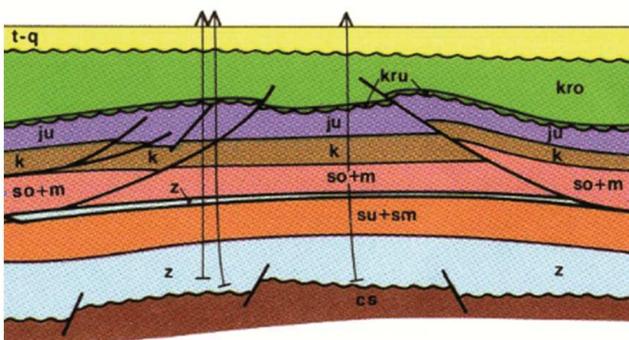
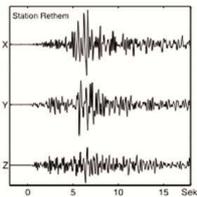


Monika Bischoff
Christian Bönemann
Lars Ceranna
Joachim Fritz
Nicolai Gestermann
Michael Pasternak
Thomas Plenefisch

Kurzbericht zum Erdbeben bei Emstek (Landkreis Cloppenburg) am 19.12.2014

Seismologische Auswertung



Hannover, Mai 2015

Abbildung Frontseite

Seismogramm einer Erdbebenmessstation (Beispiel)

Ausschnitt aus:

Geologischer Schnitt 97/5 Geotektonischer Atlas von Nordwestdeutschland 1:300.000, Baldschuhn et al. 1996 Farbflächencodierung: Karbon = braun, Zechstein = blau, unterer + mittlerer Buntsandstein = orange, oberer Buntsandstein + Muschelkalk = rot, Keuper = hellbraun, unterer Jura = violett, Unterkreide = dunkelgrün, Oberkreide = hellgrün, Tertiär + Quartär = gelb. Dreiecke an der Oberfläche mit feinen senkrechten Linien nach unten zeigen schematisch Ansatzpunkt und Verlauf der Erdgasbohrungen im Erdgasfeld Goldenstedt / Visbek, der Fußpunkt zeigt das Tiefenniveau der Erdgaslagerstätte im Basisbereich des Zechstein.

Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
(LBEG)

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
(BGR)

Kurzbericht
zum Erdbeben bei
Emstek (Landkreis
Cloppenburg) am 19.12.2014

Seismologische Auswertung

Sachbearbeiter: Monika Bischoff¹, Christian Bönnemann², Lars Ceranna²,
Joachim Fritz¹, Nicolai Gestermann², Michael Pasternak¹,
Thomas Plenefisch²

¹ LBEG, ² BGR

Datum: Mai 2015

Seiten: 24

Anhang: 1

TK 25: 3114, 3115, 3215

Archiv-Nr.:

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Zusammenfassung	6
1. Einleitung	7
2. Geologie im Bereich des Epizentrums	8
3. Erdgaslagerstätte Goldenstedt / Visbek	10
4. Erdbeben bei Emstek am 19.12.2014, M_L 3,1	12
4.1 Bisherige Seismizität im Raum Cloppenburg	12
4.2 Instrumentelle Auswertung	14
4.3 Auswirkungen an der Erdoberfläche	19
5. Bewertung der Ergebnisse	20
Literaturverzeichnis	22
Anhang 1: Kurzform der Europäischen Makroseismischen Skala EMS-98	23
Anhang 2: Tabelle der verwendeten Stationen	24

Zusammenfassung

Das Epizentrum des leichten Erdbebens am 19.12.2014 um 05:12 Uhr Ortszeit liegt etwa 2,5 km östlich von Emstek im Landkreis Cloppenburg. Die Stärke des Erdbebens weist eine Lokalmagnitude (ML) von 3,1 auf. Die Herdtiefe wurde instrumentell mit $5,1 \text{ km} \pm 1,3 \text{ km}$ abgeschätzt. Frühere Erdbeben im Bereich des Epizentrums wurden in den Jahren 1998, 2002, 2013 und 2014 mit Lokalmagnituden (ML) bis 2,8 registriert.

Für das Erdbeben am 19.12.2014 liegen 17 Angaben zu den von der Bevölkerung verspürten Erschütterungen vor. Sie stammen vorwiegend aus der Ortschaft Emstek und beschreiben mäßig starke Erschütterungen. Aufgrund der geringen Anzahl von Meldungen kann keine detaillierte Bestimmung eines makroseismischen Epizentrums oder der Maximalintensität vorgenommen werden. Die räumliche Verteilung der Meldungen ist konsistent zur instrumentellen Auswertung.

Die Epizentren der bisher in diesem Raum registrierten fünf Ereignisse liegen unter Berücksichtigung der Bestimmungsgenauigkeit auf Basis der verfügbaren seismischen Messstationen im Bereich der Erdgaslagerstätte Goldenstedt / Visbek. Aus der Zeit vor Aufnahme der Erdgasförderung sind keine Erdbeben in dieser Region bekannt.

Im Zeitraum von etwa vier Jahren vor dem Erdbeben wurden keine Fracking-Maßnahmen in der Lagerstätte Goldenstedt / Visbek durchgeführt. Schon aufgrund des zeitlichen Abstands zum Erdbeben sind sie als Ursache für das Erdbeben am 19.12.2014 auszuschließen. Lagerstättenwasser wird im Erdgasfeld Goldenstedt / Visbek nicht versenkt, so dass hiermit zusammenhängende Prozesse ebenfalls als Ursache auszuschließen sind.

Als Ursache für das Erdbeben wird daher angenommen, dass die Druckabsenkung infolge der Erdgasproduktion zur Veränderung des Spannungsfeld im tiefen Untergrund führt. Erhöhte Spannungen können durch die Reaktivierung vorhandener tektonischer Störungen impulsartig durch ein seismisches Ereignis abgebaut werden. Im Bereich des Epizentrums vom 19.12.2014 sind tektonische Störungen bekannt, deren Richtungen mit der instrumentell bestimmten Ausrichtung der Bruchfläche übereinstimmen. Es kann daher angenommen werden, dass eine Störung eines NNW-SSO bzw. NNO-SSW-streichenden Störungssystems aktiviert worden ist. Das Erdbeben am 19.12.2014 ist sehr wahrscheinlich auf die Erdgasförderung im Erdgasfeld Goldenstedt / Visbek zurückzuführen.

1. Einleitung

Am 19.12.2014 um 05:12 Uhr Ortszeit ereignete sich bei Emstek im Landkreis Cloppenburg im Bereich der Erdgaslagerstätte Goldenstedt / Visbek ein leichtes Erdbeben mit der Lokalmagnitudo (M_L) 3,1. Das Erdbeben wurde von der örtlichen Bevölkerung im Epizentrum als deutliche Erschütterung wahrgenommen. Makroseismische Meldungen gingen aus Entfernungen vom instrumentell bestimmten Epizentrum bis 13 km ein und beschreiben mäßig starke Erschütterungen.

Die erste Information über das Erdbeben erreichte den Niedersächsischen Erdbebendienst (NED) im Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) über ein automatisches Alarmsystem. Ebenso erreichte sie den seismologischen Bereitschaftsdienst des Seismologischen Zentralobservatoriums (SZO) der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), mit dem eine enge fachliche Kooperation besteht. Die manuelle Auswertung erfolgte umgehend. Die Ergebnisse dieser Erstauswertung wurden am selben Tag in einer Pressemitteilung veröffentlicht:

<http://www.lbeg.niedersachsen.de/aktuelles/pressemitteilungen/titel-127642.html>.

Im Vergleich zu vorherigen Beben in der Erdgasförderregion, die vergleichbar stark waren, wurden nur wenige Erschütterungen gemeldet. Auch gingen nur wenige Anfragen zu Lage, Stärke und Ursache des Bebens ein. Jedoch meldete sich bereits am frühen Morgen eine Anwohnerin auf dem Bereitschaftstelefon des SZO. Vier Medienanfragen von einer Presseagentur und von Regionalzeitungen wurden ebenso beantwortet.

Eine detaillierte Auswertung und eine ausführliche Bewertung des Erdbebens am 19.12.2014 bei Emstek werden in diesem Kurzbericht vorgelegt. Zur abschließenden Auswertung des Erdbebens werden Daten herangezogen, die nicht unmittelbar nach dem Beben zur Verfügung standen. Dies sind etwa Daten von Stationen, die noch nicht in Echtzeit an das Datenzentrum angebunden sind. Außerdem werden aufwändigere Analysen zur Genauigkeit der Lokalisierung sowie zur Bestimmung des Herdmechanismus des Erdbebens durchgeführt. Dabei werden die Lage der Bruchfläche im Untergrund und der Bewegungssinn der Verschiebung auf dieser Fläche bestimmt. Ebenso kann die Auswertung der Beobachtungen aus der Bevölkerung erst nach Erfassung über den Internet-Fragebogen erfolgen.

Eine bewertende Übersicht der Seismizität in Norddeutschland mit Schwerpunkt auf Erdgasförderregionen gibt der frühere Bericht zum Erdbeben bei Völkersen (Bischoff et al., 2013). Dort sind die auch hier verwendeten Auswertemethoden genauer erläutert. Der gesamte Erdbebenkatalog im Gebiet der Erdgasförderung wird erstmals im Jahresbericht 2014 veröffentlicht. Beide Berichte werden auf der Internet-Seite des NED im LBEG (<http://www.lbeg.niedersachsen.de/Erdbebendienst/>) zur Verfügung gestellt.

2. Geologie im Bereich des Epizentrums

Das Norddeutsche Becken ist Teil des Zentraleuropäischen Beckensystems. Eine Beschreibung der wesentlichen Entwicklungsphasen ist Bestandteil des Berichtes zum Erdbeben bei Völkersen am 22.11.2012 (Bischoff et al., 2013). Aufgrund besonderer geologischer und gebirgsbildender Verhältnisse innerhalb des Norddeutschen Beckens haben sich hier die Niedersächsischen Erdgaslagerstätten gebildet. Abbildung 1 zeigt die Lage der Erdgaslagerstätten im Raum Cloppenburg. Im Folgenden werden die oberflächennahe Geologie (Quartär und Tertiär) im Bereich des Epizentrums und die geologischen Horizonte des tieferen Untergrundes (Kreide, Jura, Trias, Perm) dargestellt. Abbildung 2 zeigt ein geologisches Profil.

An der Oberfläche steht der im Umfeld des Epizentrums weitverbreitete, nur wenige Meter mächtige Geschiebelehm (Quartär) an. Nördlich bis nordöstlich befinden sich – ebenso weitverbreitet – Sande und Kiese. Vereinzelt treten oberflächennah auch Beckenablagerungen (Drenthe-zeitlich) auf. In Niederungsbereichen finden sich Löss und Lösslehme. Darunter folgen flächenhaft etwa 60 m mächtige quartäre Sande, in die vereinzelt geringmächtige Beckenablagerungen aus überwiegend elsterzeitlichem Ton und Schluff eingeschaltet sind. Unterhalb folgen bis etwa 90 m bzw. 120 m Sande tertiären Alters (Pliozän). Diese werden unterlagert von tertiären, überwiegend feinsandigen Schluffen des Miozän sowie den älteren Tertiärsedimenten. Die Basis des Tertiär befindet sich in Tiefen von etwa 500 m bis 600 m unterhalb der Geländeoberfläche.

Im tieferen Untergrund folgen darunter die Festgesteine der Oberkreide, der geringmächtigen Unterkreide, des Unterjura, des Keuper, des Buntsandstein sowie des Zechstein. Die Erdgaslagerstätte hat sich in dem sogenannten Staßfurt-Karbonat gebildet, das sich im Bereich Visbek in Tiefen zwischen rund 3700 m und 4000 m befindet.

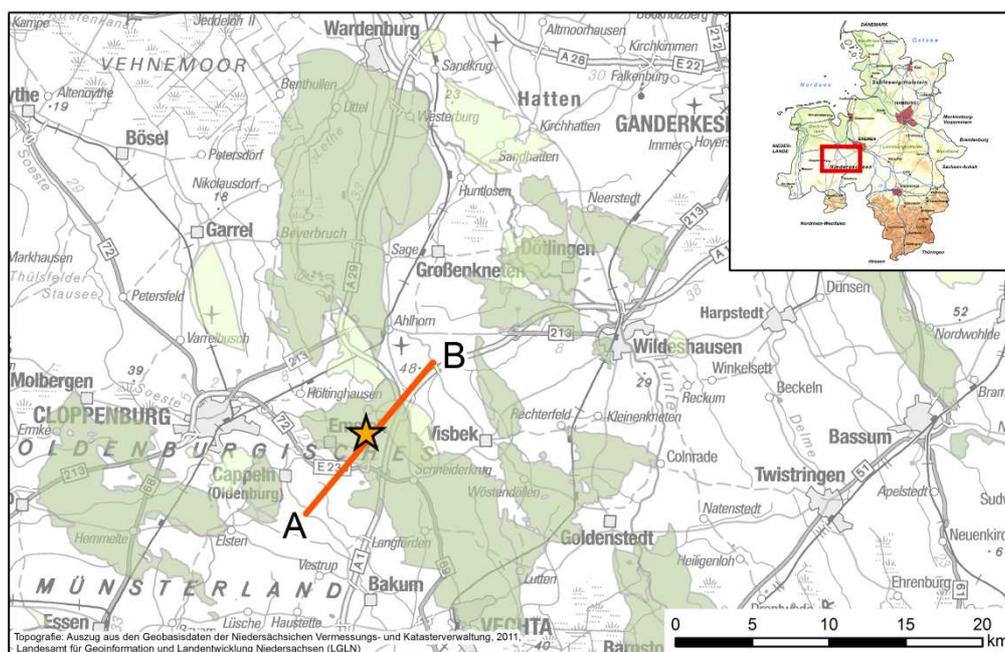
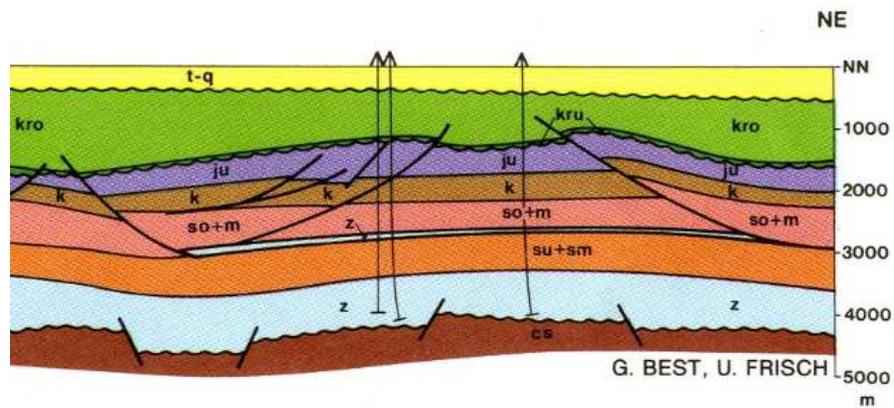


Abbildung 1: Karte der produktiven (dunkelgrün) und aufgegebenen (hellgrün) Erdgaslagerstätten und des Epizentrums des Bebens am 19.12.2014 (Stern) sowie des Verlaufs des geologischen Schnittes (rote Linie) in Abbildung 2 im Bereich der Lagerstätte Goldenstedt / Visbek.

GOLDENSTEDT-BLENHORST-L.

GOLDENSTEDT

VISBEK



Legende

t - q Tertiär - Quartär	ro Oberrotliegend
kro Oberkreide	ru Unterrotliegend
kru Unterkreide	cst Karbon, Stefan
Wd "Wealden", Bückeberg Fm.	cw Karbon, Westfal
jo Malm	cn Karbon, Namur
jm Dogger	cs Karbon, Siles
ju Lias	d Devon
k Keuper	pc Präkambrium, kristallin
ko Oberer Keuper	Störung
so+m Röt und Muschelkalk	Schichtgrenze
so+sm Röt und Mittlerer Buntsandstein	Schichtlücke
su+sm Unterer und Mittlerer Buntsandstein	Bohrung
z Zechstein	NN Normalnull

Abbildung 2: Geologisches Profil im Bereich der Lagerstätte Goldenstedt / Visbek (vgl. Abbildung 1): Ausschnitt aus Geologischer Schnitt 97/5 -Geotektonischer Atlas von Nordwestdeutschland 1:300.000 (Baldschuhn et al. 1996). Schematisch dargestellt sind Ansatzpunkte (Dreiecke) und Verlauf (feine senkrechte Linien) von Erdgas-Bohrungen im Erdgasfeld Goldenstedt / Visbek. Die Bohrungen enden bei etwa 4000 m unter Gelände im Tiefenniveau der Erdgaslagerstätte im Staßfurt-Karbonat des Zechstein.

3. Erdgaslagerstätte Goldenstedt / Visbek

Die Erdgaslagerstätte Goldenstedt / Visbek wurde mit den Explorationsbohrungen Goldenstedt Z5 im Jahre 1962 und Visbek Z3 im Jahre 1967 in den Gesteinsschichten des Zechstein in einer Tiefe von annähernd 4000 m u. NN entdeckt. Die Lagerstätte konnte sich an dieser Stelle vor Jahrmillionen bilden, weil hier eine geologische Fallenstruktur ausgebildet ist. Das in den Kohleflözen des Oberkarbon generierte Erdgas sammelte und reicherte sich im Porenraum darüber liegender Gesteine des Zechstein an. Überlagernde abdichtende Gesteinsschichten, insbesondere Salze, verhindern ein Weiterwandern des Erdgases in höher liegende Schichten und sorgen dauerhaft für die Abschirmung der Lagerstätte gegen die höher liegenden Gesteinsschichten und die Atmosphäre.

Der Zechstein ist in dieser Region als eine zyklische Abfolge von Tonsteinen, Anhydriten, Karbonaten und Salzen ausgebildet. An der Basis des zweiten Zyklus ist ein bis zu etwa 150 m mächtiges und z.T. gut poröses Karbonatgestein, das sogenannte Staßfurt-Karbonat, entwickelt. Dieses Staßfurt-Karbonat stellt in der Erdgaslagerstätte Goldenstedt / Visbek das Reservoirgestein dar.

Hinsichtlich der geologischen Fallenstruktur handelt es sich um eine strukturelle Falle, die z.T. von tektonischen Störungen begrenzt wird, aber auch durch zahlreiche tektonische Störungen zergliedert ist.

Seit dem Fund im Jahre 1962 wurden etwa 40 Bohrungen zur weiteren Erkundung und Ausförderung der Lagerstätte abgeteuft. Die regelmäßige Förderung von Erdgas wurde nach dem Bau der erforderlichen obertägigen Betriebsanlagen 1972 aufgenommen. Die jährliche Fördermenge erreichte 1999 ihr Maximum von fast 2,2 Mrd. m³. Mit dieser Fördermenge lag die Lagerstätte damals auf Platz 2 der Rangliste der förderstärksten inländischen Erdgasfelder. In der Folgezeit nahm die Fördermenge ab. In 2014 betrug sie knapp 1,1 Mrd. m³. Insgesamt wurden bis heute ca. 62 Mrd. m³ Gas aus der Lagerstätte gefördert. Ende des Jahres 2014 standen 23 Fördersonden in Produktion. In Abbildung 3 sind die jährlichen Produktionsmengen der Lagerstätte seit 1972 graphisch aufgetragen.

Bedingt durch die Tiefenlage der Lagerstätte stand das Erdgas ursprünglich unter einem Druck von mehreren hundert Bar. Bei der Förderung von Erdgas macht man sich das Ausdehnungsbestreben des Gases zu Nutze. Aufgrund dieses Bestrebens fließt das Gas im Porenraum des Gesteins dem Bohrloch zu und wird über das Bohrloch an die Oberfläche geführt. Mit der Entnahme des Erdgases nimmt der Druck innerhalb der Lagerstätte immer weiter ab. Im Reservoirgestein sowie letztendlich auch in den Gesteinen in der räumlichen Umgebung der Lagerstätte werden durch den Druckabfall Spannungsänderungen hervorgerufen, die zu seismischen Ereignissen führen können.

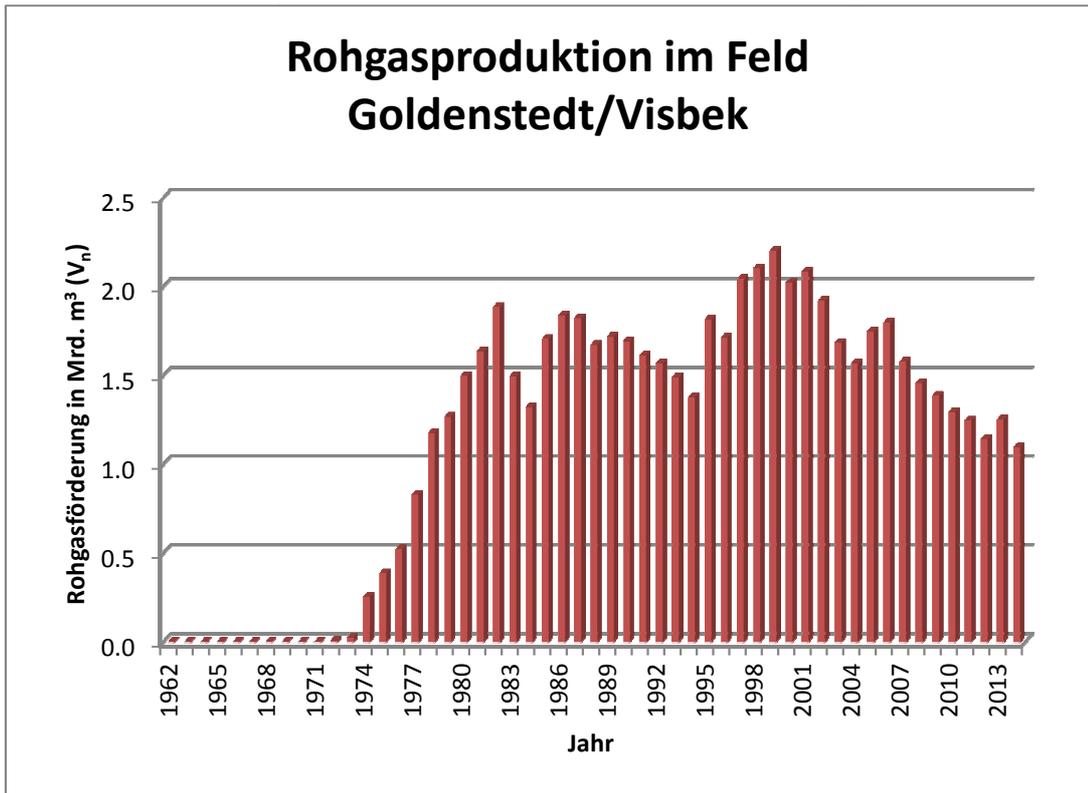


Abbildung 3: Jährliche Produktionsmengen von Rohgas aus der Lagerstätte Goldenstedt / Visbek von 1972 bis 2014.

4. Erdbeben bei Emstek am 19.12.2014, M_L 3,1

4.1 Bisherige Seismizität im Raum Cloppenburg

Bereits vor dem Erdbeben am 19.12.2014 bei Emstek wurde im Großraum Cloppenburg Seismizität aufgezeichnet. Abbildung 4 zeigt die Lage der instrumentell registrierten Erdbeben seit Beginn der Aufzeichnung 1977. Insgesamt wurden in diesem Gebiet 10 Erdbeben erfasst (Tabelle 1). Die Magnituden der Ereignisse liegen zwischen M_L 2,1 und 3,1. Das erste Beben ereignete sich 1993 und wurde ca. 10 km nordwestlich von Cloppenburg lokalisiert. Seit 1998 beginnt sich im Norden der Erdgaslagerstätte Goldenstedt / Visbek eine räumliche Häufung von Ereignissen abzuzeichnen.

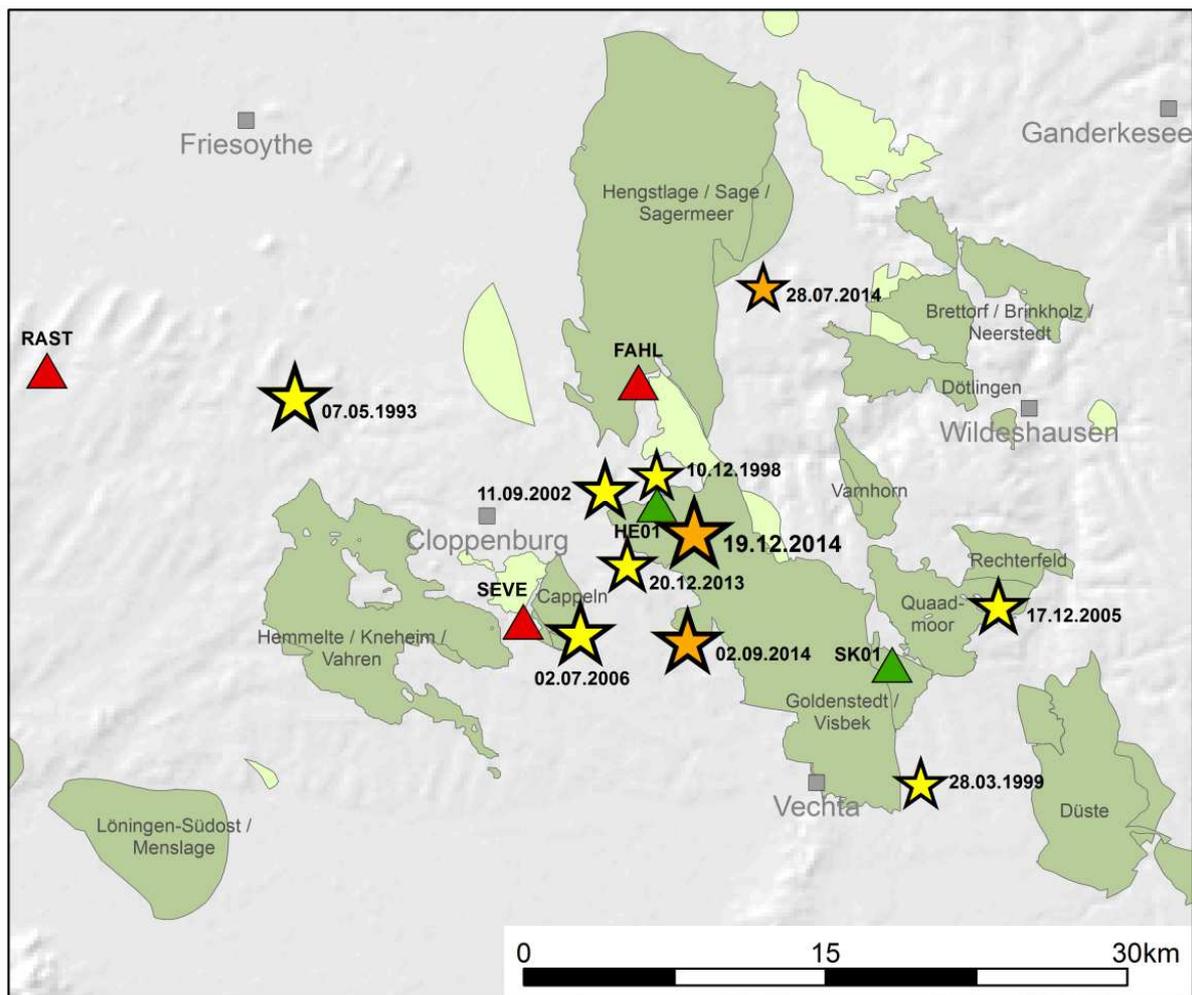


Abbildung 4: Karte der instrumentell registrierten Erdbeben (Sterne) im Raum Cloppenburg, der 2014 installierten Stationen der BGR (rote Dreiecke) und der Universität Münster (grüne Dreiecke) und der Erdgaslagerstätten in Förderung (dunkelgrün) sowie der aufgegebenen (hellgrün). Epizentren, die mit Unterstützung von Aufzeichnungen aus den 2014 installierten Stationen ermittelt wurden, sind orange markiert. Das stärkste Beben hatte eine Magnitude (M_L) von 3,1 und ereignete sich am 19.12.2014.

Datum (Lokalzeit)	Herdzeit (Lokalzeit)	geogr. Breite [°Nord]	geogr. Länge [°Ost]	Herdtiefe [km]	Magnitude M _L
19.12.2014	05:12:31	52,84	8,20	5,1	3,1
02.09.2014	02:12:09	52,79	8,19	5 f	2,8
28.07.2014	22:03:46	52,95	8,25	5 f	2,1
20.12.2013	20:57:00	52,83	8,15	5 f	2,4
02.07.2006	16:37:38	52,80	8,11	2 f	2,8
17.12.2005	12:56:58	52,81	8,42	5 f	2,5
11.09.2002	01:01:46	52,86	8,13	2 f	2,6
28.03.1999	22:32:51	52,73	8,37	3 f	2,2
10.12.1998	01:21:33	52,87	8,17	2 f	2,2
07.05.1993	18:19:47	52,90	7,90	-	2,9

Tabelle 1: Herdparameter der im Raum Cloppenburg instrumentell registrierten Erdbeben seit 1977. Mit „f“ markierte Herdtiefen wurden nicht invertiert, sondern für die Lokalisierung des Epizentrums festgesetzt. Seit 1993 wurden 10 Beben mit Lokalmagnituden (M_L) 2,1 bis 3,1 registriert.

Durch die Installation von zusätzlichen seismischen Stationen in 2014 wurde die Überwachung deutlich verbessert. Die seitdem registrierten Beben konnten mit Genauigkeiten der Epizentren (einfache Standardabweichung) von ± 2 km bestimmt werden (Abbildung 4). Für frühere Beben müssen geringere Genauigkeiten von ± 5 km, im Einzelfall ± 10 km angenommen werden, so dass eine Zuordnung zu einzelnen Lagerstätten nicht immer möglich ist.

4.2 Instrumentelle Auswertung

Am 19.12.2014 um 05:12 Uhr Ortszeit (19.12.2014, 04:12 UTC) ereignete sich nahe der Ortschaft Emstek im Landkreis Cloppenburg ein Erdbeben mit der Lokalmagnitude (M_L) 3,1.

Registrierungen

Die durch das Erdbeben am 19.12.2014 bei Emstek angeregten seismischen Wellen wurden instrumentell von zahlreichen Stationen verschiedener Messnetze (Deutsches Regionalnetz GRSN, Bergschadenkundliches Beweissicherungs-System BBS des Wirtschaftsverband Erdöl- und Erdgasgewinnung e.V. (WEG), temporäre Stationen der Universität Münster und der Universität Stuttgart, Stationsnetze von Landeserdbebendiensten) aufgezeichnet. Sie konnten noch an Stationen in über 300 km Entfernung registriert werden (Abbildung 5). Die zeitliche Verzögerung der Einsatzzeiten der seismischen Wellen mit zunehmender Entfernung veranschaulicht deren Ausbreitung durch den Untergrund. Abbildung 6 zeigt beispielhaft das Seismogramm der Station FAHL in 8 km Entfernung zum Epizentrum.

Lokalisierung

Zur Lokalisierung wurden 18 P- und 9 S-Einsatzzeiten mithilfe des Programms LocSat, basierend auf einem regionalen Geschwindigkeitsmodell bezüglich der Herdkoordinaten, invertiert. Bei der Auswahl der verwendeten Einsatzzeiten wurde auf eine gleichmäßige azimutale Abdeckung geachtet (Abbildungen 7 und 8). Das Epizentrum wurde mit einer horizontalen Genauigkeit von 1,3 km im nördlichen Teil der Erdgaslagerstätte Goldenstedt / Visbek lokalisiert. Die Herdtiefe liegt mit 5,1 km \pm 1,3 km im Niveau der Erdgasförderung.

<i>Datum:</i>	19.12.2014	
<i>Herdzeit:</i>	04:12:31 UTC	
	05:12:31 MEZ, Ortszeit	
<i>Instrumentelles Epizentrum:</i>	52,84°N	8.20°E
<i>Lokalisierungsgenauigkeit horiz.:</i>	\pm 1,3 km	
<i>Herdtiefe:</i>	5,1 km	
<i>Lokalisierungsgenauigkeit vertikal:</i>	\pm 1,3 km	
<i>Magnitude:</i>	3,1 \pm 0,4	

Tabelle 2: Instrumentell bestimmte Herdparameter und Genauigkeiten (einfache Standardabweichung) des Erdbebens am 19.12.2014 bei Emstek.

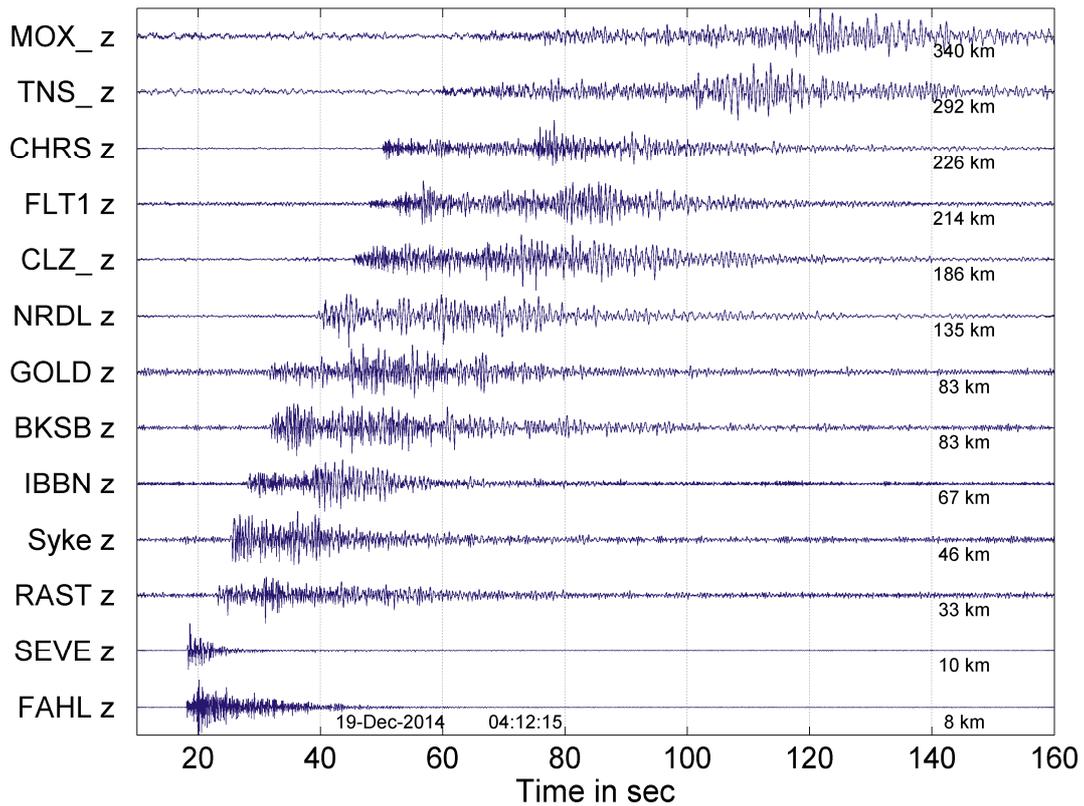


Abbildung 5: Seismische Registrierungen ausgewählter Stationen für Epizentralentfernungen bis 340 km. Dargestellt sind die auf das Maximum an der jeweiligen Station normierten vertikalen Bodenschwingungsgeschwindigkeiten. Koordinaten und Orte der Stationen enthält Anhang 2.

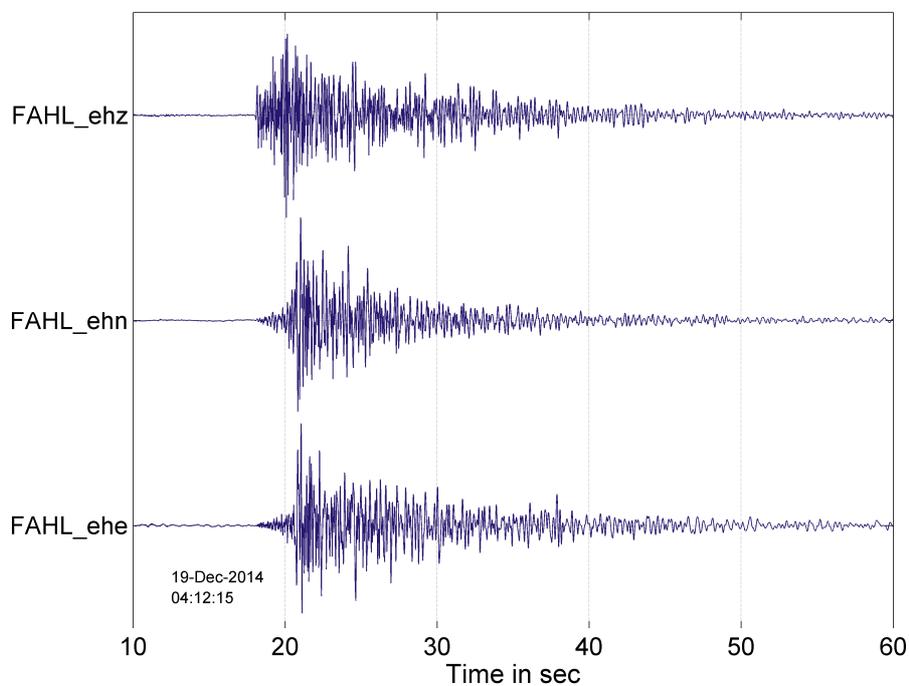


Abbildung 6: Seismische Registrierung an der Station FAHL 8 km nördlich des Epizentrums. Dargestellt sind die auf das Maximum an der jeweiligen Komponente normierten vertikalen (FAHL_ehz) und horizontalen (FAHL_ehn, FAHL_ehe) Bodenschwingungsgeschwindigkeiten.

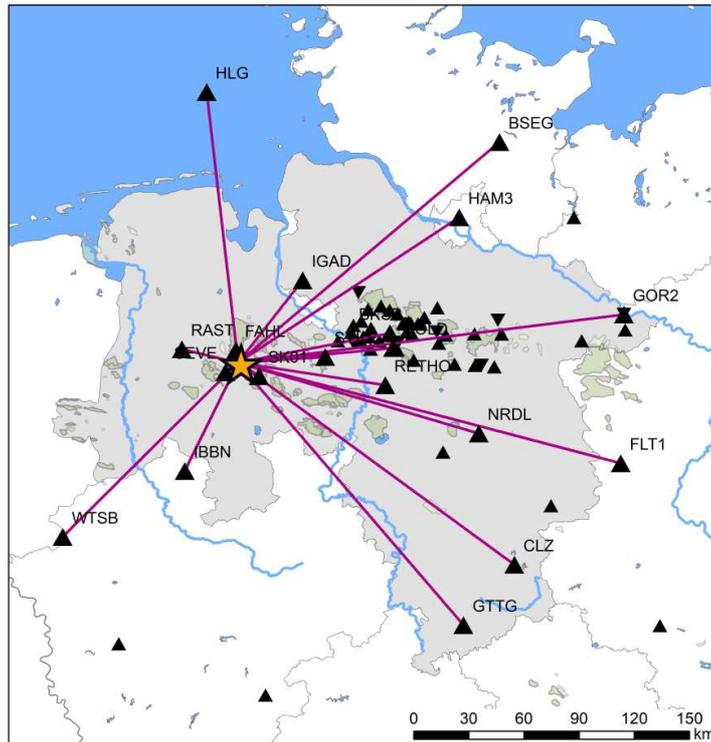


Abbildung 7: Karte der seismischen Stationen in Nordwestdeutschland (Dreiecke) und auf die Erdoberfläche projizierte Laufwege (Linien) der seismischen Wellen vom Epizentrum (Stern) zu den zur Lokalisierung verwendeten Stationen, Erdgaslagerstätten in grün dargestellt.

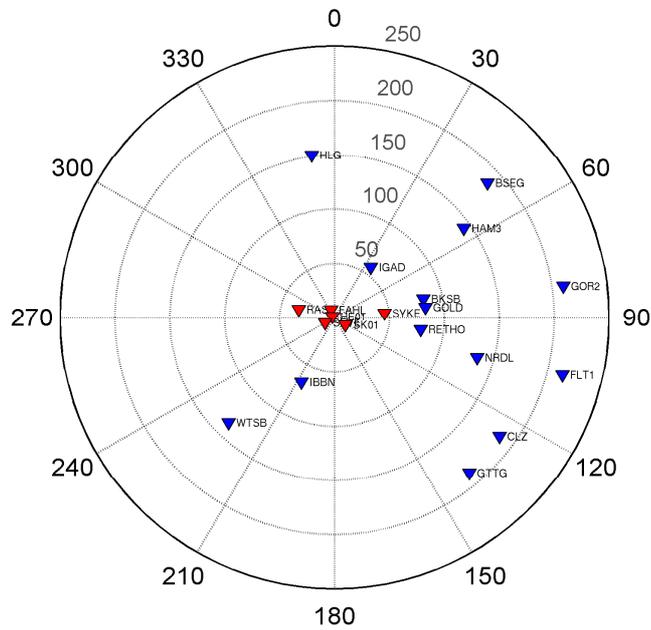


Abbildung 8: Polardiagramm der richtungs- und entfernungsabhängigen Verteilung der Stationen, die zur Lokalisierung des Bebens am 19.12.2014 verwendet werden, relativ zum Epizentrum (Koordinatenursprung). Die rot markierten Stationen wurden 2014 installiert und verbessern die Überwachungssituation im Westen deutlich.

Herdmechanismus

Zur Bestimmung des Herdmechanismus wurden die Polaritäten der als Erstes ankommenden P-Phase an 19 Stationen im Epizentralabstand zwischen 2 und 70 km ermittelt und als Eingabe für die Berechnung mit dem Programm FOCMEC (Snoke et al., 2003) verwendet. Die Schar der Herdflächenlösungen, die aus der Berechnung folgt, steht in Einklang mit den beobachteten Polaritäten. Sie zeigt einen Abschiebungsmechanismus mit einem geringen Blattverschiebungsanteil (Abbildung 9a). Solche Abschiebungsmechanismen sind bereits für vorangegangene, wahrscheinlich induzierte Erdbeben im Bereich der norddeutschen Erdgasfelder berechnet worden (z.B. Syke, 01.05.2014; Völkersen, 22.11.2012). Sie sind diejenigen Mechanismen, die in einem Extensionsregime bei der Entleerung von Erdgasfeldern zu erwarten sind (z.B. Segall et al., 1994). Ein repräsentativer Herdmechanismus aus der Schar der Lösungen in Abbildung 9a ist in Abbildung 9b in Form eines sogenannten Beachballs wiedergegeben, bei dem die unterschiedlich gefärbten Quadranten die Bereiche von Kompression (schwarz) bzw. Dilatation (weiß) markieren. Die Verschiebungsfläche, die aus der Herdflächenlösung folgt, ist entweder NNW-SSO oder NNO-SSW ausgerichtet.

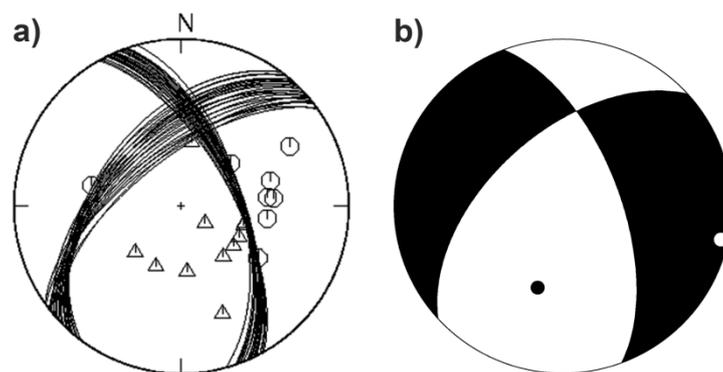


Abbildung 9: Berechnete Herdmechanismen. a) Positionen der Stationen in stereographischer Projektion auf der unteren Herdhalbkugel. Sie sind entsprechend der Polarität der Ersteinsätze der P-Welle markiert (Kreis = Kompression, Dreieck = Dilatation). Dargestellt ist auch die Schar der Nodalflächen, die mit diesen Eingabedaten in Einklang stehen. b) Repräsentativer Herdmechanismus in Form eines „Beachballs“ (schwarz = Kompression, weiß = Dilatation). Für die lokalisierte Herdtiefe von 5,1 km ergibt sich ein Abschiebungsmechanismus mit Blattverschiebungskomponente auf einer NNW-SSO oder NNO-SSW-streichenden Bruchfläche.

Abbildung 10 zeigt das Streichen der aus dem Geotektonischen Atlas (Baldschuhn et al., 2001) bekannten Störungen an der Zechsteinbasis. Auffällig sind verschieden orientierte Störungssysteme nördlich und südlich des Epizentrums. Die Störungen südlich des Epizentrums streichen vorwiegend NW-SO. Die nördlichen Störungen streichen jedoch NNW-SSO bzw. NNO-SSW. Alle diese Richtungen sind in Norddeutschland weitverbreitet. Die Richtungen nördlich des Epizentrums (NNW-SSO bzw. NNO-SSW) stimmen gut mit denen aus der Herdflächenlösung überein. Möglicherweise setzen sich diese Störungen weiter nach Süden

fort, als sie im Geotektonischen Atlas (Baldschuhn et al., 2001; Abbildung 10) auskartiert sind. Es kann angenommen werden kann, dass bei dem Erdbeben am 19.12.2014 eine Störung dieses NNW-SSO bzw. NNO-SSW-streichenden Störungssystems aktiviert worden ist.

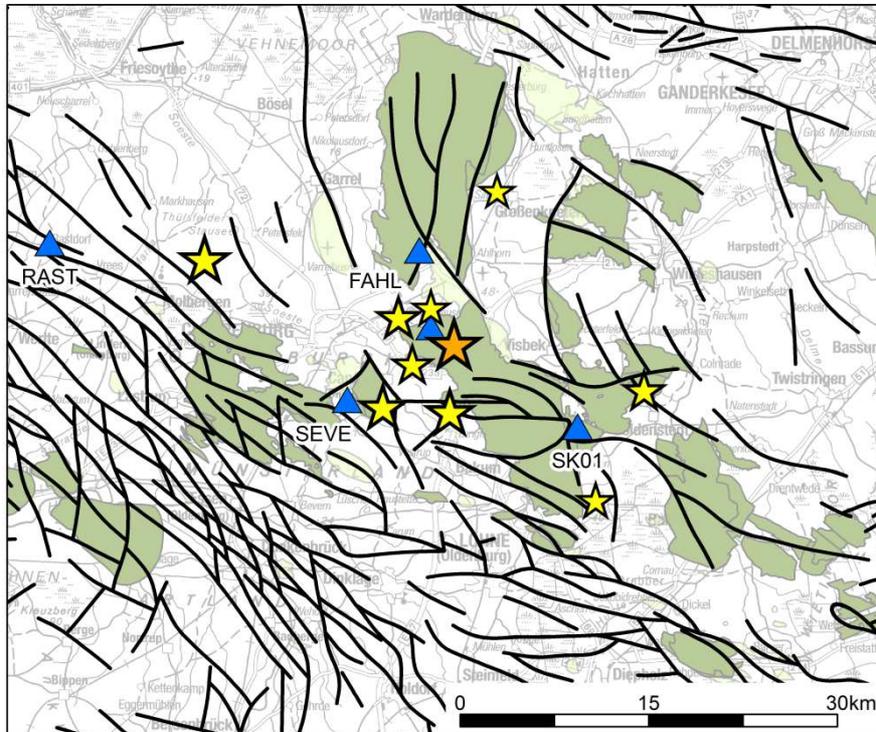


Abbildung 10: Epizentren (Sterne), seismische Stationen (Dreiecke) und Störungszonen an der Basis des Zechstein (schwarze Linien) nach Geotektonischer Atlas 3D (LBEG, 2013) im Umfeld der produktiven (dunkelgrün) und aufgegebenen (hellgrün) Erdgasfelder im Raum Cloppenburg. Das Epizentrum des Ereignisses am 19.12.2014 ist orange gekennzeichnet.

4.3 Auswirkungen an der Erdoberfläche

Makroseismische Auswertung

Das Erdbeben wurde von der örtlichen Bevölkerung deutlich verspürt. Dies ermöglicht in der Regel eine zusätzliche Bestimmung des Epizentrums. Diese ist von den Messdaten unabhängig, da sie auf makroseismischen Meldungen basiert, d.h. den Erschütterungsmeldungen aus der Bevölkerung. Aufgrund der geringen Anzahl von Meldungen kann hier jedoch keine detaillierte Bestimmung eines makroseismischen Epizentrums oder der Maximalintensität vorgenommen werden. Die Auswirkungen des Erdbebens an der Oberfläche werden daher zusammenfassend beschrieben.

Insgesamt gingen über den Fragebogen des LBEG, der im Internet bereitgestellt wird (<http://nibis.lbeg.de/makroseismik/>), 19 makroseismische Meldungen ein. Zwei Erschütterungsmeldungen aus Rinteln etwa 100 km vom Epizentrum entfernt sind nicht auf das Erdbeben zurückzuführen. Die übrigen 17 Meldungen stammen aus den Ortschaften Emstek, Cappeln, Halen, Visbek, Ahlhorn und Großenkneten aus Epizentralentfernungen bis 13 km (Abbildung 11). Die Auswirkungen werden als leichte bis mäßig starke Erschütterungen, in einem Fall als starke Erschütterung beschrieben. Einige wenige Meldungen von geringen Schäden an Wohnhäusern gingen beim Betreiber des Erdgasfeldes ExxonMobil Production Deutschland GmbH ein. In keinem Fall konnte ein gemeldeter Schaden unzweideutig auf das Erdbeben zurückgeführt werden.

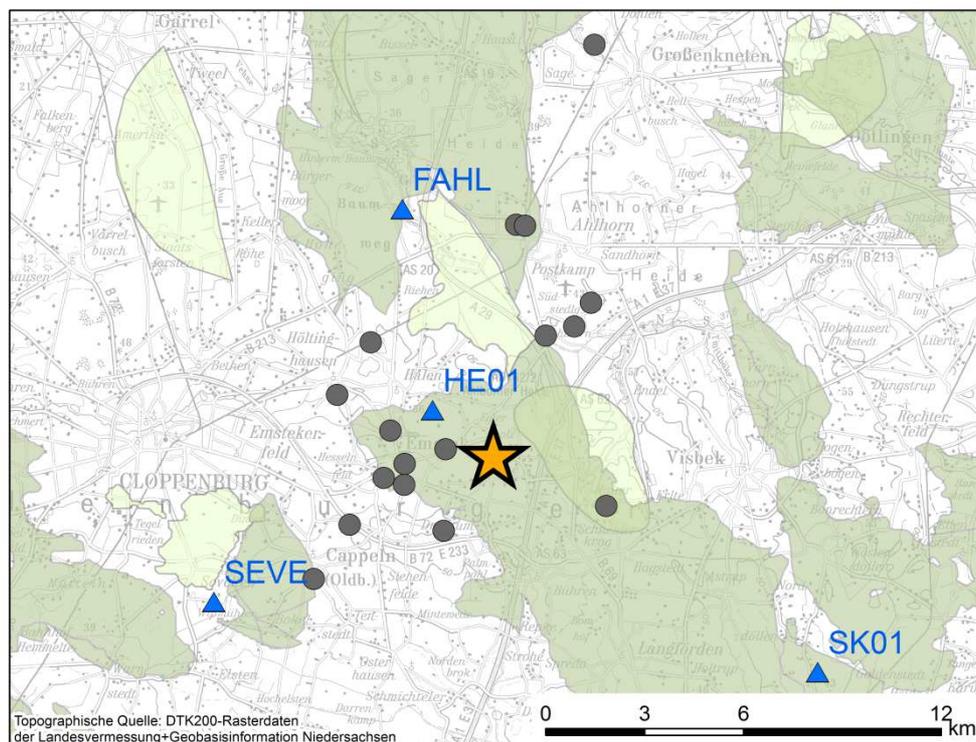


Abbildung 11: Karte der 19 eingegangenen makroseismischen Meldungen (Punkte) und des instrumentell bestimmten Epizentrums (Stern) sowie der produktiven (dunkelgrün) und aufgegebenen (hellgrün) Erdgaslagerstätten.

5. Bewertung der Ergebnisse

Das Erdbeben am 19.12.2014 um 05:12 Uhr (Lokalzeit) bei Emstek im Landkreis Cloppenburg wird im nördlichen Bereich der Erdgaslagerstätte Goldenstedt / Visbek lokalisiert. Die Meldungen aus der Bevölkerung über Erschütterungswahrnehmungen des Bebens stammen vorwiegend aus der Ortschaft Emstek und sind somit konsistent zur instrumentellen Auswertung. Die Herdtiefe wird instrumentell mit 5,1 km +/- 1,3 km abgeschätzt und liegt damit im Niveau des Reservoirs. Die Stärke des Erdbebens wird mit einer Lokalmagnitude (M_L) von 3,1 bewertet. Der Herdmechanismus zeigt einen für die norddeutschen Erdgasfördergebiete typischen Abschiebungsmechanismus.

Im Jahr 2014 wurde das Stationsnetz im Raum Cloppenburg durch die BGR ergänzt. Durch die zusätzlichen Stationen RAST, SEVE, FAHL, HE01 und SK01 wurde eine signifikante Verbesserung der Überwachung erreicht. Die Bestimmung der Herdparameter, vor allem der Herdtiefe, ist im Vergleich zu früheren Beben deutlich genauer. Um diese Verbesserung auch flächenhaft zu erreichen, wird ein weiterer Ausbau des Stationsnetzes angestrebt, die Standortsuche für neue seismische Stationen ist bereits angelaufen. Auch wird das Stationsnetz des Wirtschaftsverbands Erdöl- und Erdgasgewinnung e. V. (WEG) zurzeit erweitert. Die ersten Stationen befinden sich bereits im Bau.

Im nördlichen Bereich der Lagerstätte Goldenstedt / Visbek wurden bereits früher Erdbeben beobachtet, zuletzt am 02.09.2014 ein Erdbeben der Lokalmagnitude (M_L) von 2,8. Frühere Erdbeben im Bereich des Epizentrums wurden in den Jahren 1998, 2002 und 2013 mit Lokalmagnituden (M_L) bis 2,6 registriert.

Die Epizentren dieser Beben liegen innerhalb einer seismisch aktiven Region, die sich vom Raum Cloppenburg im Westen bis in die Altmark im Osten erstreckt und mit dem Gebiet der Erdgasförderung korreliert. Aufgrund der Lage der Epizentren am Rande bekannter Erdgasfelder und der lokalisierten Tiefen im Bereich der Förderhorizonte wird ein ursächlicher Zusammenhang dieser Seismizität mit der Erdgasförderung als wahrscheinlich eingestuft. Zudem konzentrieren sich die Erdbeben auf die Fördergebiete, wohingegen Regionen ohne Förderung im Vergleich keine erhöhte Seismizität aufweisen. Die Epizentren im nördlichen Teil der Erdgaslagerstätte Goldenstedt / Visbek sind Indizien dafür, dass auch der Zusammenhang zwischen der Erdgasförderung aus der Lagerstätte Goldenstedt / Visbek und den dort lokalisierten Erdbeben als „wahrscheinlich“ einzustufen ist. Da für das Erdbeben am 19.12.2014 die Tiefenlage mit einer Genauigkeit von $\pm 1,3$ km im Bereich des Förderhorizontes bestimmt werden konnte, ist der Zusammenhang mit der Erdgasförderung sogar als „sehr wahrscheinlich“ einzustufen.

Als Ursache kommt die Druckabsenkung in der Lagerstätte in Betracht. Infolge der Gasentnahme werden die gasführenden Gesteinsformationen der Lagerstätte kompaktiert. An Übergangsbereichen zu Gesteinen, die nicht oder weniger stark kompaktiert werden, führt dies zur Veränderung des Spannungsfelds im tiefen Untergrund. Solche Übergangsbereiche mit unterschiedlich starker Verformung können am Rand der Lagerstätte liegen oder un-

gleichartige Teilbereiche innerhalb der Lagerstätte voneinander abgrenzen. Wird durch den Spannungsaufbau die Scherfestigkeit des Gebirges überschritten, kann die Spannung durch die Reaktivierung vorhandener Störungen durch ein seismisches Ereignis impulsartig abgebaut werden. Zwischen dem Beginn der Förderung aus der Erdgaslagerstätte Goldenstedt / Visbek 1972 und dem ersten dort lokalisierten seismischen Ereignis 1998 besteht eine Zeitdifferenz von 26 Jahren. Dies deutet darauf hin, dass sich Spannungen im Untergrund über viele Jahre akkumulieren können, ehe sie seismisch freigesetzt werden. Weitere Erdbeben in der Größenordnung bisher beobachteter Stärke sind daher nicht auszuschließen.

Weiterhin ist festzustellen, dass die letzten Fracking-Maßnahmen in der Lagerstätte Goldenstedt / Visbek im Oktober 2010 durchgeführt wurden. Schon aufgrund des zeitlichen Abstands sind sie als Ursache für das Erdbeben am 19.12.2014 daher auszuschließen. Lagerstättenwasser wird im Erdgasfeld Goldenstedt / Visbek nicht versenkt, so dass hiermit zusammenhängende Prozesse ebenfalls als Ursache auszuschließen sind.

Literatur

Baldschuhn, R., Binot, F., Fleig, S., Kockel, F., 2001: Geotektonischer Atlas von Nordwestdeutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor. Geologisches Jahrbuch, A 153, Stuttgart (Schweizerbart), 95 S.

Baldschuhn, R., Frisch, U., Kockel, F., 1996: Geotektonischer Atlas von NW-Deutschland 1:300.000. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover

Bischoff, M., Bönnemann, C., Fritz, J., Gestermann, N., Plenefisch, T., 2013: Untersuchungsergebnisse zum Erdbeben bei Völkersen (Landkreis Verden) am 22.11.2012. LBEG / BGR. Hannover, 60 S.

Grünthal, G. (Hrsg.), 1998: European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98). Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie 15, Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxembourg, 99 S.

LBEG, 2013: Geotektonischer Atlas 3D (GTA3D) - Das geologische 3D-Modell von Niedersachsen auf Basis des Geotektonischen Atlas, <http://nibis.lbeg.de/cardomap3/>.

Segall, P., Grasso, J.R. Mossop, A., 1994. Poroelastic stressing and induced seismicity near the Lacq gas field, southwestern France. J. Geophys. Res., 99, 15,423-15,438.

Snoke, J. A., 2003. FOCMEC: FOcal MEchanism determinations, International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology (W. H. K. Lee, H. Kanamori, P. C. Jennings, and C. Kisslinger, Hrsg.). Academic Press, San Diego, Chapter 85.12. <http://www.geol.vt.edu/outreach/vtso/focmec/>.

Anhang 1

Kurzform der Europäischen Makroseismischen Skala EMS-98 (Grünthal et al. 1998). Sie stellt eine sehr starke Vereinfachung und Generalisierung der ausführlichen Fassung dar. Diese Kurzform ist ausdrücklich nicht dafür geeignet, um einzelnen Beobachtungen Intensitäten zuzuordnen.

EMS Intensität	Definition	Beschreibung der maximalen Wirkungen (stark verkürzt)
I	nicht fühlbar	Nicht fühlbar
II	kaum bemerkbar	Nur sehr vereinzelt von ruhenden Personen wahrgenommen.
III	Schwach	Von wenigen Personen in Gebäuden wahrgenommen. Ruhende Personen fühlen ein leichtes Schwingen oder Erschüttern.
IV	Deutlich	Im Freien vereinzelt, in Gebäuden von vielen Personen wahrgenommen. Einige Schlafende erwachen. Geschirr und Fenster klirren, Türen klappern.
V	Stark	Im Freien von wenigen, in Gebäuden von den meisten Personen wahrgenommen. Viele Schlafende erwachen. Wenige werden verängstigt. Gebäude werden insgesamt erschüttert. Hängende Gegenstände pendeln stark, kleine Gegenstände werden verschoben. Türen und Fenster schlagen auf oder zu.
VI	leichte Gebäudeschäden	Viele Personen erschrecken und flüchten ins Freie. Einige Gegenstände fallen um. An vielen Häusern, vornehmlich in schlechterem Zustand, entstehen leichte Schäden wie feine Mauerrisse und das Abfallen von z. B. kleinen Verputzteilen.
VII	Gebäudeschäden	Die meisten Personen erschrecken und flüchten ins Freie. Möbel werden verschoben. Gegenstände fallen in großen Mengen aus Regalen. An vielen Häusern solider Bauart treten mäßige Schäden auf (kleine Mauerrisse, Abfall von Putz, Herabfallen von Schornsteinteilen). Vornehmlich Gebäude in schlechterem Zustand zeigen größere Mauerrisse und Einsturz von Zwischenwänden.
VIII	schwere Gebäudeschäden	Viele Personen verlieren das Gleichgewicht. An vielen Gebäuden einfacher Bausubstanz treten schwere Schäden auf; d. h. Giebelteile und Dachsimse stürzen ein. Einige Gebäude sehr einfacher Bauart stürzen ein.
IX	zerstörend	Allgemeine Panik unter den Betroffenen. Sogar gut gebaute gewöhnliche Bauten zeigen sehr schwere Schäden und teilweisen Einsturz tragender Bauteile. Viele schwächere Bauten stürzen ein.
X	sehr zerstörend	Viele gut gebaute Häuser werden zerstört oder erleiden schwere Beschädigungen.
XI	verwüstet	Die meisten Bauwerke, selbst einige mit gutem erdbebengerechtem Konstruktionsentwurf und -ausführung, werden zerstört.
XII	vollständig verwüstet	Nahezu alle Konstruktionen werden zerstört.

Anhang 2

Tabelle der verwendeten Stationen. Angegeben sind die Koordinaten und die Orte der Stationen, die im Bericht nur mit ihrem Stationsnamen genannt sind.

Stationsname	geogr. Breite (° Nord)	geogr. Länge (° Ost)	Ort
BKSB	52.99	9.40	Klein Sehlingen
BSEG	53.94	10.32	Bad Segeberg
CHRS	51.61	10.82	Christianenhaus
CLZ	51.84	10.37	Clausthal-Zellerfeld
FAHL	52.91	8.15	Ahlhorn
FLT1	52.33	11.24	Flechtingen
GOLD	52.92	9.43	Goldborn
GOR2	53.07	11.30	Laase
GTTG	51.55	9.96	Göttingen
HAM3	53.57	9.97	Hamburg
HE01	52.85	8.17	Emstek
HLG	54.18	7.88	Helgoland
IBBN	52.31	7.76	Ibbenbüren
IGAD	53.26	8.69	Garlstedt
MOX	50.64	11.62	Moxa
NRDL	52.49	10.11	Hänigsen
RAST	52.91	7.72	Rastdorf
RETHO	52.74	9.36	Rethem
SEVE	52.80	8.07	Sevelten
SK01	52.78	8.34	Lutten
SYKE	52.88	8.88	Syke
TNS	50.22	8.45	Königstein im Taunus
WTSB	51.97	6.80	Winterswijk (NL)