Monika Bischoff Lars Ceranna Joachim Fritz Nicolai Gestermann Thomas Plenefisch



Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Untersuchungsergebnisse zum Erdbeben bei Syke (Landkreis Diepholz) am 01.05.2014

Seismologische Auswertung





Hannover, Juni 2014

Abbildung Frontseite

Seismogramm einer Erdbebenmessstation (Beispiel)

Ausschnitt aus:

Geologisches 3D-Modell von Niedersachsen mit Epizentrum des Erdbebens vom 01.05.2014 (Stern gelb)

Farbflächencodierung = Basis Zechstein - blau = Hochlagen, gelb=Tieflagen; gelbe Linien = Störungen in Basis Zechstein; Blaue Linien = Störungen im Deckgebirge (Trias); grau/weiß =Salzstöcke; magenta Erdgasfelder (Bildmitte E-Feld Klosterseelte).

Die Anwendung ist über folgenden Link erreichbar:

http://nibis.lbeg.de/cardomap3/

- Menüpunkte im NIBIS ® KARTENSERVER:

- Auswertung 3D-Modell

Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG)

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

Untersuchungsergebnisse

zum Erdbeben bei

Syke (Landkreis

Diepholz) am 01.05.2014

Seismologische Auswertung

Sachbearbeiter:	Monika Bischoff ¹ , Lars Ceranna ² ,	
	Joachim Fritz ¹ , Nicolai Gestermann ² ,	
	Thomas Plenefisch ²	
	¹ LBEG, ² BGR	
Datum:	Juni 2014	
Seiten:	33	
Anhang:	2	
TK 25:	3018, 3019, 3118, 3119	
Archiv-Nr.:		

Inhaltsverzeichnis

Inhal	Inhaltsverzeichnis		
Zusa	mmenfassung	6	
1.	Einleitung	7	
2.	Geologie Norddeutschlands	8	
3.	Erdgaslagerstätte Klosterseelte / Kirchseelte / Ortholz		
4.	Seismizität in Norddeutschland		
5.	Das Erdbeben bei Syke am 01. Mai 2014	16	
5.1	Instrumentelle Auswertung	16	
5.2	Auswirkungen an der Erdoberfläche	23	
6.	Bewertung der Ergebnisse	28	
Litera	aturverzeichnis	29	
Anhang 1: Kurzform der Europäischen Makroseismischen Skala EMS-98			

Anhang 2: Arbeiten im Feldesteil Kosterseelte von Februar bis Mai 201431

Zusammenfassung

Das Epizentrum des leichten Erdbebens vom 01.05.2014 um 10:30 Uhr Ortszeit liegt etwa 5 km südwestlich von Syke im Landkreis Diepholz. Die Stärke des Erdbebens weist eine Lokalmagnitude (M_L) von 3,2 auf. Die Herdtiefe wurde instrumentell mit 4,2 km abgeschätzt. In dieser Region ereigneten sich bereits am 15. Juli 2005 ein Erdbeben mit M_L 3,8 sowie zwei Wochen später am 30. Juli 2005 ein Erdbeben mit M_L 2,2. Für die Erdbeben vom 15.07.2005 und dem 01.05.2014 liegen zahlreiche Angaben zu den von der Bevölkerung verspürten Erschütterungen vor. Grundlage der Untersuchungen des Erdbebens bei Syke bilden zum einen die instrumentellen seismologischen Daten von Bund, Ländern, Universitäten und der Industrie, zum anderen die Beobachtungen aus der Bevölkerung (Makroseismik).

Aus 131 von der Bevölkerung ausgefüllten Erdbebenfragebögen zum Ereignis vom 01.05.2014 konnte ein von den instrumentellen Daten unabhängiges makroseismisches Epizentrum bestimmt werden. Mit einem Abstand von 3,6 km stimmt es gut mit dem instrumentell bestimmten Epizentrum überein. Die Auswertung der Fragebögen zur Bestimmung der Intensitäten erfolgt entsprechend der Europäischen Makroseismischen Skala EMS-1998 (Grünthal et al., 1998). Die Kurzversion dieser zwölfteiligen Intensitätsskala ist in Anhang 1 dargestellt. Danach konnte für das Erdbeben vom 01.05.2014 eine Intensität von IV bis V ermittelt werden. In vier Fragebögen wurden leichte Gebäudeschäden gemeldet.

Die Epizentren der bisher in diesem Raum registrierten drei Ereignisse liegen unter Berücksichtigung der Bestimmungsgenauigkeit auf Basis der verfügbaren seismischen Messstationen sehr nahe beieinander und in der unmittelbaren räumlichen Nähe zum Feldesteil Klosterseelte der Erdgaslagerstätte Klosterseelte / Kirchseelte / Ortholz. Aus der Zeit vor Aufnahme der Erdgasförderung sind keine Erdbebenereignisse in dieser Region bekannt.

Im Zeitraum von etwa zwei Monaten vor dem Erdbeben haben Arbeiten an Bohrungen im Feldesteil Klosterseelte stattgefunden. Nach Einschätzung der Art der durchgeführten Arbeiten und dem z.T. großen zeitlichen Abstand zum Erdbeben ist davon auszugehen, dass diese Arbeiten mit hoher Wahrscheinlichkeit keinen Eingriff darstellen, der die Induzierung von Erdbeben zur Folge haben könnte.

Als Ursache für das Erdbeben wird daher angenommen, dass durch die Druckabsenkung als Folge der Erdgasproduktion Spannungen im Untergrund entstanden sind, die vorhandene tektonische Störungen reaktiviert haben. Tektonische Störungen sind als Abgrenzung der Lagerstätte bekannt. Das Erdbeben am 01.05.2014 ist sehr wahrscheinlich auf die Erdgasförderung im Feldesteil Klosterseelte zurückzuführen.

1. Einleitung

Norddeutschland ist eine Region mit sehr geringer seismischer Aktivität. Dies ist instrumentell für die Zeit seit 1977 und darüber hinaus durch den historischen Katalog, der bis in das Jahr 800 (Leydecker, 2011) zurückreicht, gut belegt. Etwa 70% aller seit 1977 aufgetretenen und instrumentell ausgewerteten Erdbeben sind im Umfeld der in werden Norddeutschland bekannten Erdgasfelder lokalisiert. Sie über das Erdgasfördergebiet von Cloppenburg im Westen bis Salzwedel im Osten beobachtet. Aufgrund der guten räumlichen Korrelation mit den Erdgasfeldern und auch der für einige Erdbeben bestimmten Herdtiefen, die sich im Tiefenbereich der Förderhorizonte bewegen, ist ein Zusammenhang von Erdbeben und Erdgasförderung wahrscheinlich. Ein rein tektonischer Ursprung für diese Beben ist unwahrscheinlich, da ansonsten auch Seismizität an Störungen im weiteren Umfeld der Erdgasfelder auftreten sollte. Ein weiteres Indiz für den erwähnten Zusammenhang betrifft die zeitliche Korrelation: erst seit Beginn der Erdgasförderung wird in den Gebieten der Erdgasfelder Seismizität beobachtet (vgl. Untersuchungsergebnisse zum Erdbeben bei Völkersen (Landkreis Verden) am 22.11.2012 (Bischoff et al., 2013).

Am 01.05.2014 um 10:30 Uhr Ortszeit ereignete sich zwischen Syke und Bassum im Landkreis Diepholz ein Erdbeben mit einer Lokalmagnitude von 3,2 (M_L), das von der örtlichen Bevölkerung deutlich verspürt wurde,. Durch die in diesem Bericht dargelegte seismologische Auswertung soll das aktuelle Erdbeben in die Seismizität der Region (Bischoff et al., 2013) eingeordnet und bewertet werden. Mit Hilfe der Messdaten der verfügbaren seismischen Stationen werden die Herdparameter Epizentrum und Herdtiefe ermittelt. Zusätzlich sollen durch die von Messdaten unabhängige Methode der makroseismischen Auswertung, der von der Bevölkerung verspürten Erschütterungen, eine Verifizierung der Lage des Epizentrums erfolgen und die Auswirkungen des Erdbebens an der Oberfläche beschrieben werden. Dies ist durch die von der Bevölkerung dankenswerterweise zahlreich übersandten Erschütterungsbeobachtungen möglich.

Der vorgelegte Bericht soll auch der Frage des möglichen Zusammenhangs dieses Erdbebens mit der Erdgasförderung nachgehen. Er entstand in enger Kooperation zwischen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und dem Niedersächsischen Erdbebendienst (NED) im Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG).

2. Geologie Norddeutschlands

Die Niedersächsischen Erdgaslagerstätten haben sich auf Grund besonderer geologischer und gebirgsbildender Verhältnisse innerhalb des Norddeutschen Beckens, das Teil des Zentraleuropäischen Beckensystems ist, gebildet. Eine Beschreibung der wesentlichen Entwicklungsphasen ist bereits Bestandteil des Berichtes zum Erdbeben bei Völkersen am 22.11.2012 (Bischoff et al., 2013) und wird hier nur auszugsweise wiedergegeben und mit Darstellungen der lokalen Gegebenheiten ergänzt.

a) Geologische Entwicklung

Das Norddeutsche Becken entstand vor mehr als 300 Millionen Jahren als großräumige Senke und ist heute bis in Tiefen von mehr als 10 Kilometern durch mächtige Sedimentgesteine geprägt. Tektonische Bewegungen in verschiedenen geologischen Zeitaltern und die speziellen Eigenschaften der mächtigen Salzablagerungen haben zu erheblichen Veränderungen der Lagerungsverhältnisse der Sedimente geführt.

b) Tektonische Verhältnisse

Großräumige tektonische Dehnung (Extension) bzw. Stauchung (Kompression) führten in verschiedenen Zeitabschnitten zu Senkungen bzw. Hebungen des Sedimentbeckens. Das Gebiet senkte sich nicht gleichmäßig, sondern es bildeten sich zahlreiche kleinräumige Grabenbecken (Kockel, 1998). Hierdurch und durch die spätere Hebung (Inversion) der Teilbecken wurden die darunterliegenden Gesteine stark zergliedert. Durch die tektonische Beanspruchung wurde dieser sogenannte Sockel in Schollen unterteilt, die durch stark gestörte Bereiche (Sockelschollenfugen, Lineamente; Kockel, 1998) getrennt sind. Dies erklärt die Vielzahl von Störungen an der Basis des Zechstein, die eine "breite tektonische Schwächezone" bilden (Kockel, 1998). Großräumige tektonische Bewegungen konzentrierten sich auf Störungen im tieferen Untergrund unterhalb des Zechstein (präsalinar). Aufgrund des wechselnden Spannungsfeldes (Extension, Kompression) kam es in verschiedenen geologischen Zeitabschnitten auf denselben Störungen zu Bewegungen mit gegensätzlichem Bewegungssinn, so dass dieselben Verwerfungen zeitweise als Abschiebungen, zeitweise als Überschiebungen aktiv waren. In Abbildung 1 ist der Verlauf eines geologischen Schnittes im Bereich der Erdgaslagerstätte und dem ermittelten Epizentrum des Erdbebens vom 01.05.2014 dargestellt. Abbildung 2 zeigt den Untergrundaufbau anhand des geologischen Vertikalschnittes zwischen Bassum und Syke aus dem geologischen 3D-Modell von Niedersachsen. Schematisch ist die Teufenlage der Erdgaslagerstätte Klosterseelte / Kirchseelte / Ortholz in den Zechsteinkarbonaten zwischen den diese begrenzenden Störungen eingetragen. Durch Spannungsumlagerungen in Folge von z.B. großräumigen tektonischen Vorgängen oder eine vergleichsweise kleinräumige Erdgasförderung können Störungen reaktiviert werden.



Abbildung 1: Karte der Erdgaslagerstätten (rot) und lokaler Salzstrukturen (Salzkissen Bassum, rotpunktierte Linie; Salzintrusion des Zechsteinsalinar, magenta schraffiert; Salzstruktur Emtinghausen des Zechsteinsalinar, blau schraffiert) im Bereich des Epizentrums vom 01.05.2014 (gelber Stern). Zusätzlich dargestellt ist der Verlauf des geologischen Schnittes (blaue Linie) in Abb. 2. NIBIS Kartenserver: <u>http://nibis.lbeg.de/cardomap3/</u> > Fachprogramme > Auswertung 3D-Modell.

Abbildung 3 zeigt einen Ausschnitt aus dem Geologischen 3D-Modell von Niedersachsen, auf Basis des Geotektonischen Atlas von Nordwestdeutschland, mit dem Epizentrum des Erdbebens vom 01.05.2014. Der Ausschnitt hat in W-E-Richtung eine Ausdehnung von 56 km, in N-S-Richtung von 49 km. In Magentafarbe sind die Grenzen von Erdgasfeldern im Kartenausschnitt dargestellt (Bildmitte mit Pfeil = Erdgasfeld Klosterseelte / Kirchseelte / Ortholz). Die Darstellung zeigt das morphologische Relief der Basis der Zechsteinsedimente, in gelben Farben die morphologischen Hochlagen, in blauen Farben die morphologischen Tieflagen. Im Bereich des Epizentrums sind die Zechsteinbasis und auch die Basis der Erdgaslagerstätte Klosterseelte / Kirchseelte / Ortholz schwach nach Nordosten geneigt. Gelbe und blaue Linienelemente stellen die aus 2D-reflexionsseismischen Untersuchungen bekannten, geologischen Bewegungsflächen (tektonische Störungen) in der Zechsteinbasis (gelb) und Bewegungsflächen im Bereich oberhalb des Salzes im Deckgebirge (blau) dar (n. Geotektonischer Atlas von Nordwestdeutschland, Baldschuhn et al., 2001). Im Umfeld des Epizentrums dominieren im Bereich der Zechsteinbasis Bewegungsflächen mit N / S bzw. NW-SE-streichender Richtung und begrenzen dort auch die Erdgaslagerstätte Klosterseelte. WNW-ESE-Störungen treten ebenfalls auf. Hellblau bis graue Schattierungen stellen die Salzstöcke im weiteren nördlichen und nordöstlichen Umfeld dar.



Teufe Erdgaslagerstätte Klosterseelte (schematisch)

Abbildung 2: Geologische Schnittdarstellung (Verlauf =blaue Linie in Abb. 1) aus dem geologischen 3D-Modell von Niedersachsen bis in eine Tiefe von etwa 5 km mit schematischer Darstellung der Teufenlage der Erdgaslagerstätte Klosterseelte / Kirchseelte / Ortholz in den dortigen Karbonatgesteinen des Zechstein (hellblau). , Darüber folgen die Salze des Zechstein sowie das mesozoische Deckgebirge von Trias (dunkelrot, hellrot, braun), Jura (violett, blau) und Kreide (grün) sowie Tertiär und Quartär (ocker bis gelb). Die blaue Farbfläche stellt die in diesem Bereich vergleichsweise mächtige Salinarabfolge des Zechstein (Salzkissen Bassum) mit der Erdgaslagerstätte Klosterseelte / Kirchseelte / Ortholz in einer Teufe von ca. 4200 m dar, wobei in der Darstellung nicht zwischen Salz- und Karbonatgestein differenziert wird (vgl. Kap. 3). Darüber, im sogenannten Deckgebirge, befindet sich die Überschiebung von Bassum, an der unterer und mittlerer Buntsandstein überschoben sind.



Abbildung 3: Ausschnitt (Schrägansicht) aus Geologisches 3D-Modell von Niedersachsen auf Basis des Geotektonischen Atlas von Nordwestdeutschland mit Hypozentrum des Erdbebens vom 01.05.2014 und Topographie. Die Darstellung zeigt das morphologische Relief der Basis der Zechsteinsedimente (gelb = morphologische Hochlagen, blau = Tieflagen) in einer Tiefe von etwa 4000 m. In Magenta sind die im Modellausschnitt befindlichen Erdgaslagerstätten dargestellt (Bildmitte (Pfeil) = Erdgasfeld: Klosterseelte / Kirchseelte / Ortholz). Gelbe und blaue Linienelemente stellen geologische Bewegungsflächen (tektonische Störungen) in der Zechsteinbasis (gelb) und Bewegungsflächen (z.B. Überschiebung v. Bassum) im Bereich oberhalb des Salzes im Deckgebirge (blau) dar. Hellblau bis graue Schattierungen stellen die Salzstöcke im weiteren nördlichen und nordöstlichen Umfeld dar.

3. Erdgaslagerstätte Klosterseelte / Kirchseelte / Ortholz

Die Erdgaslagerstätte Klosterseelte / Kirchseelte / Ortholz wurde 1985 mit der Explorationsbohrung Klosterseelte Z1 in den Gesteinsschichten des Zechstein in einer Tiefe von ungefähr 4200 m u. NN entdeckt. Die Lagerstätte konnte sich an dieser Stelle bilden, weil hier eine geologische Fallenstruktur ausgebildet ist, in der sich das in den Kohleflözen des Oberkarbon generierte Erdgas im Porenraum darüber liegender Gesteine des Zechstein sammeln und anreichern konnte. Überlagernde abdichtende Gesteinsschichten, insbesondere Salze, verhinderten 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 hundert Meter mächtiges und z.T. hochporöses Karbonatgestein, das sogenannte Staßfurt-Karbonat, entwickelt. Das Staßfurt-Karbonat stellt in der Erdgaslagerstätte Klosterseelte / Kirchseelte / Ortholz das Reservoirgestein dar.

Seit dem Fund 1985 wurden bislang insgesamt neun Bohrungen zur weiteren Erkundung und Ausförderung der Lagerstätte durchgeführt. Die regelmäßige Förderung wurde nach dem Bau der erforderlichen obertägigen Betriebsanlagen 1988 aufgenommen. Die jährliche Fördermenge erreichte 2007 ihr Maximum von knapp 1,2 Mrd. m³. Mit dieser Fördermenge lag die Lagerstätte auf Platz 6 der Rangliste der förderstärksten inländischen Erdgasfelder. Bis 2013 sank die Fördermenge auf unter 0,2 Mrd. m³. Insgesamt wurden bis heute ca. 16 Mrd. m³ Gas aus der Lagerstätte gefördert. Derzeit stehen 4 Fördersonden in Produktion. In der nachfolgenden Graphik (Abb. 4) sind die jährlichen Produktionsmengen der Lagerstätte seit Ende der 1980er Jahre aufgetragen.

Bedingt durch die Tiefenlage der Lagerstätte stand das Erdgas ursprünglich unter einem Druck von mehreren hundert bar. Aufgrund der Entnahme des Erdgases nimmt der Druck innerhalb der Lagerstätte ab. Hierdurch werden im Reservoirgestein (Lagerstätte) und letztendlich auch in den Gesteinen in der räumlichen Umgebung der Lagerstätte Spannungsänderungen hervorgerufen, die grundsätzlich tektonische Störungen reaktivieren können, die wiederum zu seismischen Ereignissen führen können.

Bei der geologischen "Fallenstruktur", welche die Erdgaslagerstätte ausmacht, handelt es sich um eine Scholle, die durch Störungen, die im tieferen Untergrund (Zechsteinbasis) angelegt sind, begrenzt wird. Das Feld ist in drei Teile gegliedert.Während die Feldesteile Kirchseelte und Ortholz im Norden nicht mehr in Produktion stehen, findet im Süden (Klosterseelte) weiterhin Erdgasförderung statt.



Abbildung 4: Jährliche Rohgasproduktionsmengen der Lagerstätte Klosterseelte, Kirchseelte, Ortholz von 1985 bis 2013.

Vor dem Erdbeben am 01.05.2014 sind Arbeiten im Erdgasfeld Klosterseelte an den Bohrungen KSTS Z4a und KSTS Z6 durchgeführt worden (vgl. Beschreibung der Arbeiten Anhang 2). Dabei handelt es sich nach Angaben der ExxonMobil Production GmbH an der KSTS Z4a um den Einbau eines neuen Förderstranges (Tubing) mit geringerem Durchmesser (velocity string) und damit verbundenen notwendigen Vorarbeiten (Verdrängen von Sauergas durch 10.600 m³ Süßgas am 07.04.2014, Stopfensetzen, Reinigen des Tubing etc.) und in der Bohrung KSTS Z6 (bis 03.03.2014) um eine Teilzementation mit entsprechenden Vorarbeiten (Totpumpen). Unter dem Begriff "Totpumpen" eines Bohrloches versteht man das Einbringen von Flüssigkeit - meist beschwerter Bohrspülung - in das Bohrloch. In diesem Falle wurde zur Vorbereitung der Zementation nur Wasser in die verrohrte Bohrung eingebracht.

4. Seismizität in Norddeutschland

Der Norden Deutschlands gehört zu den Gebieten mit eher geringer Erdbebentätigkeit, seltene Erdbeben geringer Stärke wurden in der Vergangenheit vor allem im Nordosten beobachtet. Einen Überblick über die Seismizität in Norddeutschland gibt bereits der Bericht zum Erdbeben bei Völkersen am 22.11.2012 (Bischoff et al., 2013) und soll hier nicht wiederholt werden. Stattdessen konzentriert sich dieses Kapitel auf die Seismizität im Gebiet der Erdgasförderung und beschreibt den aktualisierten Erdbebenkatalog dieser Region.

Abbildung 5 zeigt die seismischen Ereignisse in Norddeutschland aus dem Zeitraum von 1/1977 bis 5/2014, die im Deutschen Erdbebenkatalog der BGR enthalten sind und auf instrumenteller Erfassung beruhen. Die Ereignisse des Katalogs werden klassifiziert nach tektonischen Ereignissen (rot), induzierten Ereignissen (gelb), Steinkohlenbergbau (weiß) und Sprengungen (braun). Die Abbildung macht deutlich, dass große Gebiete in Norddeutschland quasi erdbebenfrei sind. Die tektonischen Ereignisse ereigneten sich zum größten Teil im Nordosten. Die seismischen Ereignisse des Clusters im Südwesten (weiß) sind durch den aktiven Steinkohlenbergbau in Ibbenbüren (Breite 52,3°, Länge 7,8°) induziert. Diese Beben sind nicht Gegenstand des vorliegenden Berichts.

Auffallend ist eine Zone mit seismischen Ereignissen, die sich von Cloppenburg im Westen über eine Distanz von ca. 300 Kilometern nach Osten in die Region um Salzwedel zieht. Die Epizentren dieser Erdbeben liegen zum überwiegenden Teil an den Grenzen oder im unmittelbaren Umfeld der produktiven Erdgasfelder Norddeutschlands (in der Abbildung als blaue Flächen gekennzeichnet). Aufgrund ihrer räumlichen Nähe zu den Erdgasfeldern sind diese Ereignisse als wahrscheinlich induzierte Ereignisse eingestuft worden und im Erdbebenkatalog mit Ausnahme des Ereignisses vom 02.06.1977 bei Soltau, dessen Ursache kontrovers diskutiert wird, entsprechend markiert. Aufgrund der nicht eindeutigen Klassifizierung ist das Ereignis von Soltau im Erdbebenkatalog als tektonisches Beben ausgewiesen. Es muss aber in der Bewertung der Ereignisse im Bereich von Erdgasfeldern ebenfalls betrachtet werden.

Im Zeitraum von 1977 bis Ende 2012 konnten 33 Ereignisse im Umfeld der Erdgasfelder lokalisiert werden. Die Lokalmagnituden dieser Ereignisse reichen von 1,4 bis 4,5. Seit der Vorlage des Berichtes über die Auswertung des Erdbebens am 22.11.2012 bei Völkersen (LK Verden, Bischoff et al., 2013) im Juni 2013 hat es weitere Erdbebenereignisse mit Magnituden bis M_L 2,4 bei Cloppenburg gegeben.



Abbildung 5: Seismizität in Norddeutschland nach dem historischen Katalog seit dem Jahr 800 (Leydecker, 2011) und den instrumentell aufgezeichneten Erdbeben des Deutschen Erdbebenkatalogs der BGR von1/1977 bis 5/2014. Farblich unterschieden sind die historischen (lila) und die instrumentell erfassten tektonischen (rot) Erdbeben sowie induzierte Ereignisse im Steinkohlenbergbau (weiß), wahrscheinlich durch die Erdgasförderung induzierte Erdbeben (gelb) und Sprengungen (braun). Blaue Flächen kennzeichnen die aktiven Erdgasfördergebiete in der Region. Die stärksten Ereignisse sind mit Datum, Name und Magnitude versehen (rot-gelb = Soltau Erdbeben, vgl. Bischoff et al., 2013).

Die bedeutendsten Ereignisse sind in Abbildung 5 mit der nächstgelegenen Ortschaft, Datum und Magnitude gekennzeichnet. Das stärkste Ereignis war das Erdbeben vom 20.10.2004 in der Nähe von Rotenburg. Es hatte eine Magnitude von 4,5 und wurde bis nach Hamburg gespürt. Die nächst stärkeren sind das bereits erwähnte Ereignis bei Soltau vom 02.06.1977 mit einer Magnitude von 4,0 und das Ereignis bei Syke vom 15.07.2005 mit einer Magnitude von 3,8.

5. Das Erdbeben bei Syke am 01.05.2014

5.1 Instrumentelle Auswertung

Das Erdbeben am 01.05.2014 um 08:29 Uhr (UTC) bei Syke wurde instrumentell registriert. Die erste Auswertung erfolgte automatisch wenige Minuten nach dem Erdbeben, durch das an der BGR entwickelte und dort seit vielen Jahren zuverlässig eingesetzte Alarmsystem ALISE, das über Beben in Deutschland ab Magnitude 3 in nahezu Echtzeit informiert. Durch eine Kurzmitteilung wurde der seismologische Bereitschaftsdienst über das Epizentralgebiet im Raum Syke sowie die Stärke des Bebens alarmiert, so dass die manuelle Überprüfung der Meldung, die Bestätigung des Erdbebens und die verbesserte Auswertung zeitnah erfolgen konnten. Die erste vorläufige Lokalisierung zwischen Syke und Bassum und die Stärke des Bebens von M_L 3,1 wurden am 01.05.2014 bzw. am 02.05.2014 über Pressemitteilungen der BGR und des LBEG veröffentlicht. Die detaillierte Auswertung und eine eingehendere Bewertung werden im Folgenden vorgestellt.

Instrumentell wurde das Erdbeben bis Süddeutschland in Entfernungen bis 650 km registriert. Abbildung 6 zeigt beispielhaft die drei-Komponenten-Registrierung an der Station DEEL. Abbildung 7 zeigt Registrierungen der Vertikalkomponenten ausgewählter Seismometerstationen bis in eine Entfernung von etwa 400 km. Zur Auswertung stehen Daten des deutschen Regionalnetzes GRSN und zusätzliche Stationen der BGR in der Erdgasförderregion zur Verfügung, die in Echtzeit an das Seismologische Zentralobservatorium (SZO) der BGR übertragen werden und schon in der ersten berücksichtigt Bergschadenkundlichen Auswertung wurden. Daten des Beweissicherungssysten (BBS) des WEG und Daten des Geologischen Dienstes aus Nordrhein-Westfalen wurden nachträglich in die Datenbank integriert.

Zur Lokalisierung wird ein 1D-Modell für Norddeutschland verwendet, so dass in der Auswertung nur die Stationen Norddeutschlands berücksichtigt werden (Abb. 8). Die nördlichste der verwendeten Stationen ist HLG auf Helgoland, die südlichsten sind BUG (Bochum), KAST (Kahler Asten) und GTTG (Göttingen) in Entfernungen zwischen 150 km und 200 km. Trotz dieser großen Entfernungen tragen diese Stationen wesentlich zur Lokalisierung bei, da sie die azimutale Überdeckung nach Norden und Süden gewährleisten. Die einzige Station westlich des Epizentrums ist RAST (Rastdorf) in 70 km Entfernung, die seit Januar 2014 durch die BGR betrieben wird und hier eine große Beobachtungslücke schließt. Zahlreiche Registrierungen liegen aus nordöstlicher bis östlicher Richtung vor, da das Erdgasfördergebiet östlich von Bremen seit 2012 durch eine Vielzahl von Seismometern überwacht wird. Zum einen wurde Ende 2012 das BBS des WEG neu strukturiert und in der Folgezeit durch weitere Stationen von RWE DEA ergänzt, zum anderen wurden dort durch die BGR zusätzliche temporäre Stationen zu Forschungszwecken installiert. Vor allem im Bereich des Erdgasfeldes Völkersen ist die Stationsdichte mit mittleren Stationsabständen von etwa 6 km vergleichsweise hoch. Die nächstgelegene Station in östlicher Richtung ist V01EB in etwa 25 km.



Abbildung 6: Seismische Registrierung an der Station DEEL 38 km östlich des Epizentrums. Dargestellt sind die vertikalen Bodenschwinggeschwindigkeiten (z) und die horizontalen (n, e) normiert auf das Maximum der jeweiligen Komponente.



Abbildung 7: Seismische Registrierungen ausgewählter Stationen für Entfernungen bis 395 km. Dargestellt sind die vertikalen Bodenschwinggeschwindigkeiten normiert auf das Maximum der jeweiligen Station.



Abbildung 8: Karte der seismischen Stationen in Norddeutschland (blaue Dreiecke) und auf die Erdoberfläche projizierte Laufwege (rote Linien) der seismischen Wellen vom Epizentrum (gelber Stern) zu den zur Lokalisierung verwendeten Stationen.

Die Einsatzzeiten der P-Welle sind an fast allen Stationen klar erkennbar. Die S-Einsätze sind häufig nicht eindeutig, so dass hier nur verlässliche Einsatzzeiten, die mit Genauigkeiten unterhalb einer Sekunde gemessen wurden, zur Lokalisierung verwendet werden. Insgesamt werden 57 Einsatzzeiten an 34 Stationen invertiert.



Abbildung 9: Karte der Epizentren der Erdbeben am 01.05.2014, M_L 3,2, (gelb), am 15.07.2005, M_L 3,8, und am 30.07.2005, M_L 2,2 (braun) im südwestlichen Bereich der Erdgaslagerstätte Klosterseelte / Kirchseelte / Ortholz (grün). Für das aktuelle Beben ist zusätzlich die Lokalisierungsgenauigkeit (gelber Bereich) als zweifache Standardabweichung angegeben, in der das Epizentrum mit 95% Wahrscheinlichkeit liegt.

Das instrumentell bestimmte Epizentrum (Abb. 9) liegt nordwestlich von Klein Bramstedt auf halber Strecke zwischen Syke und Bassum etwa 5 km von beiden Orten entfernt im südlichen Bereich der Erdgaslagerstätte Klosterseelte / Kirchseelte / Ortholz. Die Herdtiefe wurde mit 4,2 km im Teufenbereich der Lagerstätte bestimmt. Die Magnitude wurde als Mittelwert aus den Stationsmagnituden zu 3,2 bestimmt (Abb. 10).

Datum:	01.05.2014
Herdzeit:	08:29:58.00 UTC
	10:29:58:00 MESZ, Ortszeit
Instrumentelles Epizentrum:	52,886°N 8,762°E
Lokalsierungsgenauigkeit horiz.:	±1,2 km
Herdtiefe:	4,2 km
Lokalisierungsgnauigkeit vertikal:	±2,8 km
Magnitude:	3,2 ±0,3



Abbildung 10: Stationsmagnituden (rote Punkte) der seismischen Stationen bis in etwa 450 km Entfernung und die daraus gemittelte Magnitude (blaue Linie) von ML 3,2 für das Erdbeben am 01.05.2014.



Abbildung11: Polardiagramm der richtungs- und entfernungsabhängigen Verteilung der Stationen, die zur Lokalisierung des Bebens am 01.05.2014 verwendet werden, relativ zum Epizentrum (Koordinatenursprung).

Trotz fehlender Stationen nahe des Epizentrums (Abb. 11) konnte dieses mit einer Lokalisierungsgenauigkeit von $\pm 1,2$ km zuverlässig bestimmt werden. Hierfür ausschlaggebend ist die gute azimutale Überdeckung (Abb. 11). Die Tiefenbestimmung ergibt ein flaches Hypozentrum, das mit der Teufenlage der Lagerstätte übereinstimmt. Aufgrund der Stationsgeometrie ist die Herdtiefe mit $\pm 2,8$ km schlechter bestimmt. Für eine zuverlässigere Bestimmung der Herdtiefe sind Stationen oberhalb der Quelle unerlässlich.

Herdmechanismus und Seismotektonik

Zur Berechnung des Herdmechanismus für das Erdbeben bei Syke wurde das Programm FOCMEC (Snoke, 2003) eingesetzt und ähnlich vorgegangen, wie bei der Bestimmung des Herdmechanismus für das Erdbeben vom 22.11.2012 bei Völkersen (Bischoff et al., 2013). Aus den vorliegenden Registrierungen für das Erdbeben bei Syke (Kap. 5.1) konnten insgesamt 22 Polaritäten der Pg- bzw. Pn-Phasen bestimmt werden, die als Eingabedaten in der Inversion nach dem Herdmechanismus verwendet wurden. Als Geschwindigkeitsmodell wurde mit leichten Modifikationen das bei Dahm et al. (2007) angegebene Modell "SED" verwendet. Die Inversion wurde für zwei angenommene Hypozentren bei 3,5 km und 6 km Herdtiefe durchgeführt. Damit liegt der Herd in 3,5 km Tiefe oberhalb des Zechsteins in den mesozoischen Deckschichten und der in 6 km Tiefe unterhalb des Zechsteins im Rotliegenden (siehe Abb. 2, Kap. 2). Diese Zweiteilung trägt dem Umstand Rechnung, dass das ermittelte Hypozentrum mit einer Tiefe von $4,2 \pm 2,8$ km keine eindeutige Zuordnung zu einem der beiden Tiefenstockwerke zulässt. Für die Bestimmung des Herdmechanismus ist die Herdtiefe ein entscheidender Parameter, da er in Kombination mit dem Geschwindigkeitsmodell den Abstrahlwinkel festlegt.

Unterschieden nach der Herdtiefe sind in Abbildung 12 die möglichen Herdflächenlösungen mit der besten Anpassung zusammen mit den Polaritäten der verwendeten Stationen dargestellt. Obwohl sich die Positionen der Stationen (Kreise und Dreiecke für Kompressions- bzw. Dilatationseinsatz) in der stereographischen Projektion für 3,5 und 6 km teilweise stark unterscheiden, sind die sich ergebenden Herdflächenlösungen relativ ähnlich. Die Lösungen innerhalb einer Tiefe variieren voneinander mit lediglich maximal 10° Abweichungen im Streichen und Fallen der Nodalflächen. Ein repräsentativer Herdmechanismus ist in Abbildung 12 in Form eines sogenannten Beachballs dargestellt. Die unterschiedlich gefärbten Quadranten geben die Bereiche von Kompression (schwarz) bzw. Dilatation (weiß) wieder.

Für eine Herdtiefe von 3,5 km ergibt sich eine Abschiebung mit Blattverschiebung an einer WNW-OSO- bzw. N-S-verlaufenden Verschiebungsfläche. Für eine Herdtiefe von 6 km erhält man zwei leicht unterschiedliche Verschiebungstypen. Zum einen wie bei 3,5 km Tiefe eine Abschiebung mit Blattverschiebungskomponente an einer WNW-OSO-streichenden Fläche, die gegenüber der bei 3,5 km noch um 20° im Uhrzeigersinn verdreht ist und schon eher NW-SO streicht. Zum anderen ergibt sich eine Lösung mit einer senkrecht stehenden WNW-OSO-streichenden Nodalfläche und einer NNO-SSW-gerichteten Fläche, die um 55°

gegenüber der Horizontalen nach Osten geneigt ist. Eine Unterscheidung, welche der beiden Lösungen bei einer Herdtiefe von 6 km bevorzugt ist, ist nicht möglich. Hierzu wären Beobachtungen von herdnahen Stationen nötig (Epizentralentfernung ≤ 10 km), mit Einsätzen, die in der stereographischen Projektion nahe des Mittelpunktes zu liegen gekommen wären. Derartige Stationen gab es zum Zeitpunkt des Erdbebens bei Syke und gibt es auch zurzeit nicht.

Ein Vergleich mit den Störungssystemen im Umfeld des Epizentrums zeigt, dass sowohl die WNW-OSO- als auch N-S-streichenden Nodalflächen im Störungsinventar wiederzufinden sind. Eine Unterscheidung hinsichtlich der tatsächlichen Bruchfläche ist leider nicht möglich. Die sich ergebenden Herdflächenlösungen geben Abschiebungsmechanismen wieder. Abschiebungsmechanismen sind auch diejenigen Mechanismen, die in der Umgebung eines Erdgasfeldes bei seiner Entleerung und einem Extensionsregime des Umraums erwartet werden (z.B. Segall et al., 1994).



Abbildung 12: Berechnete Herdmechanismen. Links: 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. Rechts: Repräsentativer Herdmechanismus in Form eines "Beachballs" (schwarz = Kompression, weiß = Dilatation), für eine Herdtiefe von 6 km ergeben sich zwei leicht unterschiedliche Typen.

Für vier Ereignisse im Bereich der Erdgasfelder bei Völkersen und Söhlingen aus den Jahren 2004 bis 2012 wurden ebenfalls Herdmechanismen berechnet (vgl. Bischoff et al., 2013), wobei für das Erdbeben bei Rotenburg im Oktober 2004 zwei leicht unterschiedliche

Ergebnisse von Dahm et al. (2007) und von der BGR vorliegen. Alle Herdmechanismen repräsentieren Abschiebungen an WNW-OSO- bis N-S-gerichteten Verschiebungsflächen. Die erhaltenen Streichrichtungen der Erdbeben im Umfeld der Erdgasfelder Völkersen und Söhlingen sowie auch das rezente Beben bei Syke im Umfeld des Erdgasfeldes Klosterseelte stimmen mit den Streichrichtungen der in der Region um die Gasfelder bekannten Störungszonen, die im Geotektonischen Atlas für Nordwestdeutschland (Baldschuhn et al., 2001) veröffentlicht sind, überein.

5.2 Auswirkungen an der Erdoberfläche

Makroseismische Auswertung

Die Erschütterungen des Erdbebens am 01.05.2014 wurden von der örtlichen Bevölkerung deutlich verspürt, vielfach wurde das Erdbeben auch akustisch wahrgenommen. Beim seismologischen Bereitschaftsdienst von BGR und LBEG gingen zahlreiche Anfragen von Bewohnern, von örtlichen Behörden und von Medien ein. Die lokalen Medien berichteten.

Makroseismische Untersuchungen werden im Allgemeinen für stärkere Erdbeben durchgeführt, deren Erschütterungen in einem größeren Umkreis zu spüren sind und für die eine Vielzahl von Meldungen vorliegt. Um den subjektiven Anteil bei der Beschreibung der Beobachtungen zu reduzieren, werden mehrere Meldungen an einem Ort zu einer makroseismischen Intensität zusammengefasst. Für das Erdbeben am 01.05.2014 bei Syke ist diese Vorgehensweise wegen der geringen Ausdehnung des betroffenen Gebietes und der insgesamt geringen Anzahl von Meldungen nicht möglich. Dennoch bieten die makroseismischen Meldungen eine von der instrumentellen Aufzeichnung unabhängige Informationsquelle und ermöglichen Aussagen über die Auswirkungen an der Erdoberfläche. Daher werden die üblichen makroseismischen Verfahren hier angepasst, indem das Zusammenfassen mehrerer Beobachtungen zu einem Intensitätswert entfällt. Stattdessen werden Einzelwerte für die individuellen Fragebogen abgeleitet, hier mit "Individual Questionnaire Intensity" (IQI) bezeichnet, und interpretiert. Für sie gelten die gleichen Abstufungen wie für die EMS-98 im Anhang beschrieben.

Über den Makroseismik-Fragebogen der Erdbebenstation Bensberg der Universität zu Köln in Zusammenarbeit mit dem Königlichen Observatorium von Belgien wurden in den zwei Wochen nach dem Erdbeben bis zum 13.05.2014 130 Beobachtungen gemeldet. Eine weitere makroseismische Meldung ging bereits am 01.05.2014 beim Geologischen Dienst in Krefeld ein. Die Daten wurden LBEG und BGR übermittelt, so dass damit insgesamt 131 makroseismische Meldungen zur Verfügung stehen. 14 Meldungen enthalten nur unzureichende Ortsangaben und werden im Folgenden nicht berücksichtigt. Dies betrifft acht Meldungen aus Syke, vier aus Bassum sowie zwei von gänzlich unbekannter Herkunft. Diese nicht berücksichtigten Meldungen enthalten die gesamte Bandbreite möglicher Wahrnehmungen von fehlender Wahrnehmung bis zu Gebäudeschäden. Die übrigen 117 Meldungen fließen in die weitergehende Auswertung ein, da sie in der Adressangabe mindestens den Straßennamen enthalten.

Die Verteilung der den 117 individuellen Fragebögen zugeordneten Intensität IQI zeigt Abbildung 13. Aus den Ortschaften Kirchseelte im Norden, Syke im Osten und Bassum im Süden des Schüttergebietes liegen entsprechend der Siedlungsstruktur vermehrt Beobachtungen vor, in den übrigen ländlichen Bereichen sind Meldungen spärlich verteilt. Die meisten Beobachtungen wurden mit der IQI-Intensität 4 (deutlich spürbar) bewertet und stammen aus Epizentralentfernungen bis 8 km (Abb. 14). Mit IQI 3 noch schwach verspürt wurde das Erdbeben im Wesentlichen bis 14 km Entfernung. Die entfernteste Wahrnehmung wurde aus 19 km berichtet.



Abbildung 13: Karte der 117 ausgewerteten makroseismischen Meldungen mit den Intensitätswerten IQI, die für die individuellen Fragebögen bestimmt wurden, und das daraus berechnete makroseismische Epizentrum (blau), das mit dem instrumentell bestimmten Epizentrum (rot) gut übereinstimmt.

Aus der Anpassung der theoretisch erwarteten Abnahme der Intensität mit zunehmender Entfernung vom Epizentrum an die Beobachtungen wird das makroseismische Epizentrum bestimmt (Abb. 13). Die Abweichung zum instrumentellen Epizentrum beträgt 3,6 km, so dass die Lösungen innerhalb der Fehlerbereiche der Epizentrenbestimmung übereinstimmen. Zu berücksichtigen ist zudem, dass das makroseismische Epizentrum als Ort der stärksten Erschütterungen und das instrumentelle Epizentrum (Abb. 9, Kap. 5.1), das sich oberhalb der Bruchfläche als Quelle der seismischen Wellen befindet, prinzipiell verschieden sind. Die richtungsabhängige Energieabstrahlung während des Bruchvorgangs und lokale Verstärkungseffekte an der Erdoberfläche führen zu systematischen Abweichungen. Zusammenfassend ist durch die Unabhängigkeit beider Methoden das Epizentrum trotz der wenig optimalen Datengrundlage jeder einzelnen Methode insgesamt gut belegt.

Makroseismisches Epizentrum: 52.917

52.9175 N, 8.7750 E

Genauigkeit des makroseismischen Epizentrums: ± 3 km



Abbildung 14: Intensitätsverteilung IQI in Abhängigkeit von der Entfernung zum makroseismischen Epizentrum. Die ungewöhnlich hohen Intensitäten von 7 und 8 werden seismologisch nicht bewertet.

In der Intensitätsverteilung (Abb. 14) auffällig sind Werte von 6 bis 8, denen Beobachtungen von Gebäudeschäden zugrunde liegen. Berichtet wird von Haarrissen in Wänden sowie von deutlicheren Schäden wie wenigen größeren Rissen in Wänden, Rissen in Schornsteinen, dem Herabfallen von Putz und von Teilen der Deckenverkleidung, von gerissenen Fliesen, einer gerissenen Zimmerdecke und Rissen zwischen Gebäudeteilen. Vor allem die drei Datenpunkte mit IQI-Intensitäten von 7 (Gebäudeschäden) und 8 (schwere Gebäudeschäden) erscheinen für das energieschwache Erdbeben der Magnitude 3,2 deutlich zu hoch. Zum einen muss hier berücksichtigt werden, dass die Bewertung der beobachteten Schäden nicht durch Bausachverständige durchgeführt wurde, so dass die Zuordnung von Schäden zu einer Intensitätsklasse keiner objektiven Qualitätskontrolle unterliegt, sondern auf der Beschreibung der Bevölkerung beruht und durch die subjektive

Bewertung der Bewohner beeinflusst sein kann. Zum anderen ist nicht gesichert, dass die gemeldeten Schäden durch das Erdbeben entstanden sind. Demzufolge sind die Meldungen mit IQI-Intensitäten größer als 6 hier zwar der Vollständigkeit halber aufgeführt, bedürfen aber aus den genannten Gründen einer gesonderten Bewertung, die seismologisch nicht durchgeführt werden kann.

Die Maximalintensität des Erdbebens bei Syke am 01.05.2014 nach EMS-98 (Grünthal et al., 1998; s. Anhang 1) liegt bei IV-V. Für beide Intensitäten gibt es schlüssige Argumente. Für eine Bewertung mit der Intensität IV spricht, dass die makroseismische Auswertung nach der klassischen Methode, die eine Mittelung der Meldungen über Postleitzahlengebiete nutzt, zu diesem Ergebnis kommt (<u>http://seismologie.oma.be</u>). Für eine höhere Maximalintensität spricht die insgesamt nicht vernachlässigbare Anzahl von neun Meldungen mit IQI-Intensitäten von 5 sowie vier Meldungen mit leichten Gebäudeschäden (IQI 6). Die Bewertung mit Intensität V schließt ein, dass wenige (bis ca. 10%) der Gebäude der Vulnerabilitätsklassen A und B Schäden vom Grad 1 (Grünthal et al., 1998) aufweisen. Demzufolge sind die vorliegenden Schadensmeldungen mit dieser Bewertung konsistent.

Auch Vergleiche mit den Auswirkungen früherer Beben stützen die Bewertung mit Maximalintensität V. Die entfernungsabhängige Intensitätsverteilung (Abb. 14) ähnelt stark derjenigen des Bebens bei Völkersen am 22.11.2012 (Bischoff et al., 2013), das mit der Magnitude M_L 2,9 Energie in der gleichen Größenordnung freigesetzt hat. Sowohl der Schütterradius, der für das frühere Beben aufgrund von Meldungen bis 13 km Entfernung rechnerisch zu 18 km bestimmt wurde, als auch die entfernungsabhängig maximal zugewiesenen Intensitäten, z.B. Intensität IV bis etwa 8 km und Intensität III bis etwa 14 km, sind sehr ähnlich. Zwar liegen für das Beben bei Völkersen mit 184 Meldungen rund 60% mehr Datenpunkte vor, dennoch können Unterschiede in den Verteilungen nicht weitergehend interpretiert werden, da die Auswertemethode aufgrund der insgesamt geringen Anzahl von Datenpunkten, aufgrund des ländlichen Untersuchungsgebietes und der daraus resultierenden stark heterogenen Häufigkeitsverteilung der Meldungen, hier an ihre Grenzen stößt.

Weitere Vergleiche lassen sich zu den makroseismischen Auswertungen der früheren Beben bei Weyhe am 11.07.2002 (M_L 2,3) und bei Syke am 15.07.2005 (M_L 3,8) ziehen, die trotz der um über eine Größenordnung unterschiedlichen Magnituden beide mit der Epizentralintensität V nach EMS-98 bewertet wurden (Leydecker, 2002; Abb. 15, Kaiser, 2005). Besonders der Vergleich mit dem Erdbeben bei Syke am 15.07.2005 ist aufschlussreich, da dieses Epizentrum nominell nur 500 m von dem aktuellen entfernt ist und somit im selben Epizentralbereich liegt. Bei den genannten Beben unterscheiden sich die Auswirkungen weniger in ihrer Stärke als in den Flächen gleicher Intensität. Bei dem schwächeren Beben in 2002 beträgt der mittlere Schütterradius etwa 5 km (Leydecker, 2002), so dass die Auswirkungen lokaler sind als bei dem stärkeren Beben in 2005 mit deutlich weiträumigeren Auswirkungen und einem Schütterradius von etwa 24 km (Abb. 15, Kaiser, 2005). Diese Bewertungen zeigen, dass die konkreten Auswirkungen durch die Epizentralintensität nicht ausreichend klassifiziert werden, sondern dass auch die Isoseistenflächen bzw. der Schütterradius wichtige Größen bei der Beschreibung der makroseismischen Auswirkungen sind. Das aktuelle Beben am 01.05.2014 hat in diesem Vergleich eine mittlere Magnitude. Die Bewertung mit der EMS-Epizentralintensität V und einem Schütterradius von ca. 14 km ist somit konsistent und wird durch diesen qualitativen Vergleich gestützt.

Insgesamt bewerten wir das Erdbeben am 01.05.2014 daher mit der Maximalintensität IV-V. Diese Bewertung bedeutet, dass sie nicht klar festgelegt werden kann.



Abbildung 15: Isoseistenkarte der makroseismischen Auswertung des Erdbebens bei Syke am 15.07.2005, M_L 3,8, das mit der Epizentralintensität V nach EMS-98 bewertet wurde. Der mittlere Schütterradius beträgt etwa 24 km (Kaiser, 2005). Das makroseismische Epizentrum ist durch den großen schwarzen Stern markiert.

6. Bewertung der Ergebnisse

Das Erdbeben am 01.05.2014 bei Syke wird im südöstlichen Bereich der Erdgaslagerstätte Klosterseelte / Kirchseelte / Ortholz lokalisiert. Diese Lokalisierung ist sowohl instrumentell als auch makroseismisch konsistent bestimmt worden und fällt mit zwei Ereignissen aus 2005 räumlich zusammen. Sie korreliert räumlich mit der Erdgasförderung, die nur noch im südlichen Feldesteil Klosterseelte durchgeführt wird.

Vor dem Erdbeben sind im Erdgasfeld Klosterseelte Arbeiten an den Bohrungen KSTS Z4a und KSTS Z6 durchgeführt worden: Am 07.04. erfolgte an der KSTS Z4a eine Stillstandskonservierung durch Einpressen von Süßgas. Die gesamte Einpressmenge von ca. 10.000 m³ (Vn) ist im Vergleich mit der gesamten Produktion von ca. 15,8 Milliarden m³ Erdgas sehr klein. Insbesondere ist die Injektionsrate von Süßgas niedriger bzw. in der Größenordnung der letzten Förderrate. Dieses und die große Zeitdifferenz zwischen Maßnahme und Beben von über drei Wochen sprechen gegen einen unmittelbaren Zusammenhang mit diesem Erdbeben. Bei den anderen Arbeiten innerhalb des Bohrlochs an der KSTS Z4a in der Zeit seit 10.04 wurden keine Eingriffe in die Lagerstätte vorgenommen. Die Arbeiten an der KSTS Z6 vom 25.02. bis 03.03.2014 wurden zwei Monate vor dem Erdbeben beendet, so dass ebenso kein zeitlicher Zusammenhang zu sehen ist. Insgesamt gehen wir davon aus, dass die o.g. Arbeiten mit hoher Wahrscheinlichkeit keinen Eingriff in die Bohrung bzw. Lagerstätte darstellen, die die Induzierung von Erdbeben zur Folge haben könnten. Diese Einschätzung wird durch die Beobachtung gestützt, dass kein Zusammenhang zwischen Frac-Maßnahmen und dem Auftreten von Erdbeben in Norddeutschland zu beobachten ist.

Es deutet sich vielmehr an, dass die Druckabsenkung in der Lagerstätte, die infolge der Erdgasförderung über einen langen Zeitraum stattfindet, zu einer Kompaktion des Gebirges im Bereich der Lagerstätte und in deren Randbereichen zum nicht gasführenden Gebirge führt. Dabei findet im Übergangsbereich zu Formationen mit nur geringer oder fehlender Kompaktion ein Spannungsaufbau statt, der bei einer Überschreitung der Scherfestigkeiten zu einem plötzlichen Spannungsabbau und damit zu Seismizität führen kann. Wir gehen daher von einem sehr wahrscheinlichen Zusammenhang zwischen dem Erdbeben und der Erdgasförderung auf Grund der Druckabsenkung in der Lagerstätte und einem damit verbundenen Spannungsaufbau durch differentielle Kompaktion aus. Gestützt wird diese Sicht des Zusammenhangs durch die Bestimmung der Tiefenlage des Bebens im Bereich des Förderhorizontes und die für Ereignisse in den norddeutschen Erdgasfördergebieten typischen Abschiebungsmechanismen.

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.
- 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.
- 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, S. 691-704.
- 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
- Kaiser, 2005, pers. Mitteilung: makroseismische Auswertung des Erdbebens bei Syke am 15.07.2005.
- Kockel, 1998: Geotektonischer Atlas von Nordwestdeutschland, 1 :300.000, Teil 18, Die paläogeographische und strukturelle Entwicklung Nordwestdeutschlands. Unveröffentlichter Bericht. Archiv-Nr. 115557.
- Leydecker, G. (2011): Erdbebenkatalog für Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 800 - 2008 (Earthquake catalogue for Germany and adjacent areas for the years 800 to 2008). 2013 Geol. Jb., E 59; 198 S., 12 Abb., 5 Tab., 9 Anlagen, 1 CD; BGR Hannover / Germany; Vertrieb: E. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Leydecker, G., 2002: Das Erdbeben vom 11. Juli 2002 in Weyhe südlich Bremen im Norddeutschen Tiefland. BGR. Hannover, 9 S.
- 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/.
- Das geologische 3D –Modell von Niedersachsen auf Basis des Geotektonischen Atlas, http://nibis.lbeg.de/cardomap3/

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)	
1	nicht fühlbar	Nicht fühlbar	
11	kaum	Nur sehr vereinzelt von ruhenden Personen	
	bemerkbar	wahrgenommen.	
	Schwach	Von wenigen Personen in Gebäuden wahrgenommen. Ruhende Personen fühlen ein leichtes Schwingen oder	
		Erschüttern.	
	Deutlich	Im Freien vereinzelt, in Gebauden 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; Seite 1

Nach Angaben der ExxonMobil Production Deutschland GmbH wurden im Zeitraum Februar bis Mai 2014 folgende Arbeiten im Feldesteil Klosterseelte durchgeführt:

Bohrung	durchgeführte Arbeiten	
KSTS Z1:	keine	
KSTS Z2:	keine	
KSTS Z4a:	07.04.14 - 07.04-14	Stillstandskonservierung und Inhibierung
	10.04.14 - 07.05.14 Clean-Out	Bohrungssicherung für HWU-Einsatz incl. CT-
KSTS Z6:	25.02.14 - 03.03.14	Totpumparbeiten mit Teilzementation
KSTS Z7:	keine	

Erläuterungen:

Klosterseelte KSTS Z4a

Stillstandskonservierung und Inhibierung am 07.04.2014

- Derartige Arbeiten werden durchgeführt, wenn Sauergasbohrungen über einen längeren Zeitraum (2-4 Wochen, je nach H2S-Gehalt) außer Betrieb genommen werden müssen, da während dieser Zeit keine kontinuierliche Korrosionsinhibierung erfolgt. Während der Produktion (Bohrung in Betrieb) wird Korrosionsinhibitor als Mischung gemeinsam mit Schwefellösemittel in Sauergasbohrungen eingebracht.
- Bei der Stillstandskonservierung wurde das Sauergas unter Einsatz von Süßgas mit einem mobilen Verdichter über das E-Kreuz aus dem Förderstrang in die Lagerstätte verdrängt:
 - Einpressmenge Süßgas: 10.600 m³ (Vn)
 (2-facher Tubinginhalt mit einer Rate von 2.900 m³/h (Vn))
 - Einpressdruck: 144 bar bei 2.900 m³/h (Vn)
 Schließdruck: 121 bar
 Fließdruck bei letzter Förderung: 20 bar bei 3.300 m³/h (Vn)
- (Korrosionsschutz-) Inhibierung:
 - Bei der anschließenden Inhibierung wurden 1,4 m³ Trägerflüssigkeit mit 7,5%
 Korrosionsinhibitor eingepumpt.

Anhang 2; Seite 2

Bohrlochsicherung für den geplanten Einbau eines 2 7/8" Velocity Strings mit Hydraulic Workover Unit (HWU = Snubbing Unit) – 10.04. bis 07.05.2014

- Vor dem Einbau eines Velocity Strings müssen das E-Kreuz der Bohrung demontiert und die BOP- und Stripperausrüstung der HWU auf dem Bohrlochkopf installiert werden.
- Während dieser Arbeiten muss die Bohrung mit zwei Barrieren (hier: zwei Plugs im Tubing) gesichert werden. Aufgrund von Ablagerungen im Tubing und in den Landing Profilen war das Setzen der Stopfen schwieriger und damit langwieriger als geplant.
- Während des o.g. Zeitraumes wurden Slickline-Arbeiten (zum Setzen der Plugs), sowie Pump- und Coiled Tubing-Arbeiten zum Reinigen des Tubings durchgeführt. Es wurde zu Reinigungszwecken Kesselspeisewasser mit Tensiden und Gel verpumpt. Der Nachweis der Dichtigkeit der Plugs erfolgte u.a. durch Verpumpen von Stickstoff.
- Der max. Bohrlochkopfdruck während dieser Arbeiten betrug 120 bar. Der lagerstättenbedingte Schließdruck (PKS) der Bohrung beträgt ca. 114 bar.

Einbau Velocity String mit HWU – 08.05. bis 23.05.2014

- Während dieser Arbeiten wurden folgende Volumen Stickstoff zwecks Süß-/ Sauergasverdrängung in die Bohrung verpumpt:
 - o 15.05.2014 9000m³ (Vn) bei 114 bar N2 zur Tubingdisplacement
 - o 16.05.2014 900m³ (Vn) bei 116 bar N2 zur Süß- bzw.
 - Sauergasverdrängung
 - o 17.05.2014 900m³ (Vn) bei 116 bar N2 -"-
 - o 18.05.2014 900m³ (Vn) bei 116 bar N2 -"-
 - o 19.05.2014 900m³ (Vn) bei 116 bar N2 -"-
 - o 20.05.2014 800m³ (Vn) bei 116 bar N2 -"-
 - o 22.05.2014 2000m³ (Vn) bei 130 bar N2 zum Druckausgleich zum Ziehen der Stopfen

= kumulativ 15400m³ (Vn)

Anhang 2; Seite 3

Klosterseelte Z6

25.02.2014 - 03.03.2014

Aufgrund hoher Verwässerung und damit unwirtschaftlicher Produktion wurde die Bohrung im Lagerstättenbereich abzementiert bzw. totgepumpt. Diese Arbeiten erfolgten in mehreren Schritten (Schließdruck/PKS der Bohrung vor Beginn der Arbeiten: 73 bar):

- Verpumpen von 3,5 m³ Zement, Spacer und 43 m³ Wasser (kumulatives Volumen: 48 m³). Bohrung saugt, d.h. keine Druckerhöhung. PKS = 0 bar
- Verpumpen von 5,3 m³ Zement, Spacer und 37 m³ Wasser (kumulatives Volumen: ca. 45 m³). Bohrung saugt, d.h. keine Druckerhöhung. PKS = 0 bar
- Verpumpen von 2,8 m³ Zement, Spacer und 15 m³ Spülung (kumulatives Volumen: 38 m³). Nachgepumpt, kein Druckanstieg. PKS = 0 bar
- Verpumpen von 6,5 m³ Verstopfungspille und 25 m³ Wasser (kumulatives Volumen: ca. 33 m³). Keine Druckerhöhung. PKS = 0 bar
- Bohrung mit 18 m³ Spülung aufgefüllt und auf Kopfdruck 30 bar aufgepumpt (zum Nachweis, dass Lagerstättenbereich abgedichtet ist).

Die Bohrung hat bis zum Wirksamwerden der Zementbrücke bzw. Verstopfungspille saugend aufgenommen (Kluftlagerstätte im Staßfurt Carbonat). Aus diesem Grund kann ausgeschlossen werden, dass durch die o.g. Pumparbeiten unzulässig hohe Drücke auf die Formation gewirkt haben.