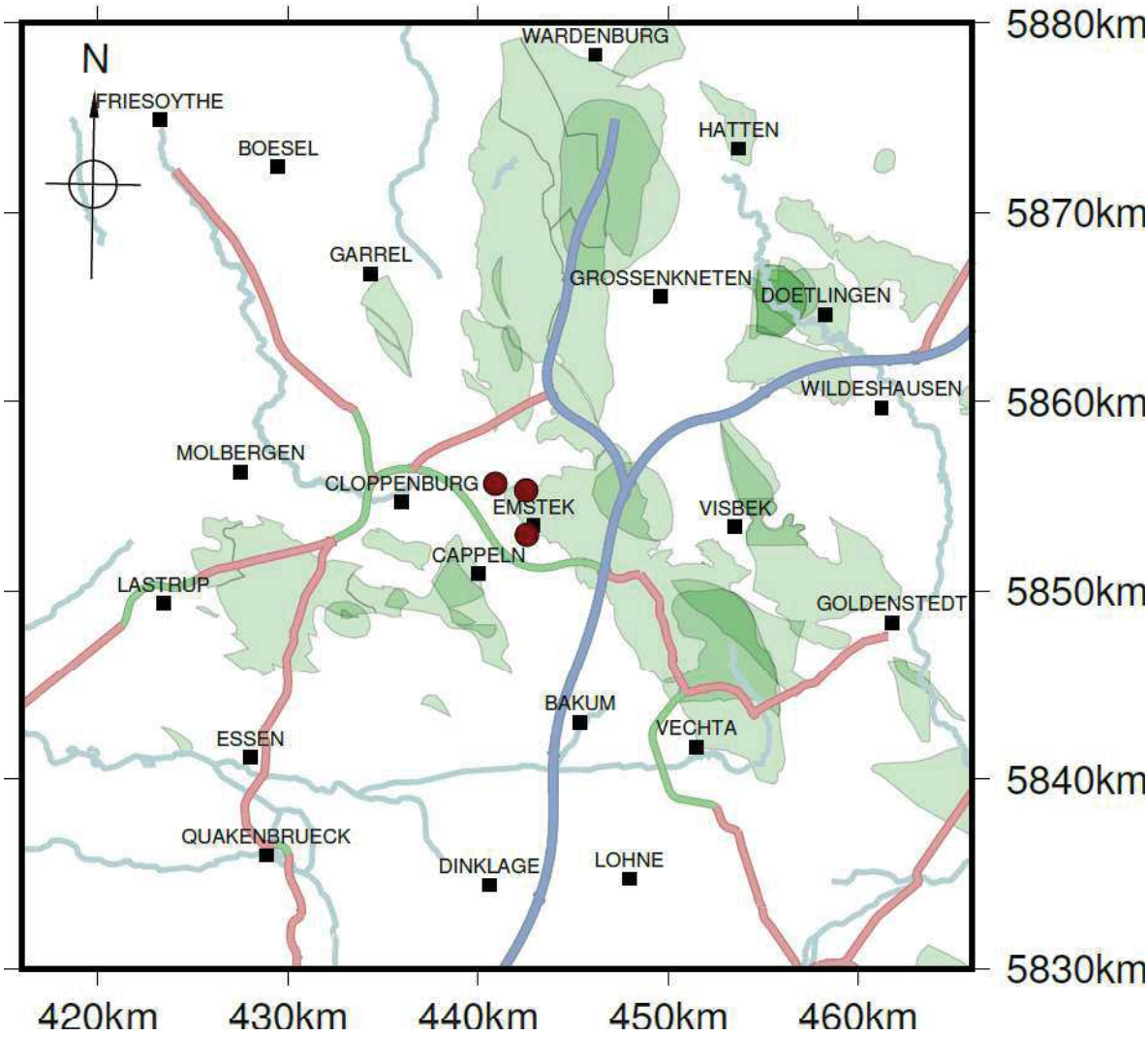


Abbildung A1-7. Geografische Darstellung der in Tabelle 1 gelisteten Epizentren des Ereignisses 7 vom 20.12.2013.

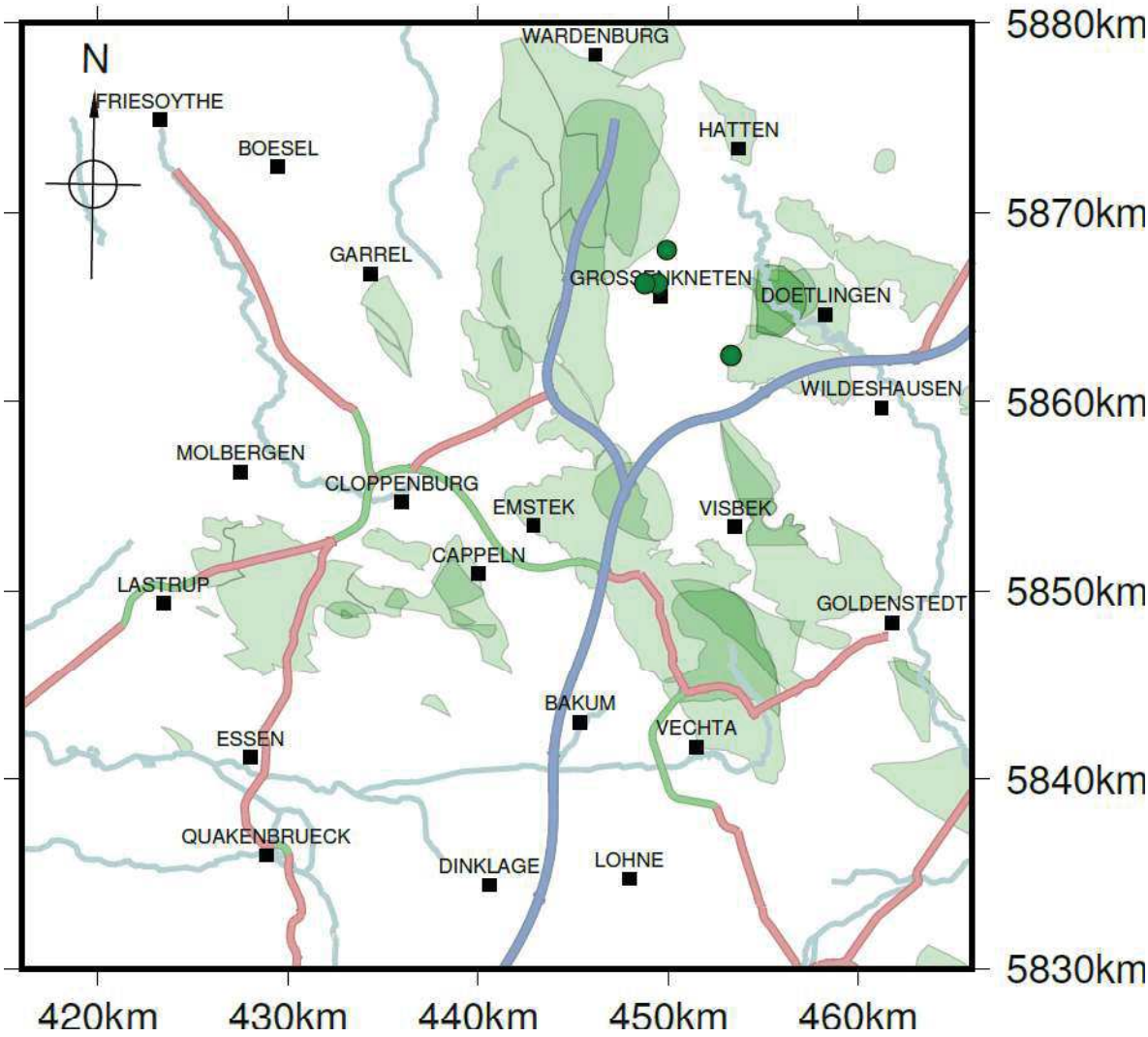


Abbildung A1-8. Geografische Darstellung der in Tabelle 1 gelisteten Epizentren des Ereignisses 8 vom 28.07.2014.

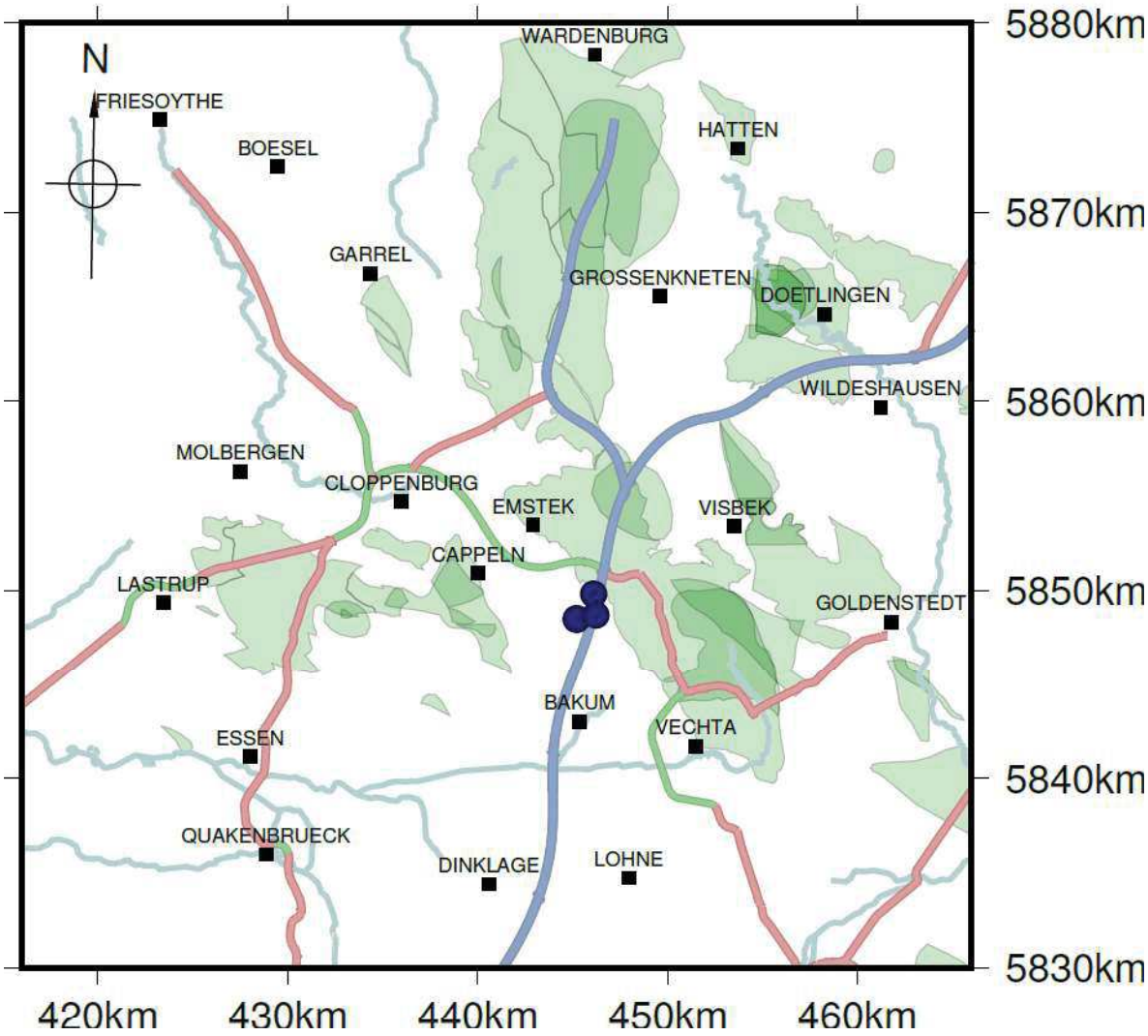


Abbildung A1-9. Geografische Darstellung der in Tabelle 1 gelisteten Epizentren des Ereignisses 9 vom 02.09.2014.

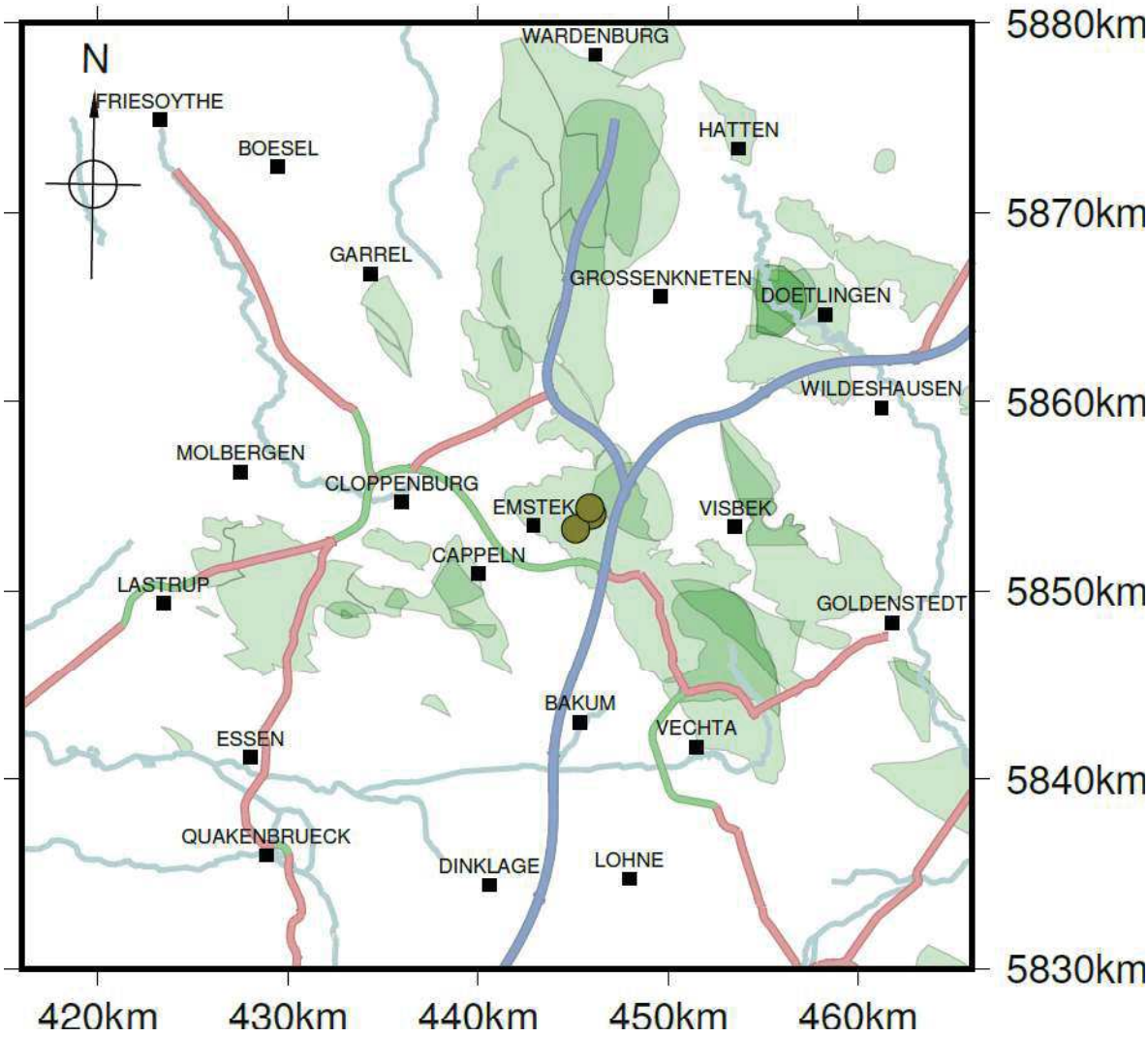


Abbildung A1-10. Geografische Darstellung der in Tabelle 1 gelisteten Epizentren des Ereignisses 10 vom 19.12.2014.

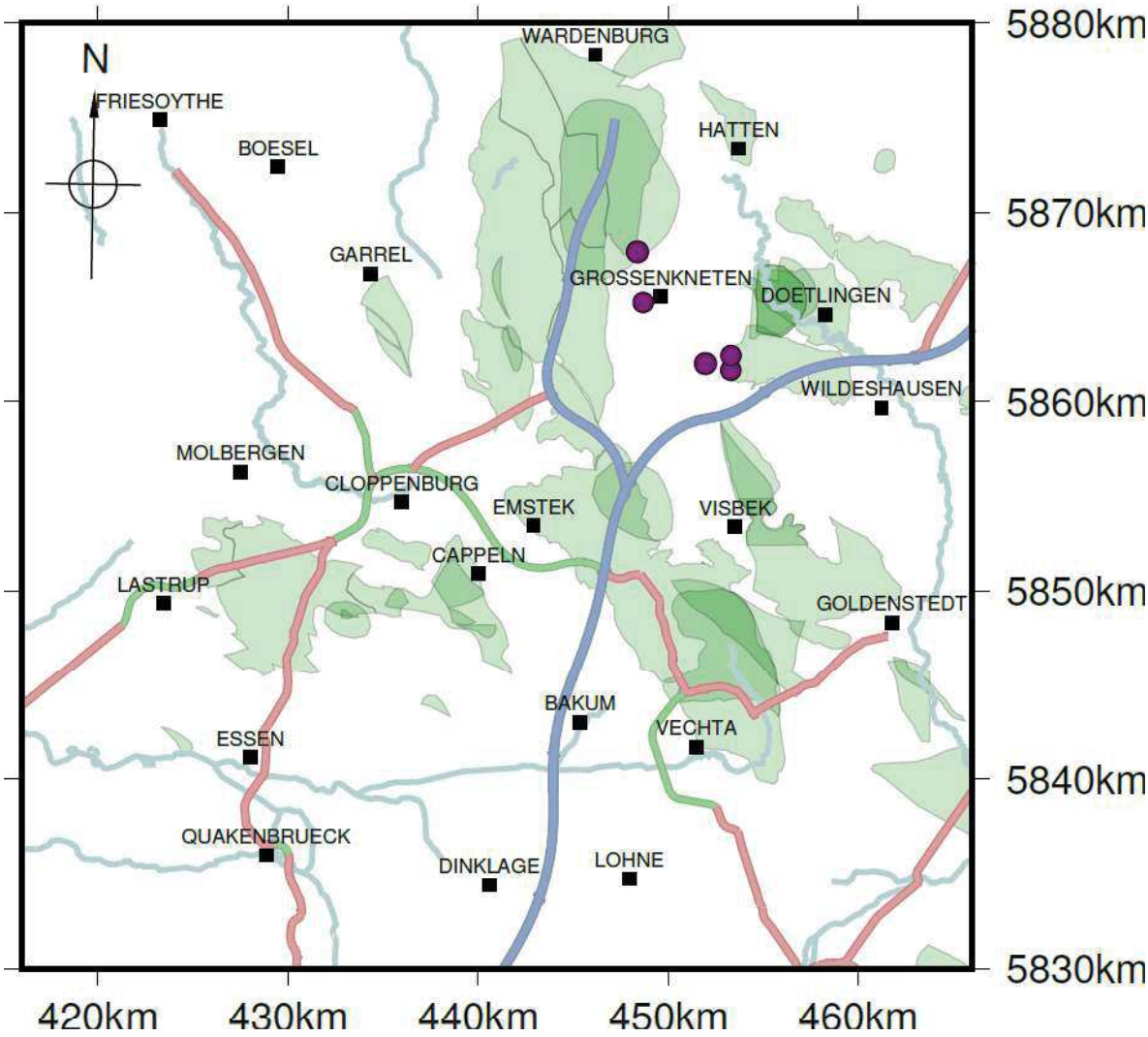


Abbildung A1-11. Geografische Darstellung der in Tabelle 1 gelisteten Epizentren des Ereignisses 11 vom 27.10.2016.

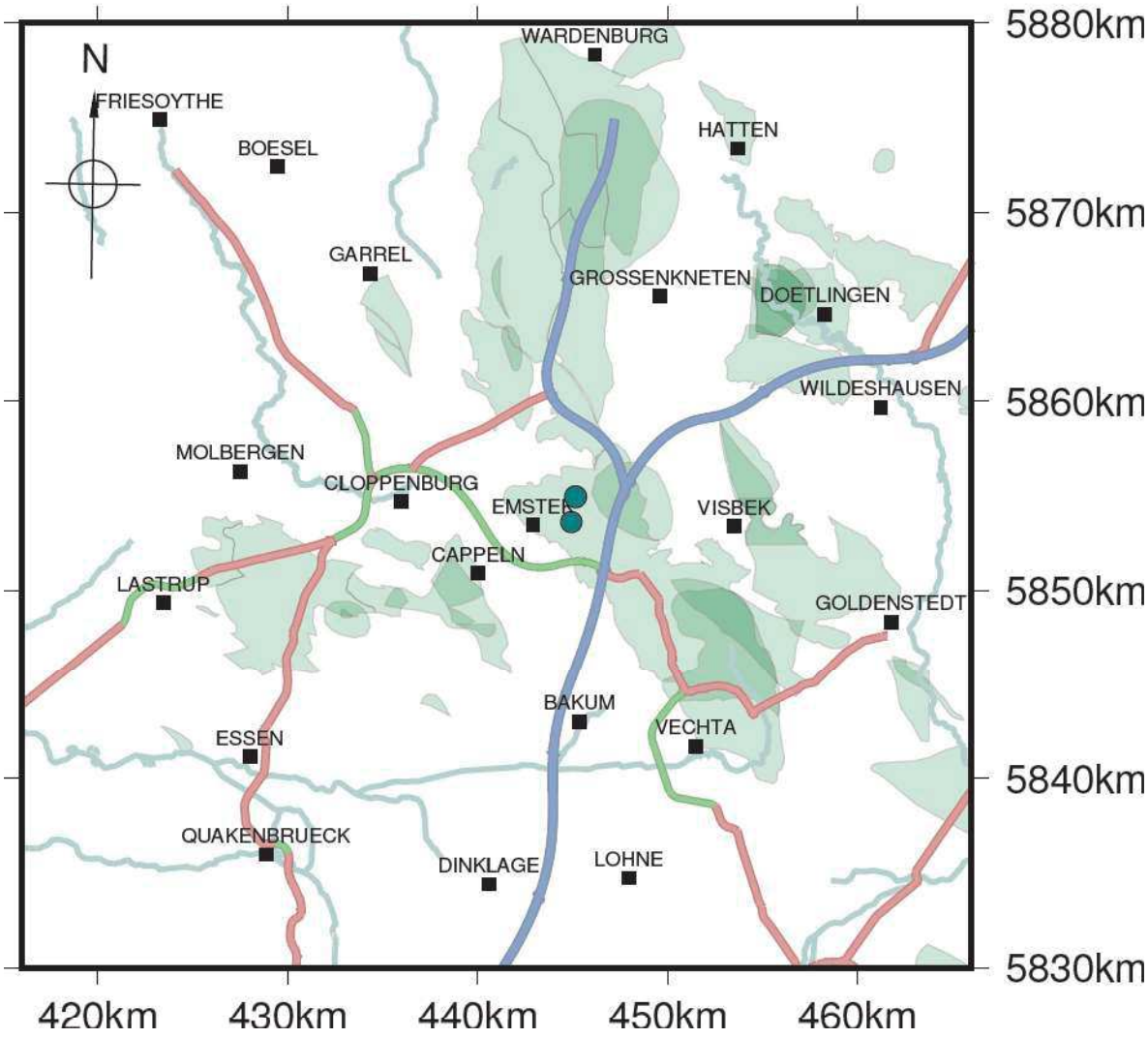


Abbildung A1-12. Geografische Darstellung der in Tabelle 1 gelisteten Epizentren des Ereignisses 12 vom 08.07.2017.

Anhang 2 – Übersicht der genutzten Stationen

Stationscode	Name	Typ	Latitude	Longitude	in Betrieb seit	Betreiber	Bemerkung
AHRW	Ahrweiler	3C	50,5410	7,0760	28.02.2009	BGR	
BKSB	Bunker Klein-Sehlingen	3C-Breitbandstation	52,9950	9,4000	17.07.2013	BGR	nicht mehr in Betrieb
BSEG	Bad Segeberg	3C	53,9350	10,3170	20.12.1995	Uni Hamburg	
BUG	Bochum Universität	3C	51,4410	7,2690	01.01.1987	RUB	
CLZ	Clausthal-Zellerfeld	3C	51,8420	10,3720	05.02.1991	TU Clausthal	
DEEL	Deelsen	3C	52,9570	9,3140	27.08.2013	BGR	
FAHL	Ahlhorn	3C	52,9080	8,1540	15.12.2014	BGR	
GOLD	Goldborn	3C	52,9220	9,4250	04.04.2008	BGR	
GSH	Grosshau	3C	50,7360	6,3000	01.02.1990	Geol. Dienst NRW	
GTTG	Göttingen	3C	51,5450	9,9650	18.01.2006	Uni Göttingen	
IBBN	Ibbenbüren	3C	52,3060	7,7590	07.12.1999	RUB	
IGAD	Garlstedt	3C	53,2580	8,6900	02.03.2009	BGR	
NRDL	Niedersachsen-Riedel	3C	52,4940	10,1070	24.03.2002	BGR	
RAST	Rastdorf	3C	52,9100	7,7160	20.01.2014	BGR	
RETH	Rethem	3C	52,7280	9,3610	22.01.2008	BGR	
RETHO	Rethem	3C	52,7280	9,3610	22.01.2008	BGR	
SEVE	Sevelten	3C	52,7990	8,0710	15.12.2014	BGR	
SYKE	Syke-Heiligenfelde	3C	52,8780	8,8760	15.12.2014	BGR	
TNS	Kleiner Feldberg (Taunus)	3C	50,2220	8,4470	04.05.1991	Taunus Observatorium	
UBBA	Unterbreizbach	3C	50,8190	10,0010	21.04.2003	BGR	526m u.NN
ENV4	Elp (Enerveen)	3C	52,8944	6,6337	09.09.1995	KNMI	
FSW5	Finsterwolde niveau 4	3C	53,2135	7,1195	05.05.1995	KNMI	
VBG4	Venebrugge niveau 4	3C	52,5440	6,6693	28.04.1995	KNMI	
VLW4	Vlagtwedde niveau 4	3C	52,9682	7,0972	23.05.1995	KNMI	
WIT	Witteveen	3C-Breitbandstation	52,8135	6,6695	16.11.1993	KNMI	
ABW5S	Sottrum	DMT-3D/DIN	53,1137	9,2241	24.04.2012	BVEG	
AME1S	Großenkneten	DMT-3D/DIN	52,9438	8,2594	22.07.2015	BVEG	
AMP1S	Lastrup	DMT-3D/DIN	52,7966	7,8643	07.05.2015	BVEG	
ASP1S	Dötlingen	DMT-3D/DIN	52,9710	8,3991	23.07.2015	BVEG	
BECKB	Beckeln	Trillium 20s	52,8833	8,5578	19.01.2016	BVEG	
BP3S	Soltau	DMT-3D/DIN	52,9837	9,8527	27.04.2012	BVEG	
BROKB	Brockum	Trillium 20s	52,4605	8,4419	20.01.2016	BVEG	
ESSNB	Essen	Trillium 20s	52,7458	8,0133	22.01.2016	BVEG	
GRO1S	Langwedel	DMT-3D/DIN	52,9776	9,1842	22.08.2013	BVEG	
GROSS	Rotenburg	DMT-3D/DIN	53,1093	9,3993	04.04.2012	BVEG	
H03BB	Egenbostel	LE-3D BH	52,9492	9,4681	05.12.2012	BVEG	
HB6S	Achim-Baden	DMT-3D/DIN	52,9996	9,0877	06.05.2015	BVEG	
HOP2S	Bergen	DMT-3D/DIN	52,8387	9,9215	23.05.2013	BVEG	seit 02.02.2017 ausser Betrieb
HS49S	Weyhe	DMT-3D/DIN	52,9933	8,7966	22.07.2015	BVEG	
HUDEB	Hude	Trillium 20s	53,0770	8,4343	18.01.2016	BVEG	
IO3CB	Wiedingen	LE-3D BH	52,9984	9,7825	04.12.2012	BVEG	
K181S	Wardenburg-Achtermeer	DMT-3D/DIN	53,0867	8,1216	21.07.2015	BVEG	
KS19S	Barnstorf	DMT-3D/DIN	52,7122	8,5032	06.05.2015	BVEG	
LANGS	Walsrode	DMT-3D/DIN	52,8609	9,5919	04.04.2012	BVEG	
LOENS	Visselhövede	DMT-3D/DIN	52,9878	9,5827	26.04.2012	BVEG	
MOLBB	Fuchsberg, Molbergen	Trillium 20s	52,8911	7,9738	15.01.2016	BVEG	
MTS2S	Bassum	DMT-3D/DIN	52,8482	8,7285	05.05.2015	BVEG	
PENNB	Penningsehl	Trillium 20s	52,6445	9,0452	19.01.2016	BVEG	
PW17S	Vechta	DMT-3D/DIN	52,7282	8,2914	22.05.2015	BVEG	
RS52S	Hemsbünde	DMT-3D/DIN	53,0910	9,4620	22.05.2013	BVEG	
SO6AB	Holthusen	LE-3D BH	53,0525	10,2790	04.12.2012	BVEG	
SULIB	Sulingen	Trillium 20s	52,6746	8,7444	20.01.2016	BVEG	
TRFTS	Langwedel	DMT-3D/DIN	52,9812	9,2292	04.02.2013	BVEG	
V01EB	Klein Wulmstorf	LE-3D BH	52,9439	9,1098	05.12.2012	BVEG	
VOR1B	Vorwerk	LE-3D BH	53,1961	9,1479	10.10.2012	BVEG	
WARDB	Wardenburg	Trillium 20s	53,0482	8,1586	14.01.2016	BVEG	
WEESB	Weesen	LE-3D BH	52,8309	10,1392	03.12.2012	BVEG	
WOELB	Wölpinghausen	Trillium 20s	52,4119	9,2281	21.01.2016	BVEG	
WS12S	Gulderstedt	DMT-3D/DIN	52,7984	8,4188	06.05.2015	BVEG	

Tabelle A2-1. Übersicht über die genutzten seismischen Stationen mit dem jeweiligen Stationscode, dem Ortsnamen, den Stationskoordinaten sowie Angaben zu Betreiber, Art der Instrumentierung und Zeitpunkt ihrer Inbetriebnahme.

Anhang 3 – Ereignisbulletin

Ereignis	Datum	Station	Phaseneinsatzzeit	Phase	Herdzeit (UTC)	Latitude	Longitude	Tiefe (km)	Magnitude (Ml)
1	07.05.1993	Ereignis nicht plausibel lokalisierbar!							
2	10.12.1998	BUG	00:22:02.781	P	00:21:36.475	52,835	8,227	4,8	2,2
		CLZ	00:22:03.562	P					
		TNS	00:22:16.842	P					
		ENV4	00:21:53.922	P					
		FSW5	00:21:50.066	P					
		VBG4	00:21:54.135	P					
		VLW4	00:21:48.410	P					
3	28.03.1999	Ereignis nicht plausibel lokalisierbar!							
4	10.09.2002	TNS	23:02:28.683	P	23:01:46.409	52,831	8,141	5,2	2,6
		ENV4	23:02:05.128	P					
		ENV4	23:02:18.860	S					
		FSW5	23:02:00.856	P					
		VLW4	23:01:59.836	P					
		VLW4	23:02:10.344	S					
5	17.12.2005	Ereignis nicht plausibel lokalisierbar!							
6	02.07.2006	BUG	14:38:03.530	P	14:37:43.668	52,769	7,945	4,6	2,7
		CLZ	14:38:09.002	P					
		IBBN	14:37:48.016	P					
		TNS	14:38:20.144	P					
		UBBA	14:38:16.640	P					
		ENV4	14:37:55.692	P					
7	20.12.2013	CLZ	19:57:29.276	P	19:56:44.160	52,798	8,047	4,8	2,4
		IBBN	19:57:09.811	P					
		RETH	19:57:14.755	P					
		H03BB	19:57:15.811	P					
		IO3CB	19:57:18.479	P					
		V01EB	19:57:12.115	P					
		VOR1B	19:57:14.291	P					
8	28.07.2014	GOLD	20:03:57.240	P	20:03:46.029	52,9155	8,3084	4,3	2,0
		IBBN	20:03:59.530	P					
		IBBN	20:04:11.210	S					
		IGAD	20:03:54.830	P					
		RAST	20:03:53.520	P					
		SEVE	20:03:48.080	P					
		H03BB	20:04:00.630	P					
		IO3CB	20:04:05.720	P					
		V01EB	20:03:57.200	P					
		VOR1B	20:03:59.170	P					
		WEESB	20:04:07.830	P					

Tabelle A3-1. Detaillierte Darstellung der ermittelten Phaseneinsatzzeiten an den für die Ereignislokalisierung genutzten Stationen sowie der ermittelten Herdparameter der seismischen Ereignisse 1-8.

Ereignis	Datum	Station	Phaseneinsatzzeit	Phase	Herdzeit (UTC)	Latitude	Longitude	Tiefe (km)	Magnitude (Ml)
9	02.09.2014	AHRW	00:12:48.330	P	00:11:57.874	52,823	8,195	4,7	2,7
		BUG	00:12:35.830	P					
		CLZ	00:12:38.166	P					
		GOLD	00:12:24.638	P					
		IBBN	00:12:20.998	P					
		IBBN	00:12:37.947	P					
		IGAD	00:12:20.746	P					
		RETHO	00:12:23.814	P					
		H03BB	00:12:25.014	P					
		HB6S	00:12:21.294	P					
		IO3CB	00:12:28.458	P					
		RS52S	00:12:25.750	P					
		TRFTS	00:12:23.186	P					
		V01EB	00:12:21.090	P					
		VOR1B	00:12:23.470	P					
		WEESB	00:12:31.562	P					
10	19.12.2014	FAHL	04:12:33.100	P	04:12:29.448	52,859	8,129	4,2	3,0
		FAHL	04:12:35.812	S					
		RETHO	04:12:46.412	P					
		SEVE	04:12:33.184	P					
		GROSS	04:12:47.411	P					
		IO3CB	04:12:50.639	P					
		V01EB	04:12:43.369	P					
		V01EB	04:12:53.373	S					
		VOR1B	04:12:45.293	P					
11	27.10.2016	FAHL	12:34:15.489	P	12:34:13	52,9155	8,3084	4,3	2,1
		SEVE	12:34:17.500	P					
		SEVE	12:34:22.480	S					
		AME1S	12:34:14.127	P					
		ASP1S	12:34:14.817	P					
		BECKB	12:34:17.227	P					
		ESSNB	12:34:17.429	P					
		HUDEB	12:34:17.398	P					
		PW17S	12:34:19.553	P					
		VOR1B	12:34:27.043	P					
		WARDB	12:34:17.043	P					
		WS12S	12:34:16.724	P					
12	08.07.2017	FAHL	13:50:27.519	P	13:50:26.608	52,837	8,198	5,3	2,2
		FAHL	13:50:30.087	S					
		SEVE	13:50:27.667	P					
		SEVE	13:50:30.411	S					
		AME1S	13:50:28.427	P					
		AME1S	13:50:31.651	S					
		ASP1S	13:50:29.999	P					
		BECKB	13:50:30.795	P					
		BROKB	13:50:34.687	P					
		ESSNB	13:50:28.895	P					
		MOLBB	13:50:28.835	P					
		PW17S	13:50:28.627	P					
		WS12S	13:50:29.035	P					
		WS12S	13:50:32.755	S					

Tabelle A3-2. Detaillierte Darstellung der ermittelten Phaseneinsatzzeiten an den für die Ereignislokalisierung genutzten Stationen sowie der ermittelten Herdparameter der seismischen Ereignisse 9-12.

Seismic Solutions
Tailored Services & Consulting

Bericht von Seismic Solutions

Projekt-ID: 17101

im Auftrag von **ExxonMobil Production Germany GmbH**

Riethorst 12
D - 30659 Hannover

Seismische Messungen am Erdgasfeld Goldenstedt/Visbek

Dr. Marco Walter (Geschäftsführer)

21.02.2017

Seismic Solutions
Bismarckstrasse 136
72072 Tübingen
Deutschland

Tel. +49 7071 935525
Mobil +49 177 3549707
Fax +49 7071 935530
E-mail Marco.Walter@seismicsolutions.de

Web www.seismicsolutions.de

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung....2
2. Durchführung der Messungen....4
2.1 Kriterien zur Standortwahl....5
2.2 Standorte....5
2.3 Standortbeschreibung....7
3. Auswertung der seismischen Messungen....13
3.1 Bestimmung des I95-Amplitudenintervalls....13
3.2 Ergebnisse der Analyse der Bodenunruhe....14
3.3 Vergleich zu lokalen Stationen der BGR....18
3.4 Registrierte Seismizität....20
3.5 Abschätzung der lokalen Detektionsempfindlichkeit....22
4. Zusammenfassung....23

1. Einleitung

Die *Seismic Solutions GbR* wurde von der *ExxonMobil Production Deutschland GmbH* (nachfolgend *EMPG* genannt) beauftragt, im Untersuchungsgebiet der vom Auftraggeber genutzten Erdgaslagerstätten Goldenstedt/Visbek passive seismische Messungen durchzuführen. Das Ziel der Untersuchungen bestand primär darin, eine lokale Standortsuche durchzuführen, um für temporäre bzw. permanente seismische Messungen geeignete Standorte mit möglichst geringer Bodenunruhe zu finden. Sekundär sollten mögliche, im Messzeitraum auftretende, lokale seismische Ereignisse detektiert und lokalisiert werden.

Die *EMPG* produziert in mehreren Lagerstätten im Gebiet Goldenstedt/Visbek Erdgas, in deren Areal in den letzten Jahren mehrere Erdbeben mit Magnituden $M_L > 2.0$ in geringer Tiefe, welche teilweise den ungefähren Reservoirtiefen entspricht, lokalisiert wurden. Die *EMPG* plant, die Erdgasproduktion nach Süden hin (südöstlich/südlich von Vechta) zu erweitern. Die bisher ermittelten Herdparameter der beobachteten Erdbeben erlauben derzeit keine eindeutige Zuordnung zu lokalen Störungszonen oder bekannten Verwerfungen, so dass aktuell nur bedingt abgeschätzt werden kann, inwieweit eine mögliche Erweiterung der Erdgasproduktion weitere (stärkere) Erdbeben verursachen kann (Tabelle 1, Abbildung 1).

Datum	Uhrzeit (Lokalzeit)	Latitude	Longitude	Magnitude (M_L)	Tiefe (km)	Quelle
10.12.1998	01:21:33	52,87	8,17	2,2	2,0[f]	[1]
28.03.1999	22:32:51	52,73	8,37	2,2	3,0[f]	[1]
11.09.2002	01:01:46	52,86	8,13	2,6	2,0[f]	[1]
17.12.2005	12:56:58	52,81	8,42	2,5	5,0[f]	[1]
02.07.2006	16:37:38	52,80	8,11	2,8	2,0[f]	[1]
20.12.2013	20:57:00	52,83	8,15	2,4	5,0[f]	[1]
28.07.2014	22:03:46	52,95	8,25	2,1	5,0[f]	[1]
02.09.2014	02:12:09	52,79	8,19	2,8	5,0[f]	[1]
19.12.2014	05:12:00	52,85[*]	8,17[*]	3,1	5,1	[1,2]
05.06.2015	05:36:00	52,91	8,26	1,9	k.A.	[2]
27.10.2016	14:34:00	52,94	8,24	2,1	k.A.	[2]

[*] bei den beiden Quellen gab es unterschiedliche Angaben zu den Herdkoordinaten, es wurden die auf der Homepage des LBEG veröffentlichten Koordinaten verwendet

[f] die Tiefe der Ereignisse wurde zur Lokalisierung festgesetzt

[1] LBEG/BGR-Bericht zum Erdbeben bei Emstek vom 19.12.2014 (Mai 2015)

[2] Online-Bulletin des LBEG

Tabelle 1. Herdparameter der im Untersuchungsgebiet vom LBEG / BGR seit 1977 lokalisierten Erdbeben.

Die Tabelle 1 zeigt die vom Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) und von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) publizierten Herdparameter der seit 1977 im Untersuchungsgebiet erfassten und lokalisierten Erdbeben.

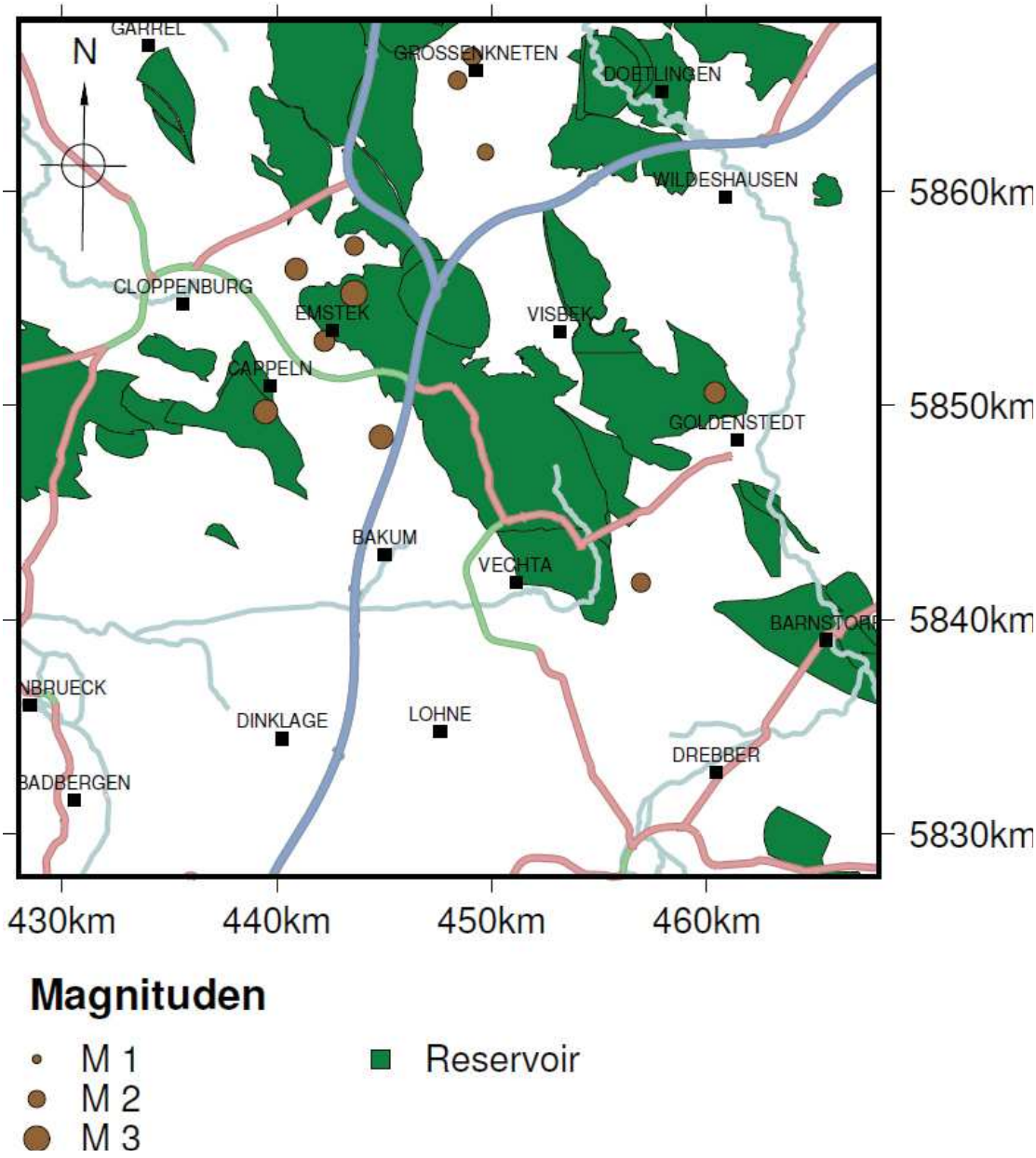


Abbildung 1. Epizentren der in Tabelle 1 gelisteten lokalen Erdbeben zwischen von 1998-2016. In grün sind die Ausbisse der Reservoirs dargestellt (von AG zur Verfügung gestellt).

Um die Datengrundlage und somit die Möglichkeiten der Interpretation der lokalen Seismizität zu verbessern, wurde seitens des AG angedacht, temporär bzw. permanent hochauflösende passive seismische Messungen durchzuführen. Die im Rahmen dieses Auftrags durchgeführten

Untersuchungen stellen eine Machbarkeitsstudie hinsichtlich der Erfolgsaussichten von temporären/permanenten seismischen Messungen dar.

2. Durchführung der Messungen

Die seismischen Messungen fanden im Zeitraum vom 07.10.2016 bis 11.10.2016 im Areal der Erdgaslagerstätten Visbek/Goldenstedt statt. Insgesamt wurde an 12 Standorten (S1-S12) für mehrere Stunden die natürliche Bodenunruhe registriert. Die Registrierungen erfolgten kontinuierlich mit einer Samplingrate von 500 Hz. Es wurden für die einzelnen Standorte kurzperiodische (1 Hz Eigenfrequenz) LE-3D Sensoren der Firma *Lennartz electronic GmbH* verwendet. Als Datenlogger wurden SUMMIT M Hydra der Firma *DMT GmbH & Co KG* mit einem 24 bit A/D-Wandler benutzt, an denen ein GPS-Sensor zur Zeitsynchronisation installiert wurde. An drei Standorten (S1-S3) wurden für den gesamten Messzeitraum jeweils ein seismisches Kleinarray (Seismic Navigating System – SNS) dauerhaft betrieben. Dieses bestand ebenso aus einem LE-3D Sensor als Zentralstation und drei LE-1D Sensoren als Außenstationen, in einer Entfernung von ca. 100 m zur Zentralstation (siehe Abbildung 2). Die seismischen Daten der Kleinarrays wurden für den gesamten Messzeitraum kontinuierlich mit den zuvor genannten Parametern registriert.

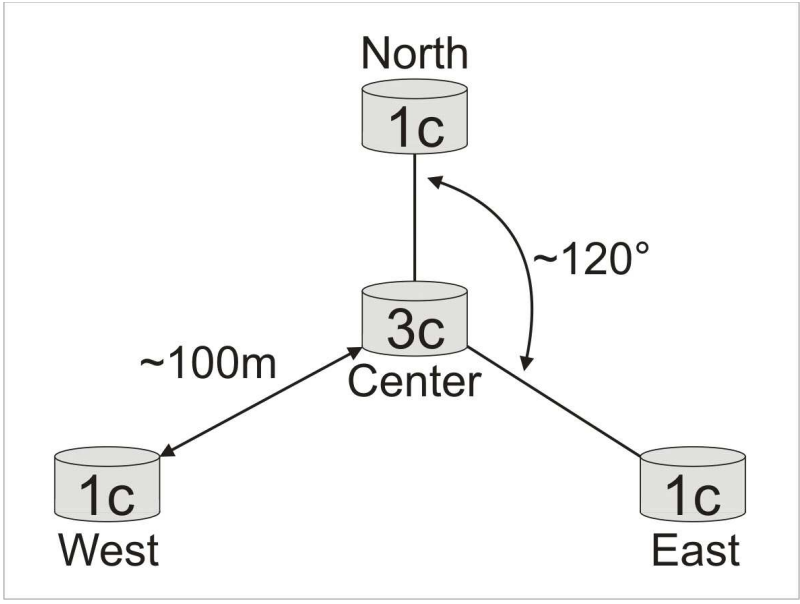


Abbildung 2. Schematische Darstellung der Stationsauslage eines Kleinarrays (SNS).

2.1 Kriterien zur Standortwahl

Für passive seismische Messungen ist die Wahl der potentiellen Standorte entscheidend. Daher wurde versucht, im Untersuchungsgebiet möglichst ruhige Standorte unter Berücksichtigung folgender Kriterien zu finden:

- Dimension des Untersuchungsgebietes
- Lokation bisher registrierter Erdbeben
- Nähe zu Straßen und Verkehrswegen
- Nähe zu Städten und Dörfern
- Art der Flächennutzung (z.B. Wald, Landwirtschaft, Industriegebiete)
- Bebauung (z.B. Windkraftanlagen)
- Infrastrukturelle Installationen (z.B. Stromtrassen, Funkmasten)

Für die Instrumentierung eines temporären bzw. permanenten seismischen Netzwerks muss darüber hinaus die Geometrie der Stationen untereinander berücksichtigt werden, um eine optimale Ereignisdetektion, -identifikation und -lokalisierung zu ermöglichen. Im Rahmen dieser Studie wurde versucht, das Areal möglichst flächendeckend zu untersuchen.

2.2 Standorte

Vor Beginn der Messkampagne wurde zur Verfügung stehendes Kartenmaterial geprüft, um nach den o.g. Kriterien geeignete Standorte bzw. Areale zu identifizieren. Für die Installation der drei Kleinarrays wurden die Standorte vorab mit dem Auftraggeber festgelegt. Die übrigen Standorte wurden vor Ort bestimmt. In Tabelle 2 sind die Koordinaten aller Standorte aufgelistet.

Standort	Art der Instrumentierung	Dauer der Registrierung*	Latitude (WGS 84)	Langitude (WGS 84)
S1	Kleinarray (SNS1)	7.10. 10:50 - 11.10. 2016 9:00	52,80161N (S1C)	8,18619E (S1C)
S2	Kleinarray (SNS2)	7.10. 13:20 - 11.10.2016 9:45	52,79442N (S2C)	8,31578E (S2C)
S3	Kleinarray (SNS3)	7.10. 11:55 - 11.10.2016 10:15	52,73546N (S3C)	8,36801E (S3C)
S4	3c-Station	7.10. 9:31 - 7.10.2016 16:06	52,822111N	8,179619E
S5	3c-Station	7.10. 16:30 - 8.10.2016 8:45	52,82762N	8,09507E
S6	3c-Station	8.10. 9:11 - 8.10.2016 12:45	52,86310N	8,09882E
S7	3c-Station	8.10. 13:14 - 8.10.2016 17:08	52,86039N	8,16023E
S8	3c-Station	8.10. 17:40 - 9.10.2016 8:55	52,91553N	8,06701E
S9	3c-Station	9.10. 10:45 - 9.10.2016 16:30	52,77478N	8,31304E
S10	3c-Station	9.10. 17:10 - 10.10.2016 10:50	52,77321N	8,13130E
S11	3c-Station	10.10. 12:10 - 10.10.2016 17:15	52,75798N	8,21947E
S12	3c-Station	10.10. 18:10 - 11.10.2016 9:20	52,83388N	8,27375E

*Zeitangaben in Lokalzeit (MESZ)

Tabelle 2. Koordinaten, Instrumentierung und Dauer der Registrierung der Standorte S1-S12.

Die Abbildung 3 zeigt eine Karte mit den 12 Standorten S1-S12 sowie den Regionalnetzstationen FAHL und SEVE, die von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) betrieben werden (vgl. Abbildung 1).

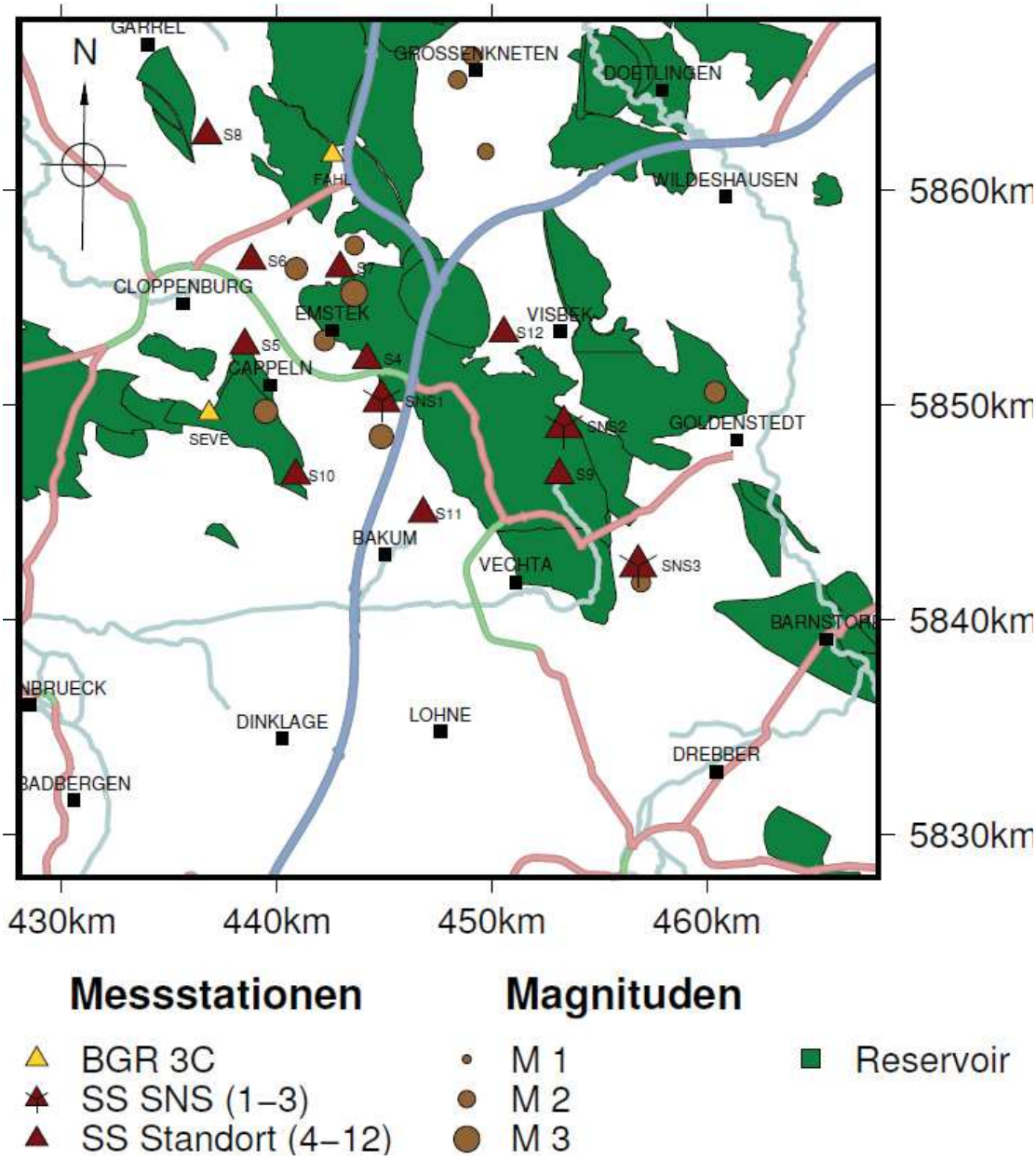


Abbildung 3. Lokationen der 12 instrumentierten Standorte, die BGR-Stationen FAHL und SEVE sowie die Epizentren der in Tabelle 1 aufgelisteten Erdbeben (vgl. Abb.1). In grün sind die Ausbisse der Reservoirs dargestellt (von AG zur Verfügung gestellt).

2.3 Standortbeschreibung

Der Standort S1 befand sich ca. 4 km südöstlich von Emstek in einem rein landwirtschaftlich genutzten Areal, vereinzelte Bauernhäuser befanden sich in unmittelbarer Nähe. Am Standort S1 wurde ein seismisches Kleinarray (SNS1) installiert.

Abbildung 4. Der Standort S1 südöstlich von Emstek.

Der Standort S2 befand sich ca. 4 km südlich von Visbek und ca. 5 km west-südwestlich von Goldenstedt in einem landwirtschaftlich genutzten Gebiet. Westlich des Standortes befanden sich 4 Windkraftanlagen in ca. 500m – 1000m Entfernung, die beim Sichten von Kartenmaterial nicht erkennbar bzw. verzeichnet waren. Am Standort S2 wurde ein seismisches Kleinarray (SNS2) installiert.

Abbildung 5. Der Standort S2 südlich von Visbek.

Der Standort S3 befand sich ca. 5 km östlich von Vechta, in einem sehr abgelegenen und vermeintlich ruhigem, rein landwirtschaftlich genutztem Areal. Der Standort S3 stellt den südlichsten untersuchten Standort dar. Am Standort S3 wurde ein seismisches Kleinarray (SNS3) installiert.

Abbildung 6. Der Standort S3 östlich von Vechta.

Der Standort S4 befand sich ca. 2,5 km südöstlich von Emstek an einem Feldrand in einem Mischgebiet (Landwirtschaft und Wohngebiet) mit in der Nähe befindlichen Bundesstraßen. Der Standort S4 wurde temporär mit einem LE-3D-Sensor instrumentiert.

Abbildung 7. Der Standort S4 südöstlich von Emstek.

Der Standort S5 befand sich ca. 2,5 km nord-westlich von Cappeln an einem Feldrand in der Nähe von einer Bundesstraße. Der Standort S5 wurde temporär mit einem LE-3D-Sensor instrumentiert.

Abbildung 8. Der Standort S5 nord-westlich von Cappeln.

Der Standort S6 befand sich ca. 3 km nord-östlich von Cloppenburg in einem rein landwirtschaftlich genutzten Gebiet, in der Nähe von 2 Bundestraßen. Der Standort S6 wurde temporär mit einem LE-3D-Sensor instrumentiert.

Abbildung 9. Der Standort S6 nord-östlich von Cloppenburg.

Der Standort S7 befand sich ca. 2 km nördlich von Emstek in einem primär landwirtschaftlich genutztem Gebiet. Der Standort S7 wurde temporär mit einem LE-3D-Sensor instrumentiert.

Abbildung 10. Der Standort S7 nördlich von Emstek.

Der Standort S8 befand sich ca. 7 km nördlich von Cloppenburg in einem landwirtschaftlich genutzten Gebiet. Der Standort S8 stellt den nördlichsten aller untersuchten Standorte dar und wurde temporär mit einem LE-3D-Sensor instrumentiert.

Abbildung 11. Der Standort S8 nördlich von Cloppenburg.

Der Standort S9 befand sich ca. 5 km nord-östlich von Vechta zwischen den mit Kleinarrays instrumentierten Standorten S2 und S3 an einem Waldrand. Der Standort S9 wurde temporär mit einem LE-3D-Sensor instrumentiert.

Abbildung 12. Der Standort S9 nord-östlich von Vechta.

Der Standort S10 befand sich ca. 4 km süd-südöstlich von Cappeln in einem vermeintlich sehr ruhigem, rein landwirtschaftlich genutzten Gebiet. Der Standort S10 wurde temporär mit einem LE-3D-Sensor instrumentiert.

Abbildung 13. Der Standort S10 süd-südöstlich von Cappeln.

Der Standort S11 befand sich ca. 2 km nord-östlich von Bakum in einem Mischgebiet (Landwirtschaft und Wohngebiet) und wurde temporär mit einem LE-3D-Sensor instrumentiert.

Abbildung 14. Der Standort S11 nord-östlich von Bakum.

Der Standort S12 befand sich ca. 2 km westlich von Visbek in einem landwirtschaftlich genutzten Gebiet an einem Waldrand. Der Standort S12 wurde temporär mit einem LE-3D-Sensor instrumentiert.

Abbildung 15. Der Standort S12 westlich von Visbek.

3. Auswertung der seismischen Messungen

In diesem Kapitel werden die Vorgehensweise der Auswertungen sowie die Ergebnisse der seismischen Untersuchungen dargestellt.

3.1 Bestimmung des *I95*-Amplitudenintervalls

Allgemein ist anzunehmen, dass die Frequenzen seismischer Ereignisse lokaler, induzierter Seismizität in dem Frequenzbereich zwischen 5-40 Hz dominieren (FKPE, 2012). Das Positionspapier des *FKPE* (*Forschungskollegium Physik des Erdkörpers e.V.*) beschreibt in seinen Empfehlungen zur Überwachung induzierter Seismizität unter anderem die notwendige Messgenauigkeit seismischer Netzwerke. Die Auswertungen der seismischen Messungen erfolgten in Anlehnung dieser Empfehlungen des *FKPE*.

Die an jedem Standort registrierten seismischen Daten wurden zunächst für jeden Kanal im Frequenzbereich von 5-40 Hz Bandpass gefiltert. Anschließend wurde für jeden Kanal der so genannte *I95*-Wert berechnet. Der *I95*-Wert enthält 95% der Amplitudenwerte der jeweils registrierten Zeitreihe und gilt als Bezugsgröße für die Bestimmung der Detektionsschwelle in Abhängigkeit des angesetzten Signal-Stör-Verhältnisses (engl. signal-to-noise ratio = SNR). Durch die Bestimmung des *I95*-Wertes werden transiente Störsignale, die nur kurzzeitig auftreten, in der Bestimmung des Mittelwertes der registrierten Rauschamplituden vernachlässigt (Abbildung 16). Da die registrierten Amplitudenwerte der Bodenunruhe starken zeitlichen Schwankungen unterliegen (Tag/Nacht, Werktag/Wochenende) wurden minütliche und stündliche *I95*-Werte berechnet. Bei der Berechnung der *I95*-Werte fließen Datenlücken, die kurzzeitig durch das tägliche Wechseln der externen Batterien am Datenlogger entstanden sind, nicht mit ein und wurden heraus gerechnet.

Die Abbildung 16 zeigt beispielhaft die Berechnung des *I95*-Amplitudenintervalls anhand einer 24-stündigen Registrierung. In diesem Beispiel beträgt der berechnete *I95*-Wert für die 24-stündige Registrierung 1,14 µm/s, schwankt aber zwischen 0,83 µm/s (nachts) und 2,18 µm/s (tagsüber) bei den stündlichen Werten. Der Amplituden-Schwellwert unter dem ein Standort gemäß der Empfehlungen des *FKPE* als geeignet erachtet wird, beträgt 2,0 µm/s. Das Beispiel zeigt, dass eine kurzfristige Messung der lokalen Bodenunruhe über wenige Stunden nur bedingt eine Aussage über die Eignung eines Standortes und die zu erwartende Detektionsempfindlichkeit zulässt. Dennoch erlauben die temporären Messungen hierzu eine erste Abschätzung.

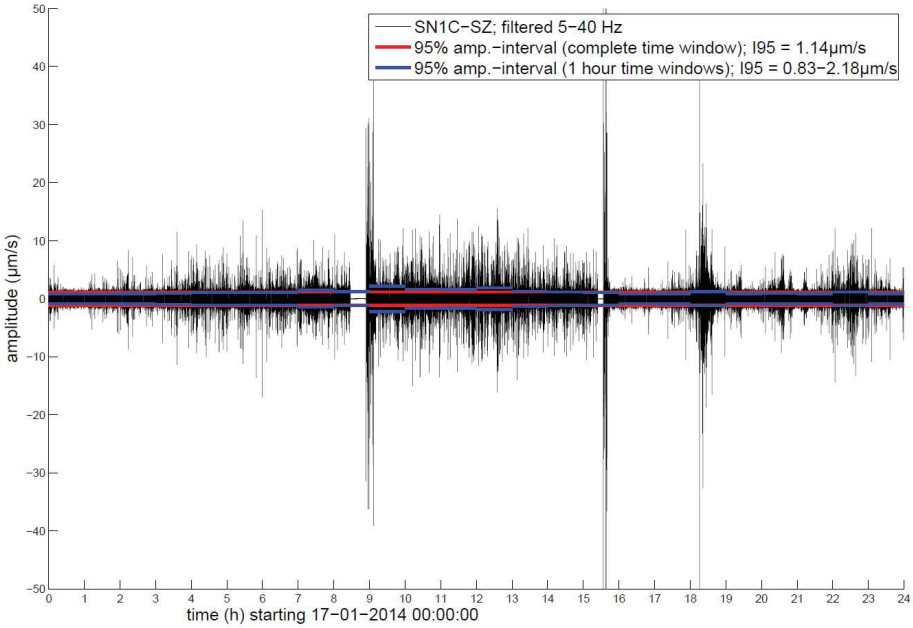


Abbildung 16. Beispielhafte Darstellung der Berechnung des *I95*-Amplitudenintervalls (siehe Text).

3.2 Ergebnisse der Analyse der Bodenunruhe

An jedem Standort wurde der Verlauf des *I95*-Amplitudenintervalls an den Vertikalspuren der seismischen Instrumentierung berechnet. An den Standorten S1, S2 und S3, an denen jeweils ein seismisches Kleinarray installiert wurde, variieren die ermittelten Bodenunruhewerte innerhalb der Stationsauslage, so dass an den Standorten der Minimalwert des Amplitudenintervalls für weitere Analysen benutzt wurde. An den Standorten S4 bis S12 wurde jeweils die Vertikalkomponente des 3c-Seismometers analysiert.

Die Abbildung 17 zeigt den zeitlichen Verlauf der registrierten Bodenunruhe (*I95*-Amplitudenintervall) der drei an den Standorten S1-S3 installierten seismischen Kleinarrays für den gesamten Messzeitraum vom 07.10.2016 bis 11.10.2016. Die Abbildung zeigt, dass bei SNS1 am Standort S1 und bei SNS3 am Standort S3 sowohl die Tag/Nacht-Schwankungen als auch die Wochentag/Wochenende-Schwankungen der Bodenunruhe deutlich sind. Die Amplituden liegen zwischen ca. 200 nm/s (nachts) und ca. 800 nm/s (tagsüber, Wochentag) bzw. 500-600 nm/s (tagsüber, Wochenende). Die Amplituden von SNS1 und SNS3 sind dabei vergleichbar. Bei SNS2 am Standort S2 dagegen wurden deutlich höhere Rauschamplituden ermittelt, besonders an dem Wochenende 8./9.10.2016. Ebenso ist der Tag/Nacht-Zyklus kaum erkennbar, die Amplituden variieren zwischen ca. 150 nm/s (nachts) und ca. 2500 nm/s (tagsüber, Wochenende). Die deutlich höheren Amplituden stehen mit hoher Wahrscheinlichkeit mit den in der Nähe befindlichen

Windkraftanlagen (WKA) im Zusammenhang. Vor Ort konnte beobachtet werden, dass die WKA am Wochenende stark rotierten und ab Montag, den 10.10.2016 nicht mehr rotierten. Dies spiegelt sich in den registrierten Amplituden wieder.

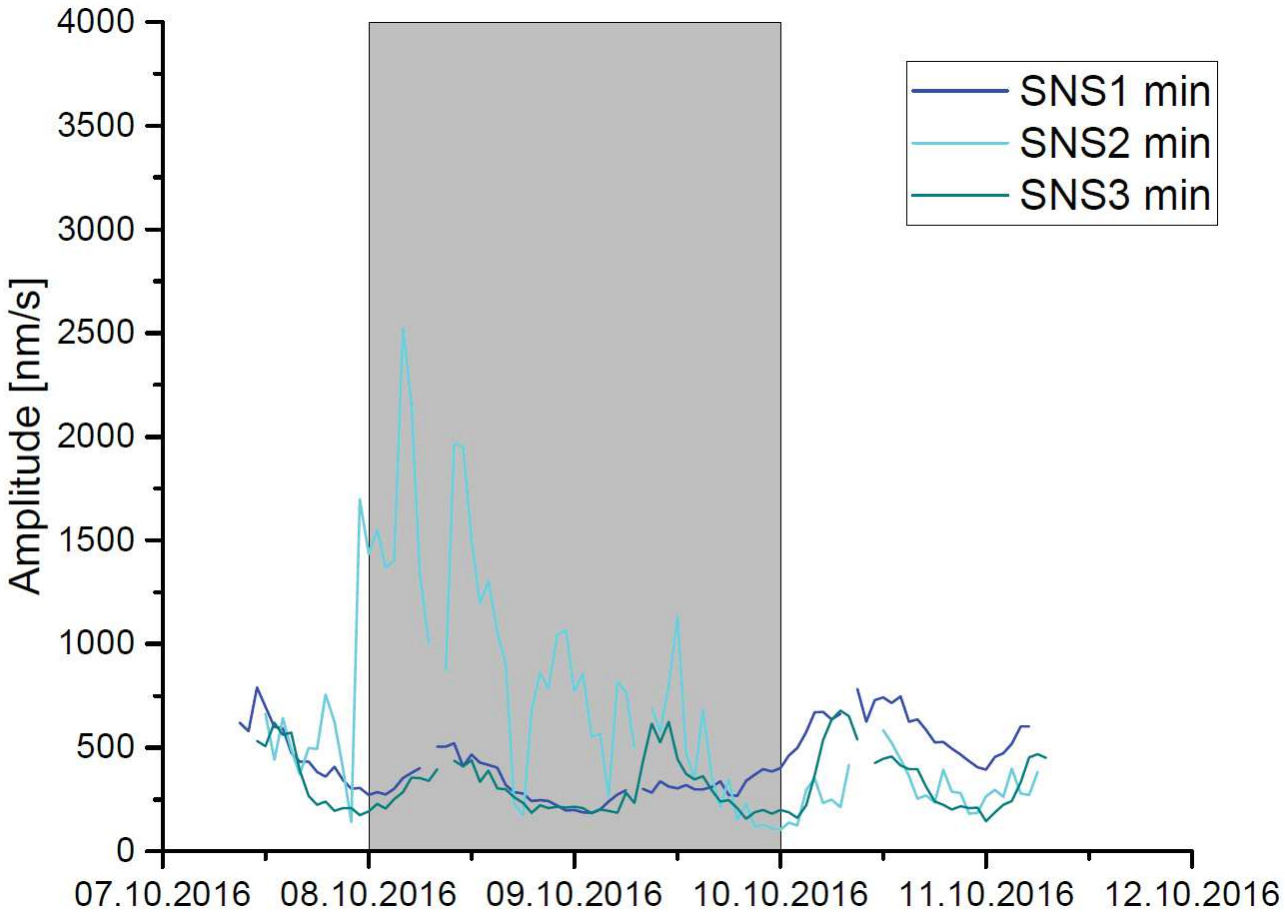


Abbildung 17. Zeitlicher Verlauf der registrierten Bodenunruhe (Stundenwerte des *I95*-Amplitudenintervalls) an den Standorten S1-S3 (SNS1-SNS3). Die Wochenendtage sind grau hinterlegt.

Dennoch wurden bei SNS2 mit die niedrigsten Amplitudenwerte von ca. 50 nm/s (in den Nachtstunden) registriert (vgl. Abbildung 19).

Die Abbildung 18 zeigt den zeitlichen Verlauf der Bodenunruhe an den Standorten S4 bis S12. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass sich der Tag/Nachtzyklus prinzipiell abbildet, die registrierten Amplituden allerdings sehr hoch sind. Die stündlichen Amplitudenwerte schwanken zwischen ca. 100 nm/s (S10, nachts) und 3500 nm/s (S7 und S10, tagsüber). An den Standorten S4, S6, S7, S9 und S11 wurden die seismischen Registrierungen nur tagsüber durchgeführt, was die hohen Amplitudenwerte erklärt. An den Standorten S5, S8, S10 und S12 wurden die Registrierungen über Nacht durchgeführt. Deutlich sind prinzipiell die hohen Amplituden tagsüber, welche durch landwirtschaftliche Arbeiten verursacht wurden. Da sich alle Standorte in landwirtschaftlich

genutzten Gebieten befanden, muss davon ausgegangen werden, dass, über einen längeren Zeitraum betrachtet, im gesamten Untersuchungsgebiet temporär mit tagsüber hohen Bodenunruhewerten gerechnet werden muss. Dies bedeutet, dass ggf. lediglich die Daten, die nachts erhoben werden, zur seismischen Auswertung schwacher, lokaler Seismizität mit geringen Magnituden genutzt werden können. Daher kann die Eignung der Standorte S4, S6, S7, S9 und S11 nicht beurteilt werden.

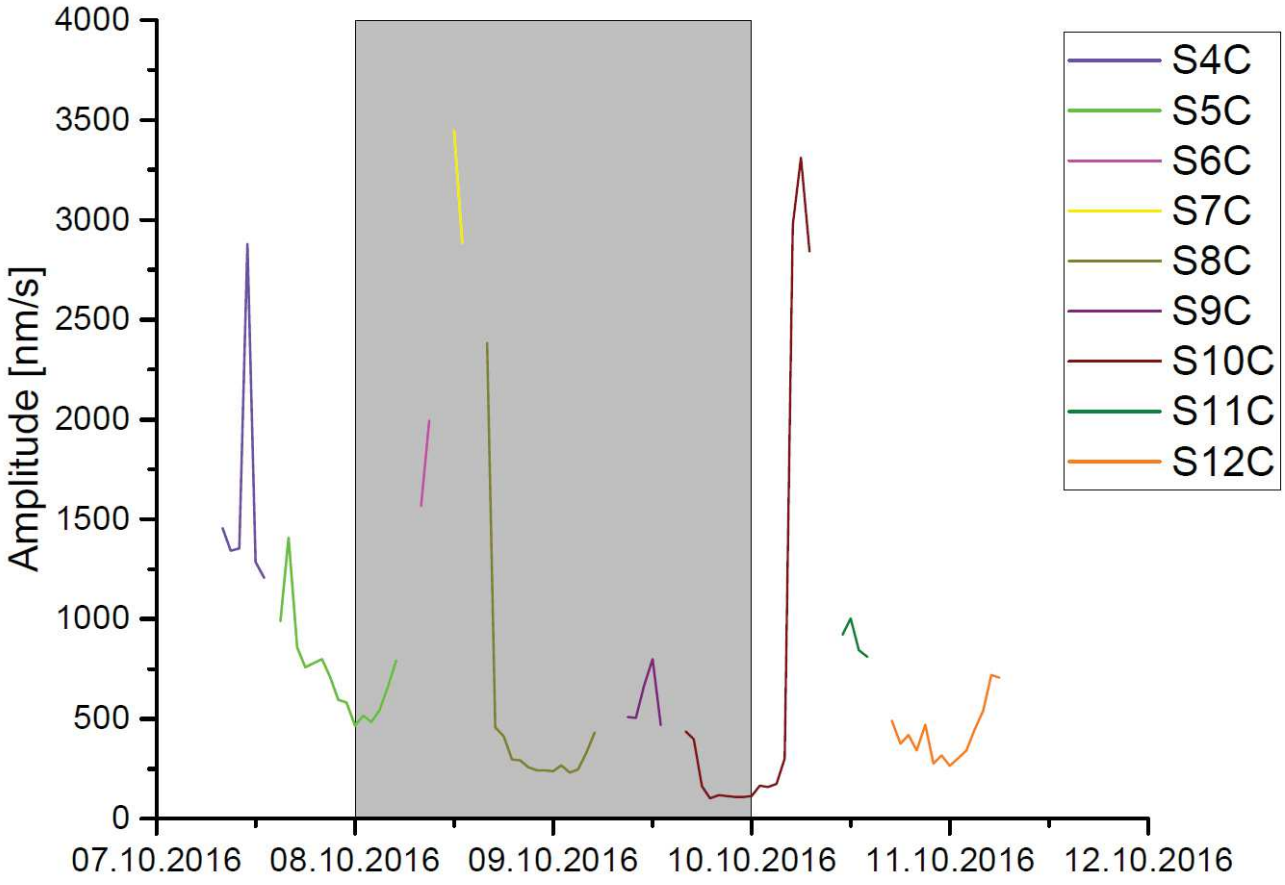


Abbildung 18. Zeitlicher Verlauf der registrierten Bodenunruhe (Stundenwerte des *I95*-Amplitudenintervalls) an den Standorten S4-S12. Die Wochenendtage sind grau hinterlegt.

Die Standorte S5 und S12 zeigen jeweils eine deutliche Abnahme der Rauschamplituden in den Nachtstunden, diese liegen aber mit ca. 300-500 nm/s deutlich über denen der Standorte S8 (ca. 250 nm/s) und S10 (ca. 100 nm/s) sowie den Standorten S1 und S3 (vgl. Abbildung 17). Bemerkenswert ist der enorme Anstieg der Rauschamplituden tagsüber an den Standorten S8 und S10 (bis ca. 3400 nm/s), obwohl diese nachts eine geringe Bodenunruhe zeigen.

Die Abbildung 19 zeigt den zeitlichen Verlauf der niedrigsten registrierten Amplitudenwerte als Minutenwert des *I95*-Amplitudenintervalls an allen Standorten für den gesamten Messzeitraum vom 07.10.2016 bis 11.10.2016.

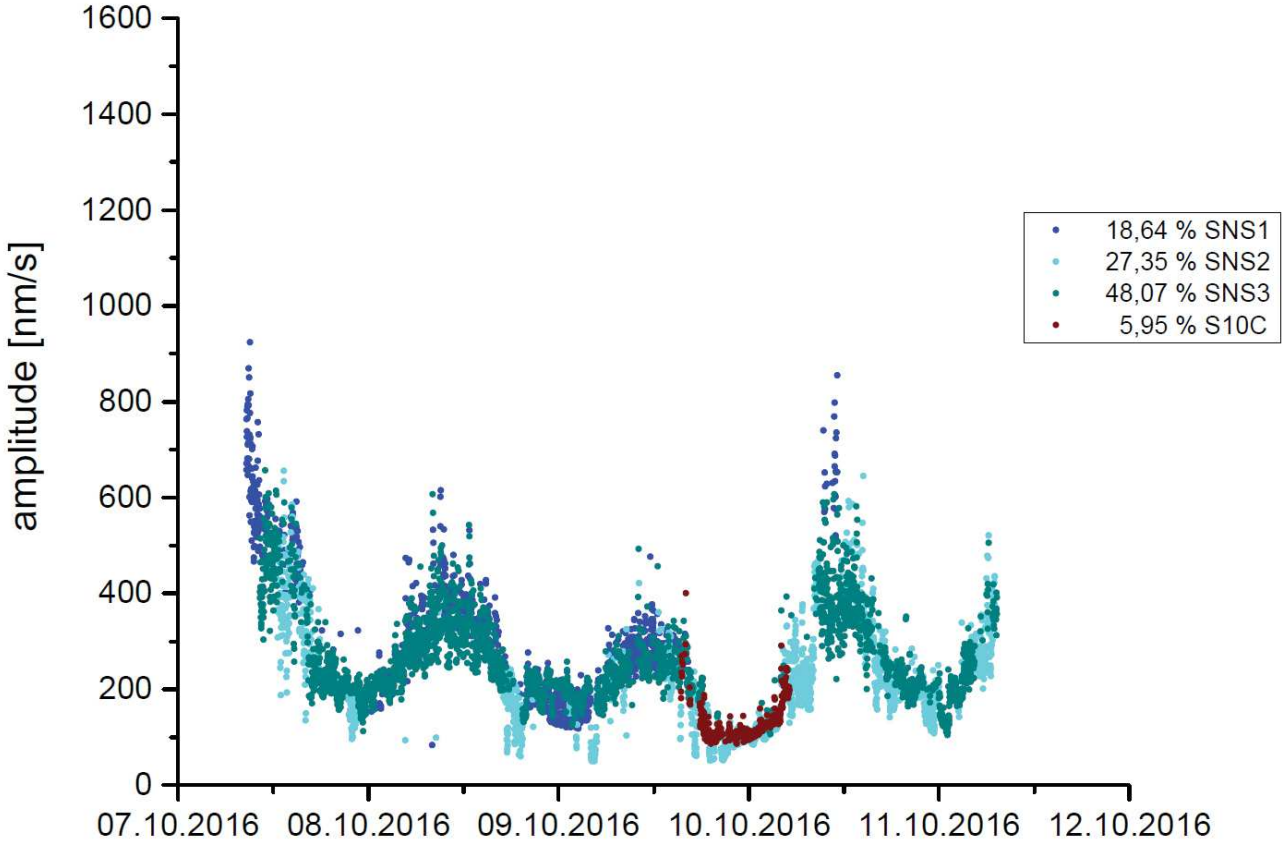


Abbildung 19. Zeitlicher Verlauf der niedrigsten registrierten Bodenunruhe an allen Standorten (Minutenwerte des *I95*-Amplitudenintervalls).

Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass lediglich die Standorte S1, S2, S3 und S10 zu den Minimalwerten der Rauschamplituden beitragen und die Rauschamplituden an den restlichen Standorten jeweils darüber liegen. Die Minimalwerte der Bodenunruhe schwanken zwischen ca. 50-100 nm/s (Wochenende, nachts) und ca. 800-900 nm/s tagsüber. Die geringsten Rauschamplituden wurden an den Standorten S2 und S10 mit ca. 50-100 nm/s registriert. Dabei gilt es zu beachten, dass gerade der Standort S2 aufgrund der Nähe zu den Windkraftanlagen tagsüber bzw. bei entsprechenden Windgeschwindigkeiten sehr hohe Rauschamplituden aufwies (vgl. Abbildung 17).

3.3 Vergleich zu lokalen Stationen der BGR

Im Untersuchungsgebiet betreibt die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) die seismischen Stationen SEVE und FAHL. Die Station SEVE befindet sich ca. 3 km südwestlich von Cappeln, die Station FAHL ca. 8 km nördlich von Emstek (siehe Abbildung 3). Die Daten der beiden Stationen sind frei zugänglich und wurden für die vorliegenden Auswertungen für den gesamten Messzeitraum genutzt. Um die Eignung der untersuchten Standorte beurteilen zu können, wurde die an den Standorten S1, S2 und S3 dauerhaft registrierte Bodenunruhe mit der der beiden BGR-Stationen FAHL und SEVE verglichen.

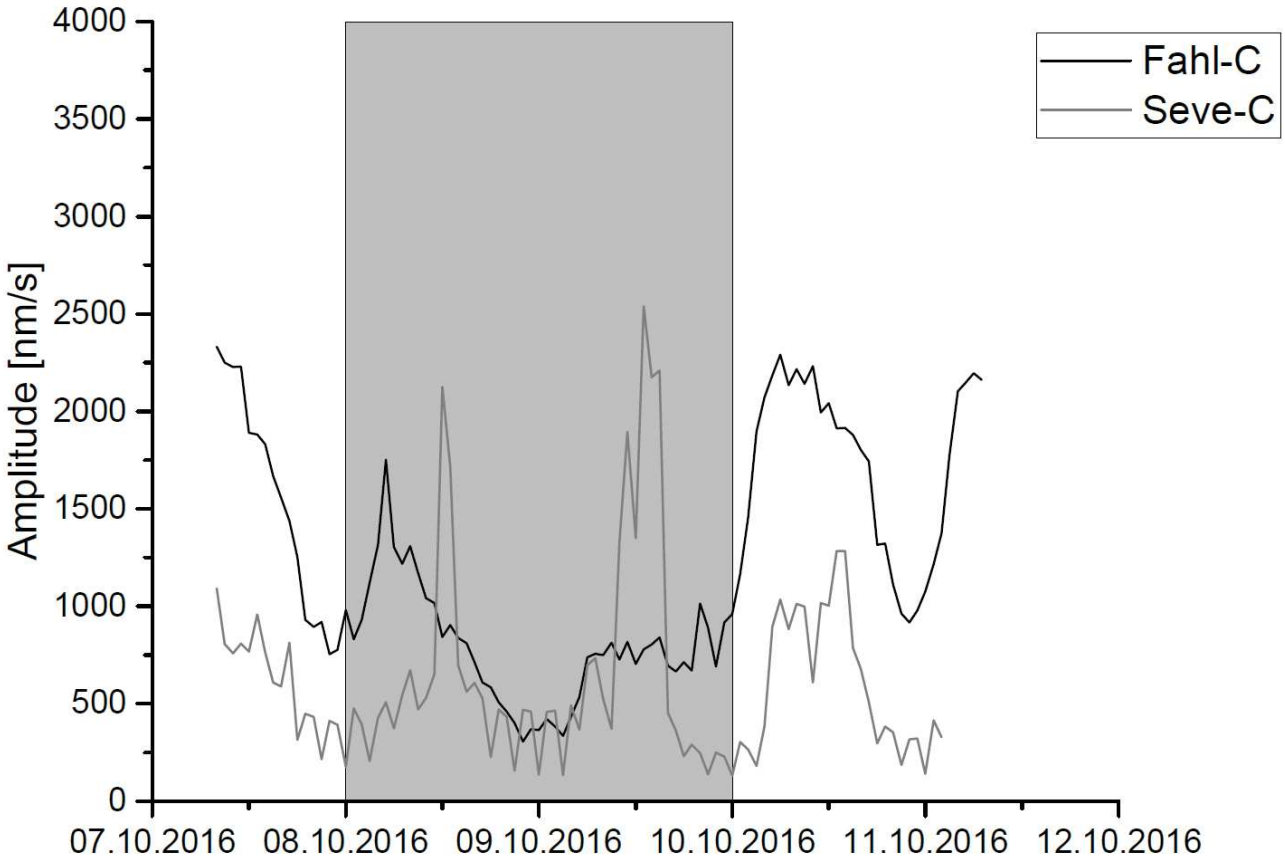


Abbildung 20. Zeitlicher Verlauf der registrierten Bodenunruhe (Stundenwerte des *I95*-Amplitudenintervalls) an den BGR-Stationen FAHL und SEVE. Die Wochenendtage sind grau hinterlegt.

Die Abbildung 20 zeigt den zeitlichen Verlauf der registrierten Bodenunruhe (Stundenwerte des *I95*-Amplitudenintervalls) für den Messzeitraum vom 07.10.2016 bis 11.10.2016. Die gemessenen Rauschamplituden an der Station SEVE schwanken zwischen ca. 200-250 nm/s (Wochenende, nachts) und maximal ca. 2500 nm/s tagsüber. Die Station FAHL weist insgesamt höhere Rauschamplituden auf, die nachts bei ca. 300 nm/s und tagsüber bei maximal ca. 2300 nm/s liegen.

Die Station FAHL weist allerdings einen insgesamt höheren Rauschpegel als die Station SEVE auf (Abbildung 20). Vergleicht man die ermittelten stündlichen Amplitudenwerte der Standorte S1, S2 und S3 mit denen der Stationen SEVE und FAHL, so erkennt man, dass die Station SEVE durchaus in den Nachtstunden vergleichbare Rauschamplituden zeigt (50-100 nm/s bei S1, S2, S3). Allerdings zeigt die Station SEVE sehr große Tag/Nacht-Unterschiede von über 2000 nm/s, die vor allem an den Standorten S1 und S3 mit ca. 800 nm/s deutlich geringer sind. Die Abbildung 21 zeigt den Vergleich der Standorte S1, S2 und S3 mit den Stationen FAHL und SEVE für den Messzeitraum vom 07.10.2016 bis 11.10.2016 (vgl. Abbildung 17 und Abbildung 20).

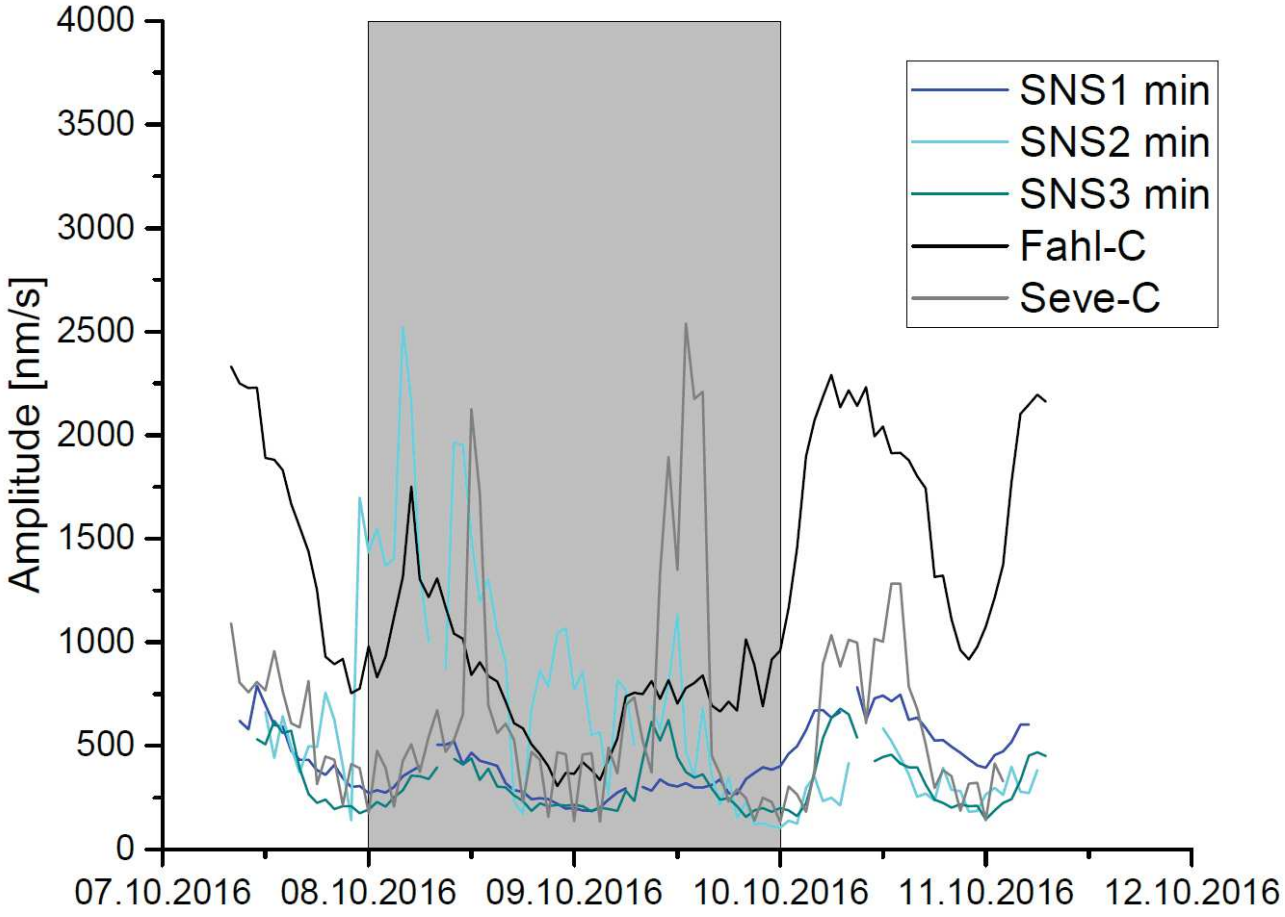


Abbildung 21. Zeitlicher Verlauf der registrierten Bodenunruhe (Stundenwerte des *I95*-Amplitudenintervalls) an den Standorten S1, S2 und S3 sowie den BGR-Stationen FAHL und SEVE. Die Wochenendtage sind grau hinterlegt (vgl. Abbildung 17 und Abbildung 20).

3.4 Registrierte Seismizität

Während des Messzeitraumes vom 07.10.2016 bis 11.10.2016 konnte durch manuelles Screenen der erhobenen Daten keine Seismizität (lokal, regional, global) erfasst werden. Daraufhin wurde ein globaler Ereigniskatalog zusammengestellt, anhand dessen konkret nach Ereignissen in den registrierten Daten gesucht wurde. Der Ereigniskatalog umfasst alle vom European Mediterranean Seismological Centre (EMSC, www.seismicportal.eu) gelisteten lokalen und regionalen Ereignisse mit Magnituden von $M_L > 2.0$ sowie alle globalen Ereignisse mit Magnituden von $M_L > 5.0$, die potentiell registriert hätten können. Die in Frage kommenden Ereignisse sind in Tabelle 3 gelistet.

Datum / UTC	Latitude	Longitude	Distanz (km)	Tiefe (km)	Magnitude	Region
07.10.16 07:46	42,9	13,25	1.136	8	3,3	CENTRAL ITALY
07.10.16 09:25	45,19	18,3	1.120	6	4,1	CROATIA
07.10.16 09:42	47,6	11,02	612	2	2,6	AUSTRIA REGION
07.10.16 12:18	-56,69	-141,41	18.033	10	5	PACIFIC-ANTARCTIC RIDGE
08.10.16 00:33	40,96	22,78	1.714	7	4,1	GREECE
08.10.16 04:37	-36,11	-100,95	14.346	10	5,3	SOUTHEAST OF EASTER ISLAND
08.10.16 08:15	42,78	13,2	1.174	10	3,2	CENTRAL ITALY
08.10.16 12:19	42,75	13,18	1.177	9	3,6	CENTRAL ITALY
08.10.16 18:11	42,74	13,19	1.179	11	3,9	CENTRAL ITALY
08.10.16 18:10	19,98	146,79	10.993	2	5,5	MARIANA ISLANDS REGION
08.10.16 21:37	43,8	8,35	1.001	24	3,4	LIGURIAN SEA
08.10.16 22:25	-14,92	-174,38	15.797	10	5	SAMOA ISLANDS
09.10.16 04:42	42,74	13,2	1.179	10	3,7	CENTRAL ITALY REGION
09.10.16 06:21	39,0	27,73	2.141	8	4	WESTERN TURKEY
09.10.16 12:04	38,23	20,22	1.866	2	3,9	GREECE
09.10.16 12:48	62,41	2,25	1.124	2	4,7	NORWEGIAN SEA
09.10.16 16:48	-22,91	-174,71	16.682	10	5,1	TONGA REGION
09.10.16 23:03	36,03	2,68	1.914	10	3,9	NORTHERN ALGERIA
10.10.16 08:35	-15,32	-174,9	15.838	10	5,6	TONGA
10.10.16 11:20	49,5	-0,37	700	0	2,9	FRANCE
10.10.16 13:16	-15,33	-175,31	15.837	15	5,1	TONGA
10.10.16 15:40	51,5	16,26	569	1	3,2	POLAND

Tabelle 3. Ereignisliste potentiell registrierter lokaler, regionaler und teleseismischer Erdbeben (Quelle: EMSC).

Die angegebenen Herdparameter wurden genutzt, um die entfernungsabhängige Energieabnahme und somit die theoretischen Einsätze und Amplituden seismischer Wellenphasen zu berechnen.

Anschließend wurde zu den berechneten Zeitfenstern in den registrierten Daten nach kohärenten Signalen gesucht. Auch diese intensive Analyse blieb leider erfolglos, wodurch die mögliche lokale Detektionsempfindlichkeit für seismische Signale nicht anhand registrierter Ereignisse abgeschätzt werden kann.

Die Abbildung 22 verdeutlicht plausibel die Tatsache, dass keines der in Tabelle 3 gelisteten Ereignisse registriert werden konnte. Die von den in Frage kommenden Erdbeben höchsten zu erwartenden Amplituden (ca. 100 nm/s) hätten durch das Ereignis vom 09.10.2016 12:48 UTC (Norwegen, M_L = 4.7, Entfernung zu SNS1 ca. 1.124 km) registriert werden können. Aus der Abbildung 22 wird ersichtlich, dass dieses Erdbeben tagsüber stattfand, in einem Zeitraum, wo die Bodenunruhe durch lokale anthropogene Aktivitäten erhöht ist. In der Nacht vom 09.10.2016 auf den 10.10.2016 hätte das Ereignis wahrscheinlich in den Registrierungen identifiziert werden können, auch wenn die berechneten Amplituden einem Signal-Rausch-Verhältnis von 1 entsprechen und das Ereignis somit an der lokal erreichbaren Detektionsschwelle liegt.

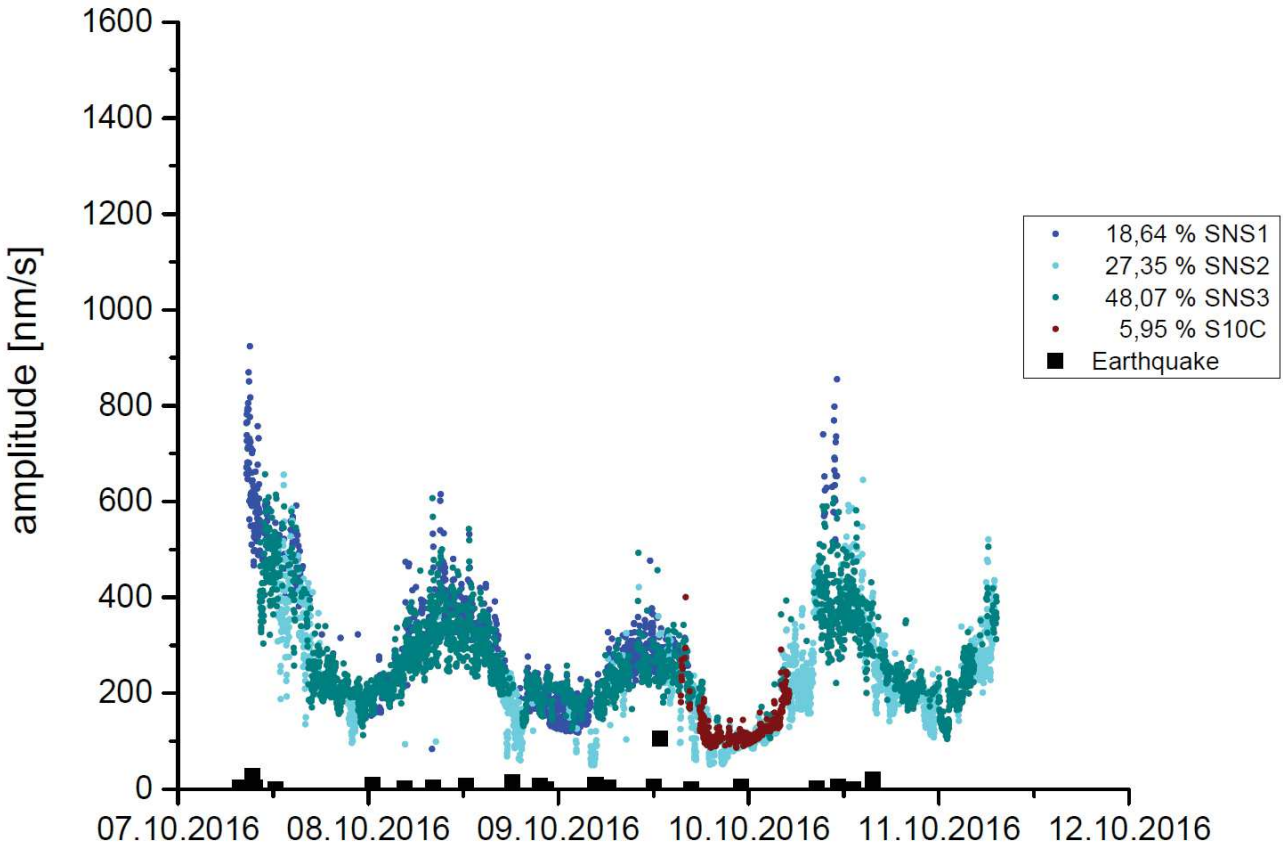


Abbildung 22. Zeitlicher Verlauf der niedrigsten registrierten Bodenunruhe an allen Standorten (Minutenwerte des *I95*-Amplitudenintervalls, vgl. Abbildung 19) sowie die berechneten Amplituden der in Tabelle 3 gelisteten Erdbeben.

3.5 Abschätzung der lokalen Detektionsempfindlichkeit

Die Abschätzung der erreichbaren, lokalen Detektionsempfindlichkeit erfolgt ausschließlich über die Analyse der an den Standorten registrierten Bodenunruhe, da während des Messzeitraumes keine Seismizität registriert werden konnte. Die geringsten Rauschamplituden mit Werten kleiner als 100 nm/s (Wochenende, nachts) wurden an den Standorten S2 und S10 registriert. Da einzelne Werte der Rauschamplituden (Minutenwerte, vgl. Abb. 19 und 22) statistische Ausreißer darstellen und nicht die Situation über einen längeren Zeitraum repräsentieren, wurde der Amplitudenwert von 100 nm/s als Schwellwert angenommen. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Rauschbedingungen an mehreren Standorten im Untersuchungsgebiet, zumindest während der Nachtstunden, anzutreffen sind.

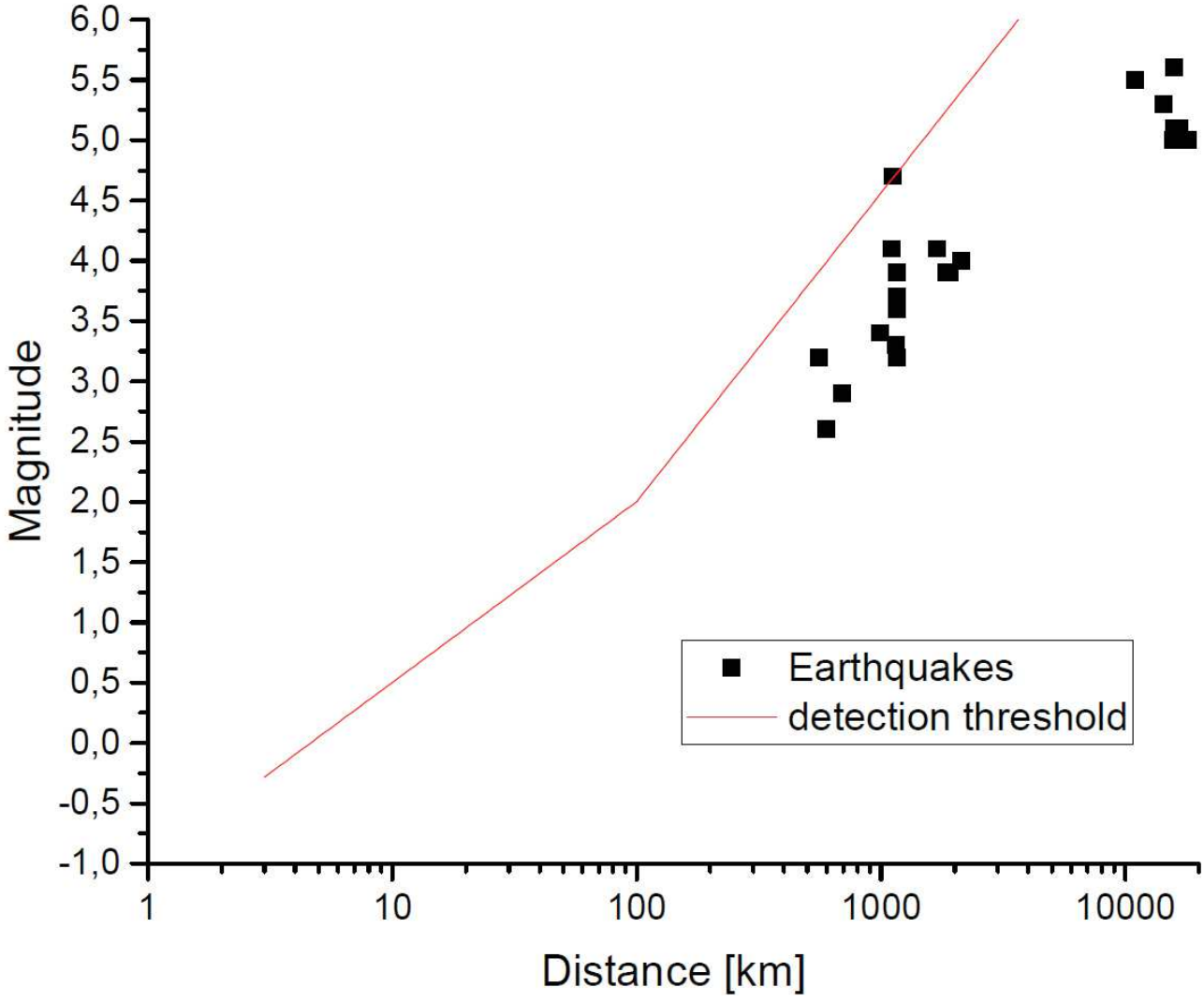


Abbildung 23. Ermittelte Detektionsschwelle für seismische Ereignisse in Abhängigkeit ihrer Magnitude und Entfernung (rote Linie) sowie die nicht registrierten Erdbeben aus Tabelle 3 (schwarze Punkte).

Die Abbildung 23 zeigt die an die registrierten Rauschamplituden angepasste Magnituden-Entfernungs-Korrekturkurve als Detektionsschwelle für seismische Ereignisse basierend auf einem angenommenen Signal-Rausch-Verhältnis von 1 sowie die nicht registrierten Erdbeben aus Tabelle 3. Man erkennt, dass das Erdbeben vom 9.10.2016 12:48 UTC (Norwegen, $M_L = 4.7$, Entfernung zu SNS1 ca. 1.124 km) direkt auf der Detektionsschwelle liegt. Somit sind die Analysen der registrierten Bodenunruhe und deren Umrechnung zu Magnituden von seismischen Ereignissen in Abhängigkeit ihrer Entfernung in sich konsistent (vgl. Abbildung 22).

Zur Abschätzung der lokalen Detektionsempfindlichkeit innerhalb des Untersuchungsgebietes wurde eine hypozentrale Entfernung eines Ereignisses zu einem mit einem seismischen Array instrumentierten Standort von 5 km angenommen. Aus Abbildung 23 folgt bei einem angenommenen Signal-Rausch-Verhältnis von 1 eine Detektionsschwelle von Magnitude $M_L \approx 0.0$. Bei einer angenommenen Hypozentraldistanz von 10 km liegt die lokale Detektionsschwelle für seismische Ereignisse bei $M_L \approx 0.5$.

4. Zusammenfassung

Die vorliegende Machbarkeitsstudie hat gezeigt, dass bei einer intensiven Standortsuche eine lokale seismische Detektionsempfindlichkeit von $M_L \approx 0.0$ im Untersuchungsgebiet Goldenstedt/ Visbek für seismische Ereignisse erreicht werden kann. Die im Rahmen dieser Studie untersuchten Standorte wiesen allerdings zum Teil starke Tag/Nacht- bzw. Wochentag/Wochenend-Unterschiede auf, so dass für eine dauerhafte seismische Überwachung vorab längere Registrierungen im Rahmen einer erweiterten Standortsuche vorgeschlagen werden. Dennoch konnten Standorte gefunden werden, die deutlich ruhiger sind, als in der Nähe befindliche seismische Stationen der BGR.

Derzeit wird das Gebiet in Norddeutschland durch die BGR sowie durch den Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V. (BVEG) seismisch überwacht. Obwohl das bestehende seismische Netzwerk von der BVEG nach Westen erweitert wurde, liegt das Untersuchungsgebiet im Randbereich des aktuellen Netzwerks. Das von der BGR bzw. dem Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) betriebene Netzwerk weist im Untersuchungsgebiet eine relativ geringe Stationsdichte auf. Lediglich die Stationen SEVE und FAHL befinden sich innerhalb des zu untersuchenden Areals, weisen aber deutlich schlechtere Bodenunruheverhältnisse auf (Abbildung 21). Da die Stationen der BGR und des BVEG Einzelstationen darstellen, bedarf es eines größeren Signal-Rausch-Verhältnisses, um schwache, lokale Erdbeben detektieren zu können. Außerdem erlaubt eine Einzelstation keine Lokalisierung eines Ereignisses, so dass eine ruhige Einzelstation keine Aussagen über die Detektionsempfindlichkeit des Netzwerks zulässt. Es kann aus den

genannten Gründen davon ausgegangen werden, dass die Detektionsschwelle beider seismischer Netzwerke für das Areal Goldenstedt/Visbek bei einer Magnitude von ca. M_L = 1.5 liegt, was durch das schwächste, bisher registrierte Ereignis (M_L = 1,9 am 05.06.2016) plausibel erscheint. Die im Rahmen dieser Studie ermittelte erreichbare lokale Detektionsempfindlichkeit von $M_L \approx 0.0$ ist um einen Faktor ~30 besser.