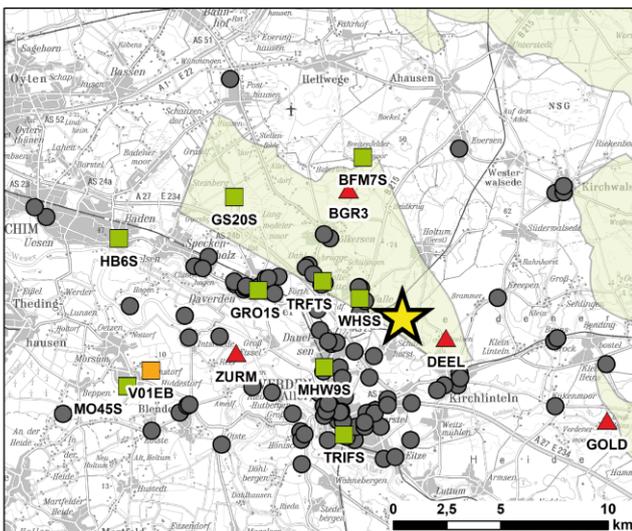


Monika Bischoff
Nicolai Gestermann
Michael Pasternak
Thomas Plenefisch
Ayk Schindewolf

Bericht zu den Erdbeben bei Kirchlinteln (Landkreis Verden) am 20. November 2019, $M_L \leq 3,2$

Seismologische Auswertung



Hannover, März 2020

Abbildung Frontseite

Karte der Datengrundlage für die seismologische Auswertung der Erdbeben am 20. November 2019: Ortungsstationen des BVEG (oranges Quadrat) und der BGR (rote Dreiecke) sowie Erschütterungsstationen von BVEG/Wintershall Dea (grüne Quadrate), makroseismische Meldungen (graue Punkte) sowie das Epizentrum (gelber Stern) im Bereich der Erdgaslagerstätte (hell-grün) Völkersen/Völkersen-Nord (Topographische Karte: GeoBasis-DE / BKG 2015).

Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
(LBEG)

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Roh-
stoffe (BGR)

Bericht

zu den Erdbeben bei

Kirchlinteln (Landkreis Verden)

am 20. November 2019,

$M_L \leq 3,2$

Seismologische Auswertung

Sachbearbeiter: Monika Bischoff¹, Nicolai Gestermann²,
Michael Pasternak¹, Thomas Plenefisch²,
Ayk Schindewolf¹

¹ LBEG, ² BGR

Datum: März 2020

Seiten: 32

Anhang: 2

TK 25: 2920, 2921, 3021

Archiv-Nr.:

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	6
1 Einleitung	8
2 Erdbeben bei Kirchlinteln am 20. November 2019, $M_L \leq 3,2$	9
2.1 Erdbeben am 20. November 2019	9
2.2 Frühere Seismizität am Erdgasfeld Völkersen.....	12
3 Erdgaslagerstätte Völkersen	14
4 Auswirkungen an der Erdoberfläche	16
4.1 Makroseismik	16
4.2 Bodenschwinggeschwindigkeiten.....	22
4.3 Einwirkungen auf Gebäude	25
5 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	26
5.1 Seismizität am Erdgasfeld Völkersen	26
5.2 Auswirkungen an der Oberfläche	28
5.3 Seismische Messnetze.....	30
Literatur	31
Anhang	32
Anhang 1 - Europäische Makroseismische Skala (EMS-98).....	32

Zusammenfassung

Am Abend des 20. November 2019 ereigneten sich am Erdgasfeld Völkersen im Landkreis Verden zwei Erdbeben, die von der Bevölkerung stark verspürt wurden. Das erste Erdbeben wurde um 18:28 Uhr Ortszeit registriert, das zweite vier Stunden später um 22:32 Uhr. Ein weiteres, sehr schwaches Erdbeben ereignete sich um 20:52 Uhr. Mit der Lokalmagnitude 1,0 war es nicht spürbar. Die beiden stark verspürten Erdbeben weisen Lokalmagnituden (M_L) von 3,2 und 3,0 auf. Sie gehören damit zu den stärksten Erdbeben am Erdgasfeld Völkersen.

Die Herde der Erdbeben fallen räumlich zusammen. Für die stark verspürten Erdbeben wurde die Herdtiefe instrumentell mit $4 \text{ km} \pm 1 \text{ km}$ abgeschätzt. Die Epizentren liegen etwa vier Kilometer nordwestlich von Kirchlinteln und etwa sechs Kilometer nördlich von Verden.

Grundlage der Untersuchungen der Erdbeben bei Völkersen am 20. November 2019 bilden zum einen die instrumentellen seismologischen Daten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) und der erdgasfördernden Unternehmen sowie die Beobachtungen aus der Bevölkerung (Makroseismik) zu diesen Erdbeben, zum anderen Auswertungen früherer Erdbeben.

Insgesamt liegen dem LBEG für die beiden stark verspürten Erdbeben 173 makroseismische Meldungen (Erschütterungsmeldungen) aus der Bevölkerung vor. Die meisten makroseismischen Meldungen und die Beschreibung der stärksten Auswirkungen sind dem späteren Erdbeben um 22:32 Uhr zuzuordnen und stammen überwiegend aus Kirchlinteln, Langwedel und Verden. Sie beschreiben starke Erschütterungen. Die maximalen Auswirkungen der Erschütterungen werden nach EMS-98 (Grünthal et al., 1998) mit der Intensität V bewertet.

Die gemessenen, maximalen Bodenschwinggeschwindigkeiten (PGV-Werte, engl.: Peak Ground Velocity) an Erschütterungsstationen des Bundesverbandes Erdöl, Erdgas und Geoenergie e. V. (BVEG), der Wintershall Dea GmbH und an seismologischen Stationen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) stützen diese Einschätzung. Der höchste gemessene Wert der Bodenschwinggeschwindigkeit beträgt $5,1 \text{ mm/s}$ und wurde an einer Messstation in einer Entfernung von etwa zwei Kilometern vom instrumentell ermittelten Epizentrum bestimmt. Entsprechend der DIN 4150 ist daher davon auszugehen, dass an einigen Gebäuden vorrangig empfindlicher Bauart kleine Schäden durch die Erschütterungswirkung entstanden sein können. Die Variabilität der gemessenen PGV-Werte deutet darauf hin, dass zudem Standorteffekte im Landkreis Verden zu berücksichtigen sind.

Am Erdgasfeld Völkersen wurden insgesamt seit 2008 21 Erdbeben mit Magnituden von 0,5 bis 3,2 registriert. Ein Zusammenhang zwischen diesen Erdbeben und der Erdgasproduktion ist durch frühere Untersuchungen gut belegt. Auch die Erdbeben am 20. November 2019 sind aufgrund der Lage der Epizentren und der Herdtiefen im Niveau der Erdgaslagerstätten sehr wahrscheinlich auf die Erdgasförderung im Erdgasfeld Völkersen zurückzuführen. Ursache der Erdbeben ist wahrscheinlich die Druckabsenkung in der Lagerstätte infolge der Erdgasproduk-

tion, die zur Veränderung des Spannungsfeldes im tiefen Untergrund führt. Erhöhte Spannungen können durch die Reaktivierung vorhandener tektonischer Störungen impulsartig durch ein seismisches Ereignis abgebaut werden.

Fracking-Maßnahmen wurden am Erdgasfeld Völkersen zuletzt im Juni 2011 durchgeführt. Fracking-Maßnahmen sind daher als Ursache für die Erdbeben am 20. November 2019 auszuschließen. Lagerstättenwasser wird im Erdgasfeld Völkersen nicht versenkt. Auch in der Vergangenheit wurde in dieser Region kein Lagerstättenwasser in der Tiefe des Hypozentrums versenkt, so dass hiermit zusammenhängende Prozesse als Ursache der Erdbeben auszuschließen sind.

1 Einleitung

Am Mittwoch, dem 20. November 2019 um 18:28 Uhr und um 22:32 Uhr Ortszeit ereigneten sich nahe Kirchlinteln im Landkreis Verden im Bereich der Erdgaslagerstätte Völkersen Erdbeben mit den Lokalmagnituden (M_L) 3,2 bzw. 3,0. Im Epizentrum und den umliegenden Orten wurden beide Erdbeben als starke Erschütterung wahrgenommen. Makroseismische Meldungen gingen aus bis zu 18 km Entfernung vom instrumentell bestimmten Epizentrum ein.

Die erste Information erreichte den Niedersächsischen Erdbebendienst (NED) im Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) über ein automatisches Alarmsystem wenige Minuten nach dem ersten Erdbeben. 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 noch am Mittwochabend über das Internet und am Donnerstagmorgen, 21. November 2019 in einer Pressemitteilung veröffentlicht:

<https://www.lbeg.niedersachsen.de/aktuelles/pressemitteilungen/zwei-erdbeben-im-landkreis-verden-lbeg-registriert-magnituden-von-3-2-und-3-0-182890.html>.

Einzelne Anfragen aus der Bevölkerung gingen in den Tagen nach den Erdbeben im LBEG ein. Die meisten, umfangreicheren Anfragen kamen von Medien und aus der Politik mit der Bitte um ausführlichere Hintergrundinformationen. Die Erfahrung nach dem Erdbeben am 16. April 2016, dass sich wenige Bürgerinnen und Bürger beim Bereitschaftsdienst von BGR und LBEG melden, hat sich bestätigt. Die Informationsangebote im Internet sind inzwischen bekannt und etabliert. Dass insgesamt ein großes Interesse an den Erdbeben besteht, belegen die breite Berichterstattung durch viele Regionalmedien in Niedersachsen sowie die sehr gut besuchte Informationsveranstaltung am 5. Dezember 2019 in Kirchlinteln, die gemeinsam von der Gemeinde Kirchlinteln und dem LBEG ausgerichtet wurde.

Eine detaillierte Auswertung und eine ausführliche Bewertung der Erdbeben am 20. November 2019 bei Kirchlinteln werden in diesem Bericht vorgelegt. Zur abschließenden Auswertung des Erdbebens werden Daten herangezogen, die nicht unmittelbar nach den Erdbeben zur Verfügung stehen. Dies sind u.a. Daten von Stationen, die noch nicht in Echtzeit an das Datenzentrum angebunden sind. Zudem erfolgt die makroseismische Erhebung, also die Berücksichtigung von Beobachtungen aus der Bevölkerung, die über den Internet-Fragebogen erfasst werden, zwangsläufig erst im Laufe einiger Tage nach einem Erdbeben.

Eine bewertende Übersicht der Seismizität in Norddeutschland mit dem Schwerpunkt auf den Erdgasförderregionen gibt der frühere Bericht zum Erdbeben bei Völkersen (Bischoff et al., 2013). Dort sind die auch hier verwendeten Auswertemethoden genauer erläutert. Dieser Bericht ist auf der Internet-Seite des NED im LBEG zur Verfügung gestellt (<http://www.lbeg.niedersachsen.de/Erdbebendienst/>).

2 Erdbeben bei Kirchlinteln am 20. November 2019, $M_L \leq 3,2$

2.1 Erdbeben am 20. November 2019

Registrierungen

Die durch die spürbaren Erdbeben am 20. November 2019 bei Kirchlinteln angeregten seismischen Wellen wurden instrumentell von zahlreichen Stationen verschiedener Messnetze (Deutsches Regionalnetz GRSN, Bergschadenskundliches Beweissicherungs-System BBS des Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V. (BVEG), Stationsnetze von staatlichen Erdbebendiensten) aufgezeichnet. Sie konnten noch an Stationen in über 300 km Entfernung registriert werden. Abbildungen 1 und 2 zeigen beispielhaft die vertikalen Bodenschwingungsgeschwindigkeiten an ausgewählten Stationen im Norddeutschen Becken bzw. die Registrierungen aller drei Komponenten der Station DEEL etwa 2 km vom Epizentrum entfernt für das Erdbeben um 18:28 Uhr lokaler Zeit. Ein weiteres, sehr schwaches Erdbeben ereignete sich um 20:52 Uhr. Mit der Lokalmagnitude 1,0 war es nicht spürbar.

Lokalisierung

Aus den Differenzen der Einsatzzeiten der zuerst ankommenden Pg-Wellen und den später eintreffenden Sg-Wellen kann der Ort des Erdbebens bestimmt werden. Aufgrund der nicht immer eindeutigen Identifizierung des Sg-Wellen-Einsatzes und der Vielzahl der in geringen Entfernungen zur Verfügung stehenden Stationen wurden in diesem Fall zur Lokalisierung ausschließlich Pg-Einsatzzeiten an Stationen im Norddeutschen Becken verwendet (Abb. 3). Pg-Einsatzzeiten wurden mithilfe des Programms HYPOSAT basierend auf einem regionalen Geschwindigkeitsmodell bezüglich der Herdkoordinaten invertiert. Es wurde eine gute azimutale Abdeckung durch nahe Stationen erzielt. In Entfernungen vom Epizentrum bis 10 km befinden sich insgesamt zehn Stationen. Für die Lokalisierung wurden nur die zuverlässigsten Einsatzzeiten genutzt. Weiter entfernte Stationen sind vor allem für die Bestimmung der Magnitude relevant. Die Hypozentren der stärkeren Erdbeben wurden mit horizontalen Genauigkeiten von 1 km innerhalb der Erdgaslagerstätte Völkersen lokalisiert. Die Herdtiefe liegt mit 4 km \pm 1 km im Niveau des Förderhorizonts. Ein Zusammenhang mit der Erdgasförderung ist daher sehr wahrscheinlich.

Alle instrumentell bestimmten Herdparameter und Genauigkeiten sind in den Tabellen 1 und 2 zusammengestellt.

Tabelle 1: Instrumentell bestimmte Lokalisierungen der Erdbeben bei Kirchlinteln am 20. November 2019. Δxy und Δz geben dabei die Lokalisierungsgenauigkeiten (einfache Standardabweichung) in horizontaler und vertikaler Richtung an. Für das Erdbeben um 02:26 Uhr wurde die Herdtiefe festgesetzt. Dies ist durch ein „f“ markiert.

Datum (Lokalzeit)	Herzzeit (Lokalzeit)	geogr. Breite (°Nord)	geogr. Länge (°Ost)	Herdtiefe (km)	Δxy (km)	Δz (km)	Magnitude M_L
20.11.2019	18:28:38	52,97	9,28	3,9	1	1	3,2
20.11.2019	20:52:57	52,96	9,28	4f	2	-	1,0
20.11.2019	22:32:56	52,97	9,28	3,9	1	1	3,0

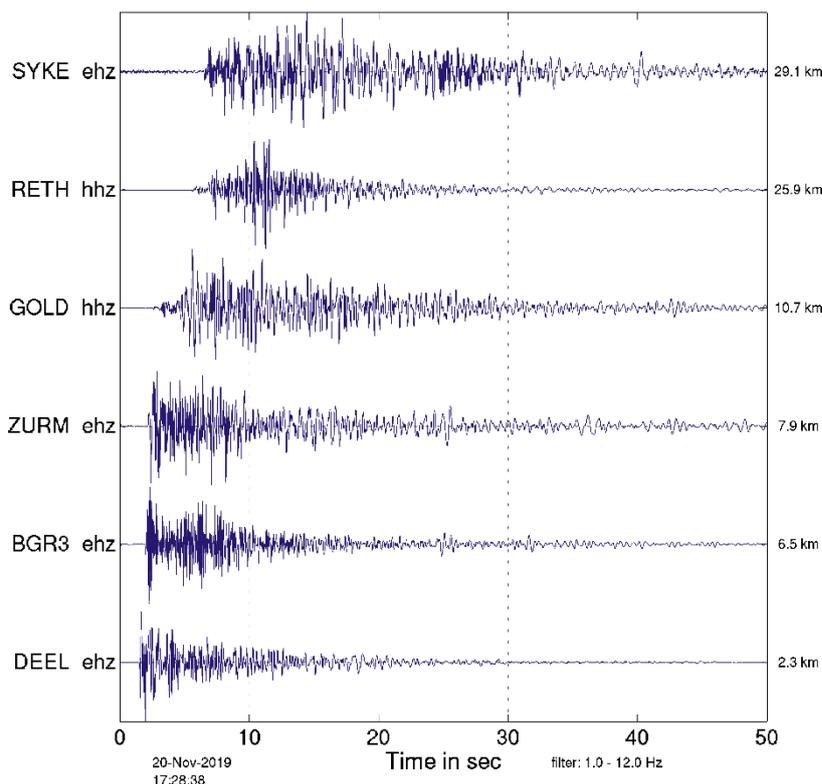


Abbildung 1: Seismische Registrierungen des Erdbebens am 20. November 2019 um 18:28 Uhr lokaler Zeit (17:28 UTC) an ausgewählten Stationen im Norddeutschen Becken für Epizentralentfernungen bis etwa 30 km. Dargestellt sind die vertikalen Bodenschwingungsgeschwindigkeiten normiert auf das Maximum der jeweiligen Station. Koordinaten und Orte der Stationen enthält Anhang 2.

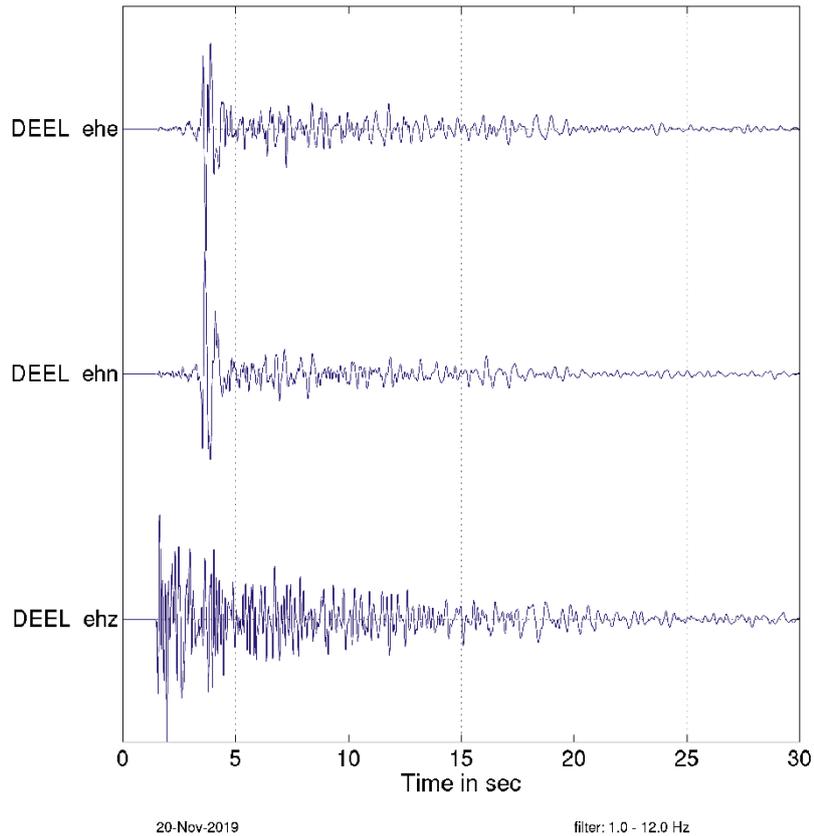


Abbildung 2: Seismische Registrierungen des Erdbebens am 20. November 2019 um 18:28 Uhr lokaler Zeit (17:28 UTC) an der Station DEEL etwa zwei Kilometer südöstlich des Epizentrums. Dargestellt sind die vertikalen (Z) und die horizontalen (N, E) Bodenschwingungsgeschwindigkeiten normiert auf das Maximum der jeweiligen Komponente.

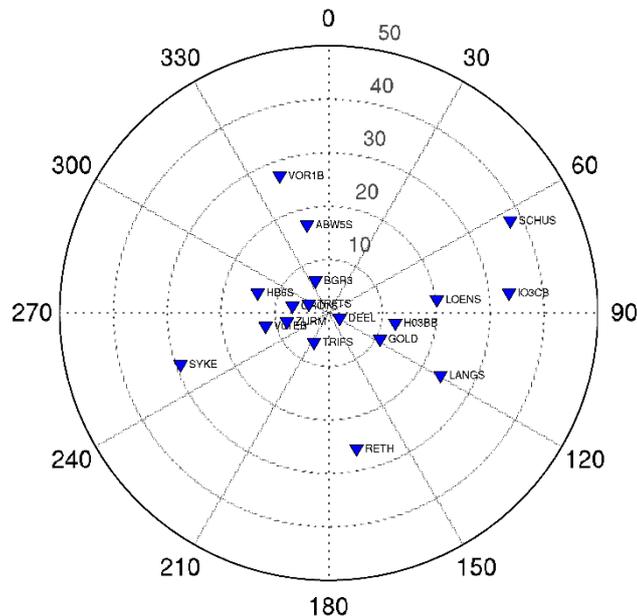


Abbildung 3: Polardiagramm der richtungs- und entfernungsabhängigen Verteilung der Stationen, die zur Lokalisierung des Erdbebens am 20. November 2019 um 18:28 Uhr lokaler Zeit (17:28 UTC) verwendet werden, relativ zum Epizentrum (Koordinatenursprung).

2.2 Frühere Seismizität am Erdgasfeld Völkersen

Im Erdbebenkatalog des NED sind insgesamt 21 Erdbeben an der Erdgaslagerstätte Völkersen im Magnitudenbereich von 0,5 bis 3,2 aufgeführt. Das erste Erdbeben in dieser Region wurde am 3. April 2008 instrumentell registriert und mit M_L 2,8 bewertet. Insgesamt ereigneten sich am Erdgasfeld Völkersen drei Erdbeben mit Magnituden ab 3. Das stärkste Erdbeben mit M_L 3,2 ist das hier detailliert vorgestellte Erdbeben am 20. November 2019 um 18:28 Uhr lokaler Zeit, die anderen ein Erdbeben am 22. November 2012 (M_L 3,1; Bischoff et al, 2016) und das spätere Erdbeben am 20. November 2019 um 22:32 Uhr (M_L 3,0). Abbildung 4 zeigt die Verteilung der Epizentren. Herdparameter (Herdzeit, Epizentrum, Tiefe, Magnitude) aller am Erdgasfeld Völkersen registrierten Erdbeben sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Die aktuellen Erdbeben liegen im südöstlichen Teil der Erdgaslagerstätte Völkersen. Bisher im Ostteil der Lagerstätte in der Nähe der aktuellen Epizentren geortete Erdbeben sind die Ereignisse am 24.04.2010 (M_L 1,9), am 02.05.2011 (M_L 2,5), am 15.11.2016 (M_L 2,5) und am 11.12.2017 (M_L 2,5) sowie weitere Erdbeben unterhalb der Spürbarkeitsgrenze.

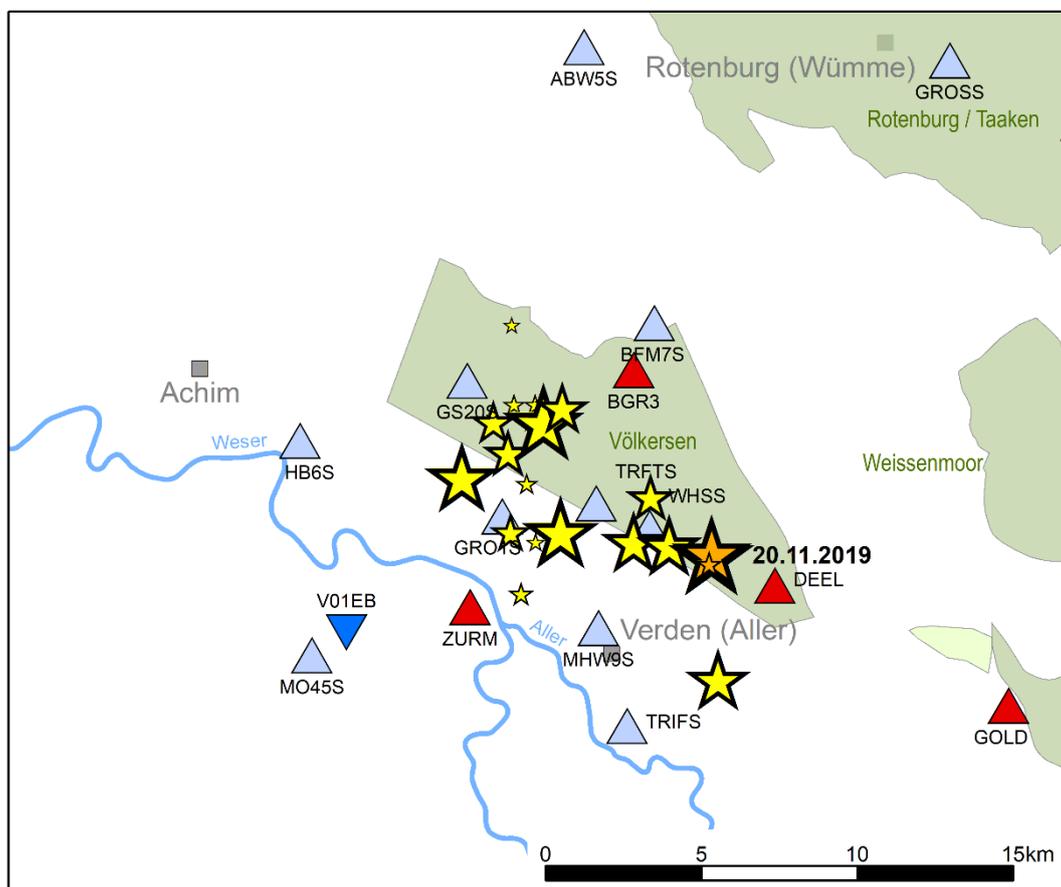


Abbildung 4: Karte der insgesamt 21 instrumentell registrierten Erdbeben (Sterne) am Erdgasfeld Völkersen, der zum Zeitpunkt der Erdbeben am 20.11.2019 (orange) installierten seismischen Messstationen (Dreiecke) unterschieden nach den Betreibern und dem Überwachungsziel (rot: Ortungsstationen BGR, dunkelblau: Ortungsstationen BVEG, hellblau: Erschütterungsstationen BVEG und Wintershall Dea) und der produktiven (dunkelgrün) sowie der aufgegebenen (hellgrün) Erdgaslagerstätten.

Tabelle 2: Herdparameter der am Erdgasfeld Völkersen instrumentell registrierten Erdbeben aus dem Erdbebenkatalog des NED. Mit „f“ markierte Herdtiefen wurden nicht invertiert, sondern für die Lokalisierung des Epizentrums festgesetzt. Die Abkürzungen der Quellenangaben stehen für Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und DMT GmbH & Co. KG (DMT). Insgesamt wurden 21 Erdbeben mit Lokalmagnituden (M_L) von 0,5 bis 3,2 registriert.

Datum (Lokalzeit)	Herdzeit (Lokalzeit)	geogr. Breite [°Nord]	geogr. Länge [°Ost]	Herdtiefe [km]	Magnitudo M_L	Quelle
20.11.2019	22:32	52,97	9,28	3,9	3,0	BGR
20.11.2019	20:52	52,96	9,28	4f	1,0	BGR
20.11.2019	18:28	52,97	9,28	3,9	3,2	BGR
11.12.2017	01:13	52,97	9,25	5f	2,5	BGR
27.02.2017	11:44	53,01	9,21	3,6	2,1	BGR
15.11.2016	10:27	52,97	9,26	5f	2,5	BGR
22.04.2016	19:45	53,01	9,20	4,1	3,1	BGR
27.02.2016	19:02	53,00	9,20	-	0,9	DMT
22.01.2016	21:38	52,96	9,19	5 f	1,0	BGR
13.12.2015	19:44	53,01	9,20	-	0,9	DMT
06.12.2015	14:37	53,00	9,19	5 f	1,9	BGR
20.06.2014	04:58	53,01	9,19	-	0,9	DMT
20.06.2014	04:57	52,97	9,19	5 f	1,6	BGR
17.05.2014	00:26	52,97	9,20	-	0,8	DMT
02.11.2013	04:14	53,03	9,19	5 f	0,7	BGR
01.11.2013	21:17	53,01	9,18	5 f	1,8	BGR
01.11.2013	21:15	53,00	9,20	5 f	0,5	BGR
22.11.2012	21:38	52,97	9,21	4,9	2,9	BGR
02.05.2011	04:57	52,93	9,29	3,6	2,5	BGR
24.04.2010	16:10	52,98	9,26	5 f	1,9	BGR
03.04.2008	02:06	52,99	9,17	5 f	2,8	BGR

3 Erdgaslagerstätte Völkersen

Die Lagerstättenverhältnisse des Erdgasfeldes Völkersen wurden bereits in Berichten zu den Erdbeben bei Völkersen am 22.11.2012 (Bischoff et al., 2013) und 22.04.2016 (Bischoff et al., 2016) dargestellt. Zur besseren Lesbarkeit und Vollständigkeit werden sie in diesem Bericht mit aktualisierten Daten erneut beschrieben.

Die Erdgaslagerstätte Völkersen (Abb. 4) wurde 1992 mit der Explorationsbohrung Völkersen Z1 in den Gesteinsschichten des Rotliegend in einer Tiefe von ungefähr 4800 m u. NN entdeckt. Die Lagerstätte konnte sich an dieser Stelle vor Jahrmillionen bilden, weil hier eine geologische Fallenstruktur ausgebildet ist, in der sich das in den Kohleflözen des Oberkarbons generierte Erdgas im Porenraum darüber liegender Rotliegend-Gesteine sammeln und anreichern konnte. Überlagernde abdichtende Gesteinsschichten verhinderten ein Weiterwandern des Erdgases in höher liegende Schichten und sorgten somit dauerhaft für die Abschirmung der Lagerstätte gegen die höher liegenden Gesteinsschichten, Trinkwasserreservoirien und die Atmosphäre.

Das Rotliegend ist in dieser Region als eine Abfolge von z.T. gut porösen Sandsteinen ausgebildet, die im höheren Teil mit Tonsteinen wechsellagern. An der Basis der Abfolge ist ein bis zu einige hundert Meter mächtiger Sandstein entwickelt. Dieser Sandstein stellt in der Erdgaslagerstätte Völkersen das wichtigste Reservoirgestein dar. Im höheren Teil der Abfolge sind weitere, deutlich geringmächtigere Sandsteinhorizonte als Reservoirgesteine entwickelt und ebenfalls gasführend.

Seit dem Fund 1992 wurden bislang 28 Bohrungen zur weiteren Erkundung und Ausförderung der Lagerstätte durchgeführt. Die Förderung wurde nach dem Bau der erforderlichen obertägigen Betriebsanlagen 1994 aufgenommen. Die zeitliche Entwicklung der jährlichen Rohgasförderung ist in Abbildung 5 dargestellt. Die bisher höchsten jährlichen Fördermengen wurden im Zeitraum 2008 bis 2010 mit jeweils rund 1,3 Mrd. m³ erreicht. Aufgrund der zunehmenden Ausförderung der Lagerstätte ist die Fördermenge seitdem auf etwa 0,64 Mrd. m³ in 2019 zurückgegangen. 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. Wegen der Entnahme des Erdgases nimmt der Druck innerhalb der Lagerstätte immer weiter ab. Durch diesen Druckabfall werden im Reservoirgestein und letztendlich auch in den Gesteinen in der räumlichen Umgebung der Lagerstätte Spannungsänderungen hervorgerufen. Diese Spannungsänderungen sind geeignet, vorhandene Schwächezonen zu reaktivieren und gegebenenfalls Erdbeben auszulösen.

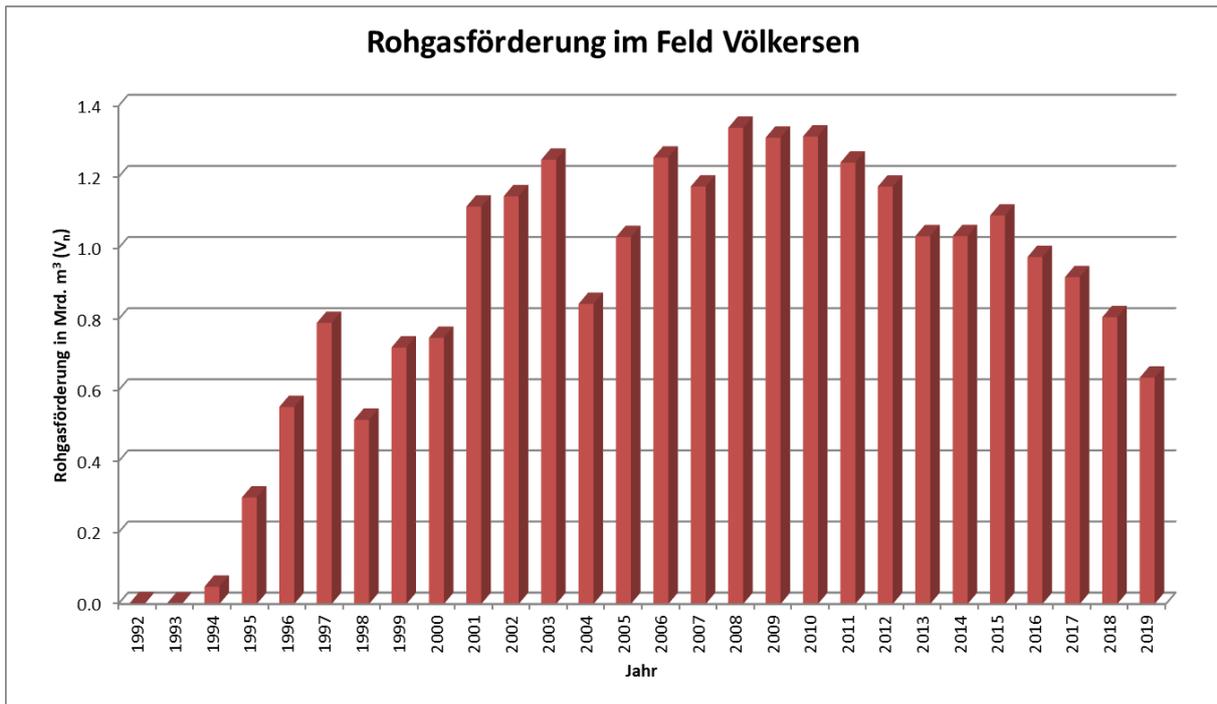


Abbildung 5: Jährliche Rohgasförderungsmengen der Lagerstätte Völkersen von 1992 bis 2019.

4 Auswirkungen an der Erdoberfläche

4.1 Makroseismik

Die Erdbeben vom 20. November (18:28 Uhr und 22:32 Uhr) wurden von der örtlichen Bevölkerung verspürt. Für den Abend des 20. November 2020 gingen bis einschließlich 25. November 2020 insgesamt 173 makroseismische Meldungen im LBEG ein. Von den eingegangenen Meldungen konnten 59 Meldungen dem Erdbeben um 18:28 Uhr bzw. 100 Meldungen dem Erdbeben um 22:32 Uhr zugeordnet werden. Bei vierzehn Meldungen war eine räumliche Zuordnung und somit eine Auswertung nicht möglich.

Die Bewertung der Makroseismik nach der Europäischen Makroseismischen Skala (EMS-98, Grünthal et al., 1998; Anhang 1) kann für beide Erdbeben nur näherungsweise erfolgen, da eine Gruppierung von Fragebögen und die daraus folgende Ableitung von Intensitätswerten aufgrund der geringen Anzahl von 59 bzw. 100 makroseismischen Meldungen nicht möglich ist.

Erdbeben um 18:28 Uhr, M_L 3,2

Für das Erdbeben um 18:28 Uhr stammen die 59 Meldungen aus den Orten Langwedel, Verden (Aller), Kirchlinteln und vereinzelt aus weiteren Ortschaften in Epizentralentfernungen bis 27 km (Abb. 6. In zwei Meldungen aus Langwedel, ca. 8 km entfernt, sowie einer Meldung aus Kirchlinteln, ca. 7 km entfernt, ist angegeben, dass keine Auswirkungen des Erdbebens wahrgenommen wurden. Es liegen also 56 Meldungen vor, in denen die Erschütterung gespürt wurde. Nur wenige (10%) Meldungen stammen aus dem Gebiet nördlich des Epizentrums. Die meisten Meldungen haben ihren Ursprung in Verden (Aller) und Kirchlinteln südlich des Epizentrums.

In 33 Meldungen werden die Auswirkungen des Erdbebens um 18:28 Uhr als mäßig bis sehr starke Erschütterungen bewertet. Im Detail berichten die Meldenden von klapperndem Geschirr (Anzahl: 33) oder klappernden Türen und Fenstern (27). Ebenso werden stärkere Auswirkungen genannt. Dazu gehören die Beobachtungen von verschobenen oder umgefallenen kleinen Gegenständen (7), vom Herabfallen von Gegenständen (4) und von auf- und zuschlagenden Türen (1). In den verfügbaren makroseismischen Meldungen werden leichte Gebäudeschäden beschrieben. Es wird von Rissen in Wänden im Innen- (15) und Außenbereich (8) berichtet. Insgesamt ergeben die Meldungen kein klares räumlich-strukturiertes Bild. Meldungen von starken Auswirkungen, die z.T. leichte Schäden benennen, liegen unmittelbar neben Meldungen von schwachen Auswirkungen.

Aufgrund der geringen Anzahl von 59 Meldungen und deren räumlicher Verteilung können für dieses Erdbeben keine Gruppierungen für die Bestimmung von Intensitätswerten nach EMS-98 durchgeführt werden. Zudem weisen zum Teil Meldungen in unmittelbarer Nachbarschaft große Unterschiede in der Wahrnehmung und in den gemeldeten Auswirkungen aus. Eine Abgrenzung von Gebieten unterschiedlicher Intensitäten ist daher nicht möglich.

Um näherungsweise eine Bewertung einer maximalen Intensität nach EMS-98 zu erreichen, werden die Meldungen dahingehend geprüft, ob Hinweise auf eine Intensität V ($I=V$) oder niedriger vorliegen.

In Abbildung 6 sind die makroseismischen Meldungen für das Erdbeben um 18:28 Uhr, M_L 3,2, klassifiziert aufgeführt. Insgesamt liegen in 24 von 59 Meldungen mit Epizentralentfernungen zwischen ca. 2 und 27 km Hinweise auf eine Intensität V vor. Die Standorte von Beobachtungen mit Hinweisen auf Intensität V liegen in Verden (Aller), Walle, und Kirchlinteln. Aus Verden (Aller) liegen die meisten Beobachtungen mit Hinweisen auf $I=V$ vor (10). Alle weiteren Meldungen mit Hinweisen auf Intensität V sind vereinzelt über das betroffene Gebiet verteilt. Eine makroseismische Meldung aus Bommelsen, in 27 km Epizentralentfernung, wird aufgrund der Entfernung zum Epizentrum sowie aufgrund des Fehlens weiterer Meldungen aus diesem Gebiet als unplausibel bewertet.

35 Meldungen in ca. 2 bis 21 km Epizentralentfernung geben keine Hinweise, dass eine Intensität V erreicht wurde. Die Beobachtungen in diesen Meldungen lassen auf das Erreichen einer Intensität IV oder niedriger schließen. In drei Meldungen wird angegeben, dass keine Erschütterung verspürt wurde.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass für das Erdbeben um 18:28 Uhr, M_L 3,2, nur wenige makroseismische Meldungen aus der Bevölkerung vorliegen. Makroseismische Meldungen mit starken sowie schwachen Auswirkungen liegen in unmittelbarer Nachbarschaft. Aufgrund der geringen Anzahl an makroseismischen Meldungen sowie aufgrund der stark differierenden Beobachtungen lassen sich keine aussagekräftigen Isoseisten zu den Auswirkungen der Erschütterung erstellen. Eine maximale Intensität kann aus den vorliegenden Beobachtungen nicht abschließend festgelegt werden. Kleinräumig besteht die Möglichkeit, dass eine Intensität von V erreicht wurde. Allerdings sprechen die Anzahl, die räumliche Verteilung und die unmittelbare Nachbarschaft von Meldungen mit sehr unterschiedlichen Auswirkungen gegen eine generelle Bewertung des Erdbebens mit einer maximalen Intensität V.

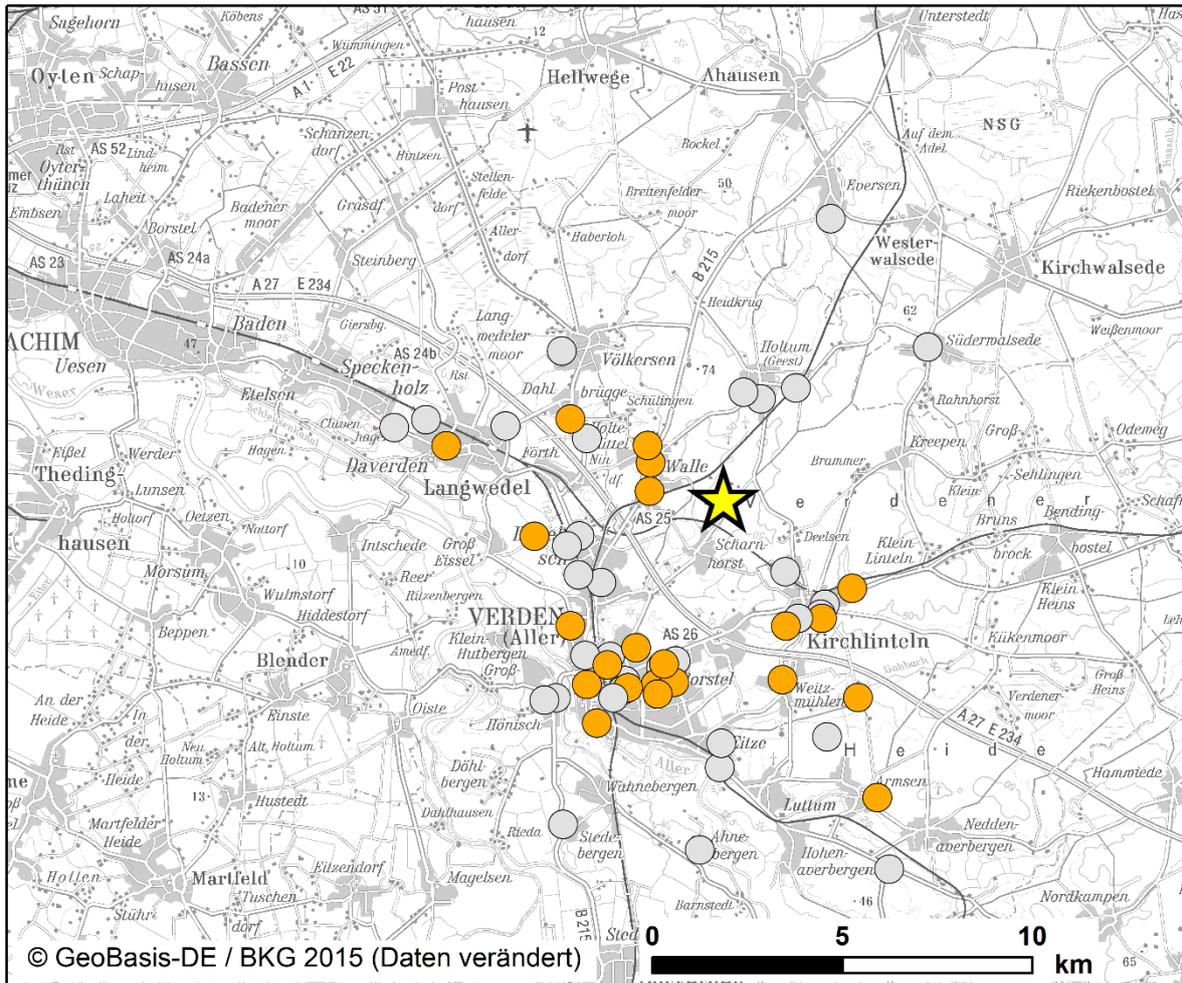


Abbildung 6: Karte der 59 makroseismischen Meldungen mit Hinweisen auf Intensität V (orange Punkte) oder niedriger (hellgraue Punkte), die über den Internetfragebogen im NED eingegangen sind. Ebenfalls dargestellt ist das Epizentrum für das Erdbeben um 18:28 Uhr, M_L 3,2 (gelber Stern).

Erdbeben um 22:32 Uhr, M_L 3,0

Das Erdbeben um 22:32 Uhr wurde ebenfalls in der Bevölkerung verspürt. Insgesamt konnten 100 makroseismische Beobachtungen dem Erdbeben zugeordnet werden, die aus den Gemeinden Verden (Aller), Kirchlinteln, Langwedel, Blender sowie aus dünn besiedelten Gebieten bis ca. 18 km Entfernung vom Epizentrum gemeldet wurden. Die meisten Meldungen stammen aus den Orten Verden (Aller), Langwedel und Kirchlinteln. Auch bei diesem Erdbeben gab es nur wenige Beobachtungen nördlich des Epizentrums. Beispielsweise liegen aus Holtum, in ca. 3 km Epizentralentfernung, keine makroseismischen Meldungen vor.

Alle zum Erdbeben um 22:32 Uhr, M_L 3,0, eingegangenen makroseismischen Meldungen geben an, Erschütterungen verspürt zu haben. Von 73 Personen wurden die Erschütterungen des Erdbebens von mäßig stark bis sehr stark bewertet. Vier Personen haben ein Geräusch

wahrgenommen, ohne eine Erschütterung verspürt zu haben. In 66 Meldungen wurde klapperndes Geschirr wahrgenommen und in 55 Meldungen wurde von klappernden Türen und Fenstern berichtet. Ebenso liegen Meldungen von Rissen im Innenputz (20) sowie im Außenputz (10) vor. In einem Fall wurde von heruntergefallenem Wand- oder Deckenputz berichtet.

Aufgrund der geringen Anzahl von 100 Meldungen und deren räumlicher Verteilung können für dieses Erdbeben keine Gruppierungen für die Bestimmung von Intensitätswerten nach EMS-98 durchgeführt werden. Zudem weisen zum Teil Meldungen in unmittelbarer Nachbarschaft große Unterschiede in der Wahrnehmung und in den gemeldeten Auswirkungen aus. Eine Abgrenzung von Gebieten unterschiedlicher Intensitäten ist nicht möglich.

Um näherungsweise eine Bewertung einer maximalen Intensität nach EMS-98 zu erreichen, werden die Meldungen dahingehend geprüft, ob Hinweise auf eine Intensität V ($I=V$) oder auf eine niedrigere Intensität vorliegen.

In Abbildung 7 sind die makroseismischen Meldungen für das Erdbeben um 22:32 Uhr, M_L 3,0, klassifiziert aufgeführt. Insgesamt liegen in 42 von 100 Meldungen mit Epizentralentfernungen zwischen ca. 2 und 18 km Hinweise auf eine Intensität V vor. Die Standorte von Beobachtungen mit Hinweisen auf Intensität V liegen in Verden (Aller), Walle, Völkersen und Kirchlinteln. Aus Verden (Aller) wurden die meisten Beobachtungen mit Hinweisen auf eine Intensität V gemeldet (22). Auch dort weisen allerdings Meldungen in unmittelbarer Nachbarschaft große Unterschiede in der Wahrnehmung und in den gemeldeten Auswirkungen aus. So liegen aus Verden auch zahlreiche makroseismische Meldungen vor, die keine Hinweise auf Intensität V beinhalten (24).

Insgesamt 58 Meldungen aus Epizentralentfernungen zwischen ca. 2 und 17 km enthalten keine Hinweise, dass eine Intensität V erreicht wurde. Die Beobachtungen in diesen Meldungen lassen auf das Erreichen einer Intensität IV oder niedriger schließen. Es ist auffällig, gemessen an der Bevölkerungszahl und dem Zeitpunkt des Erdbebens, dass auch zu diesem Erdbeben nur wenige makroseismische Meldungen eingegangen sind.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass für das Erdbeben um 22:32 Uhr, M_L 3,0, nur wenige makroseismische Meldungen aus der Bevölkerung vorliegen. Makroseismische Meldungen mit starken sowie schwachen Auswirkungen liegen in unmittelbarer Nachbarschaft. Aufgrund der geringen Anzahl an makroseismischen Meldungen sowie aufgrund der stark differierenden Beobachtungen lassen sich keine aussagekräftigen Isoseisten zu den Auswirkungen der Erschütterung erstellen. Aus der Zahl und den Beschreibungen in den vorliegenden makroseismischen Beobachtungen ist festzustellen, dass durch das Erdbeben lokal eine Intensität von V nach EMS-98 erreicht wurde. Im Vergleich mit dem Erdbeben um 18:28 Uhr, M_L 3,2, wird das Erdbeben um 22:32 Uhr, M_L 3,0, mit einer maximalen Intensität von V bewertet, da die Anzahl und Inhalte der makroseismischen Meldungen eine eindeutigere Bewertung der Auswirkungen ermöglichen.

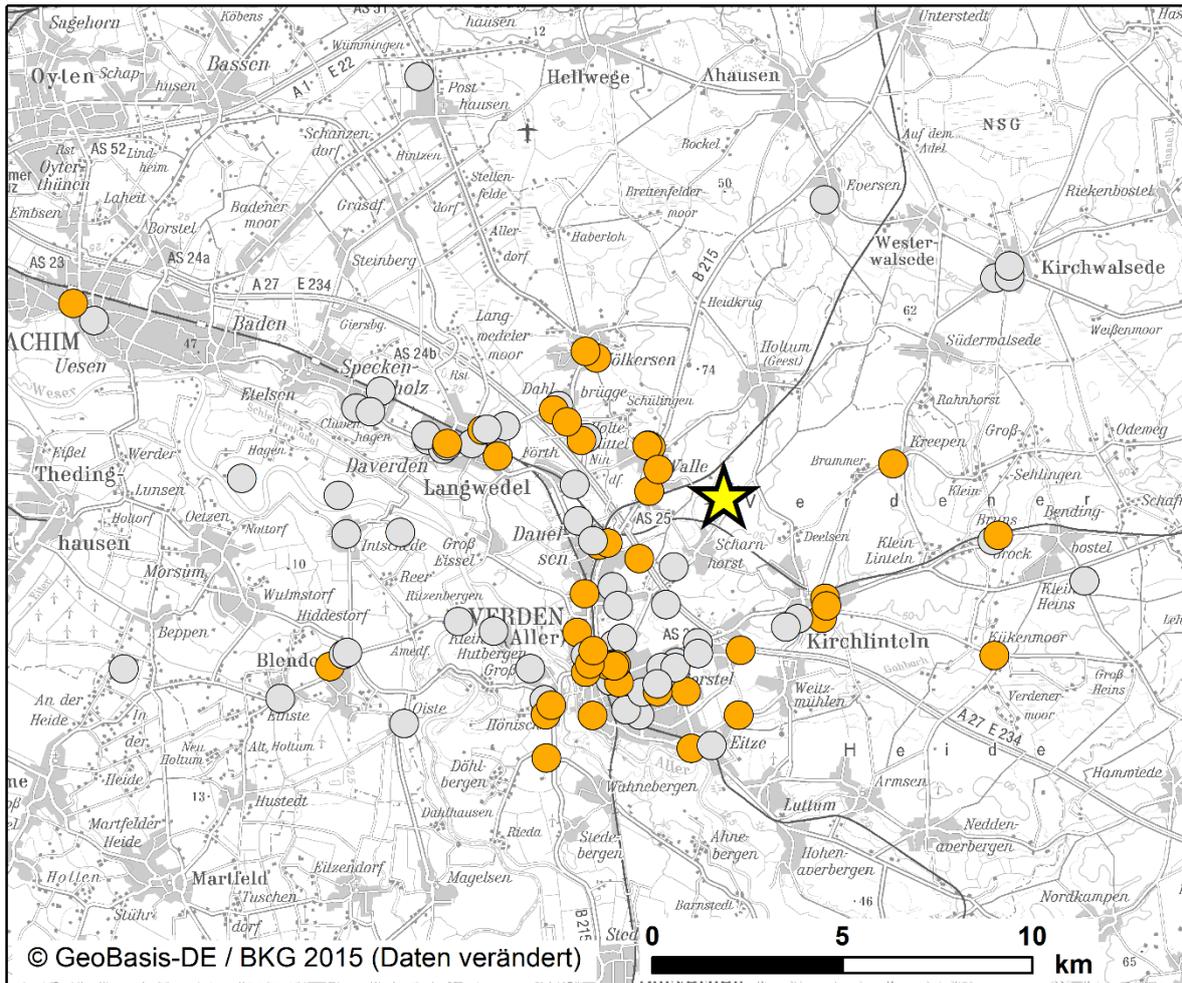


Abbildung 7: Karte der 100 makroseismischen Meldungen mit Hinweisen auf Intensität V (orange Punkte) oder niedriger (hellgraue Punkte), die über den Internetfragebogen im NED eingegangen sind. Ebenfalls dargestellt ist das Epizentrum für das Erdbeben um 22:32 Uhr, M_L 3,0 (gelber Stern).

Vergleich der Auswirkungen mit vorherigen Erdbeben

Die makroseismischen Meldungen der Erdbeben vom 20. November 2019 können mit der Makroseismik anderer Erdbeben im gleichen Magnitudenbereich in der Erdgasförderregion Niedersachsens verglichen werden. Ein Vergleich bietet sich insbesondere mit den vorhergehenden Erdbeben im Bereich des Erdgasfeldes Völkersen sowie mit dem Erdbeben bei Syke in 2014 an (Tabelle 3:).

Die Erschütterungsmeldungen zum Erdbeben bei Völkersen am 20. April 2016 stammen ebenfalls aus dem Umkreis von Verden und gingen aus Epizentralentfernungen bis 13 km ein. Mit 144 makroseismischen Meldungen lagen 2016 deutlich mehr Beobachtungen vor als mit 100 bzw. 59 Meldungen für die Erdbeben am 20. November 2019. Die Inhalte sowie die Verteilung der Meldungen weisen Ähnlichkeiten vor allem zu dem Erdbeben M_L 3,0 auf. Makroseismische

Meldungen mit starken sowie schwachen Auswirkungen liegen wie für die Erdbeben in 2019 zum Teil in unmittelbarer Nachbarschaft. Die maximale Intensität des Erdbebens bei Völkersen am 20. April 2016 wurde auf $I = V - VI$ festgelegt. Das vergleichbare Ursprungsgebiet und die sehr ähnlichen makroseismischen Beschreibungen deuten darauf hin, dass auch für das Erdbeben vom 20.11.2019, $M_L 3,0$, eine Bewertung mit der maximalen Intensität von V plausibel ist. Diese Einschätzung wird weiterhin gestützt durch den Vergleich mit den Erdbeben bei Völkersen 2012 und Syke 2014 (s. Tab. 3).

Das Erdbeben am 20. November 2019 um 18:28 Uhr, $M_L 3,2$, lässt sich makroseismisch, im Vergleich mit früheren Erdbeben, nur schwer einordnen. Obwohl eine vergleichbare Magnitude nachgewiesen wurde, liegen deutlich weniger makroseismische Meldungen vor. Allerdings weisen auch hier der Inhalt und die Verteilung der Meldungen die oben beschriebenen Ähnlichkeiten auf.

Zusammenfassend wird das Erdbeben bei Kirchlinteln am 20. November 2019, $M_L 3,0$, mit der maximalen Intensität von V bewertet. Eine Bewertung der maximalen Intensität des Erdbebens am 20. November 2019, $M_L 3,2$ kann aufgrund der unzureichenden makroseismischen Datengrundlage nicht erfolgen.

Tabelle 3: Makroseismische Intensität nach EMS-98 für Erdbeben am Erdgasfeld Völkersen und für das Erdbeben ähnlicher Stärke und ähnlicher Herdtiefe bei Syke 2014.

Datum	Region	Herdtiefe [km]	Magnitude M_L	Intensität I_0
22.11.2012	Völkersen	$4,9 \pm 1,6$	2,9	V
01.05.2014	Syke	$4,2 \pm 2,8$	3,2	IV-V
22.04.2016	Völkersen	$4,1 \pm 1,4$	3,0	V-VI

4.2 Bodenschwinggeschwindigkeiten

An den Erschütterungsmessstationen des Bergschadenkundlichen Beweissicherungssystems (BBS) des BVEG und den zusätzlichen Erschütterungsmessstationen von Wintershall Dea wurden maximale Bodenschwinggeschwindigkeiten (PGV-Werte, engl.: Peak Ground Velocity) entsprechend DIN 4150 gemessen (Tab. 4). Auch an den seismologischen Stationen der BGR, die primär der detaillierten seismologischen Auswertung dienen, wurden PGV-Werte bestimmt (Tab. 4). Diese Stationen entsprechen nicht den Anforderungen der DIN 4150, wurden jedoch im Rahmen der umfassenden fachlichen Bewertung berücksichtigt.

Die größte Schwinggeschwindigkeit wurde für beide Erdbeben vom 20. November 2019 jeweils an der Station WHSS in Walle gemessen. Bei dem Erdbeben um 22:32 Uhr mit den stärkeren Auswirkungen, erreichte die Amplitude eine Schwinggeschwindigkeit von 5,1 mm/s in der Epizentralentfernung von 2,1 km. Zwei weitere Werte mit Bodenschwinggeschwindigkeiten oberhalb von 3 mm/s wurden in Epizentralentfernungen von etwa vier Kilometern gemessen (3,8 mm/s und 3,0 mm/s). Insgesamt stehen aus Epizentralentfernungen bis 10 km die Messwerte von zehn Messstationen zur Verfügung. Die jeweiligen Messergebnisse für beide Erdbeben am 20. November 2019 sind in Tabelle 4 aufgeführt. Alle weiteren Erschütterungsmessungen erfolgten in größeren Entfernungen und die jeweils gemessenen PGV-Werte liegen unterhalb von 0,7 mm/s.

Tabelle 4: Bodenschwinggeschwindigkeiten in Epizentralentfernungen bis 10 km an Erschütterungsmessstationen des Bergschadenkundlichen Beweissicherungssystems (BBS) entsprechend DIN 4150 sowie an Stationen der BGR.

Station	Messnetz	Entfernung (km)	PGV (mm/s) 18:28 Uhr	PGV (mm/s) 22:32 Uhr
WHSS	BBS	2,1	1,7	5,1
DEEL	BGR	2,3	2,0	2,0
TRFTS	BBS	4,0	1,2	3,8
MHW9S	BBS	4,4	1,0	3,0
TRIFS	BBS	6,2	1,9	1,5
BGR3	BGR	6,4	0,7	1,5
GRO1S	BBS	6,8	0,5	1,3
BFM7S	BBS	7,6	0,4	0,8
ZURM	BGR	8,0	0,6	1,1
GS20S	BBS	9,6	0,2	0,2

Die für die beiden Erdbeben vom 20. November 2019 gemessenen Bodenschwinggeschwindigkeiten werden im Folgenden anhand des Anhaltswertes für Schwinggeschwindigkeiten der DIN 4150 für Wohngebäude von 5 mm/s bewertet. Für Schwinggeschwindigkeiten unterhalb dieses Anhaltswertes ist nicht mit Schäden an üblichen Wohngebäuden zu rechnen. Bei dem Erdbeben um 22:32 Uhr wurde dieser Wert an der Station WHSS in Walle mit 5,1 mm/s leicht überschritten. Da PGV-Messungen nicht flächenhaft registriert werden, ist es möglich, dass

auch zwischen Messstationen Schwinggeschwindigkeiten oberhalb von 5mm/s aufgetreten sind.

Ausgehend von der lokal nachgewiesenen Überschreitung des Anhaltswertes von 5 mm/s der DIN 4150 ist es möglich, dass an einigen Gebäuden vorrangig empfindlicher Bauart Schäden durch die Erschütterungswirkung entstanden sein können.

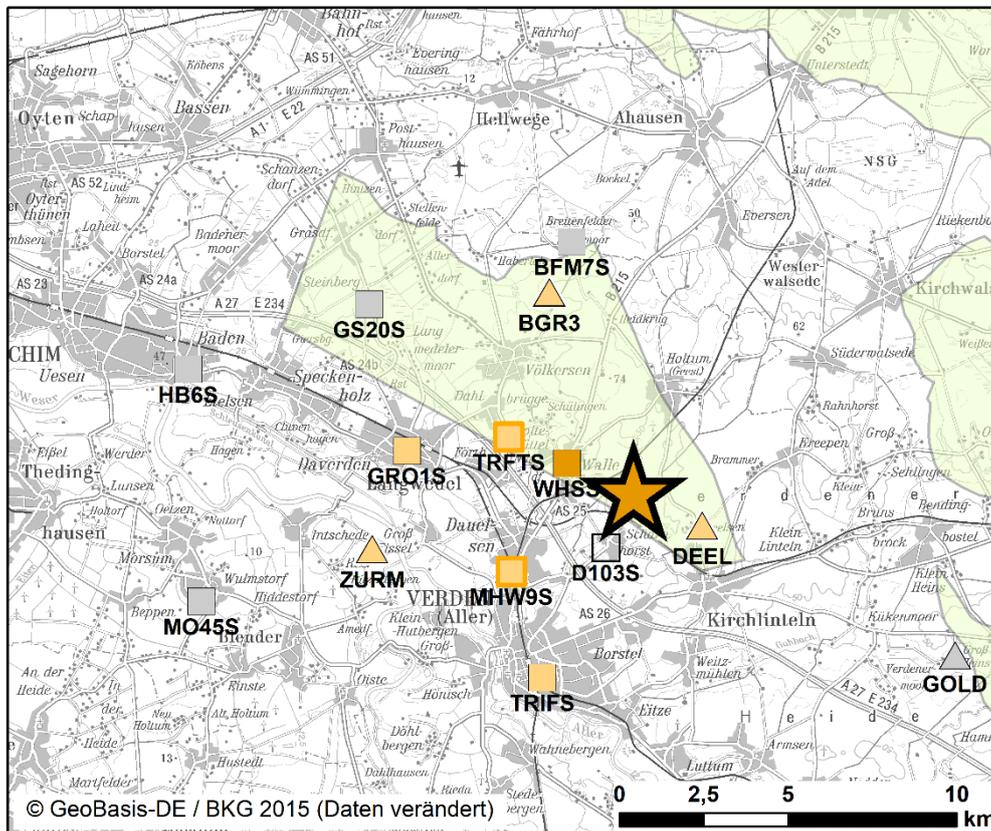


Abbildung 8: Karte der Oberflächen-Messstationen (Dreiecke und Quadrate) farblich unterschieden nach den um 22:32 Uhr gemessenen Schwinggeschwindigkeiten: $PGV < 1$ mm/s (grau), $1 \text{ mm/s} \leq PGV < 3$ mm/s (orange), $3 \text{ mm/s} \leq PGV < 5$ mm/s (orange mit dunkel-oranger Umrandung) und ≥ 5 mm/s (dunkel-orange) und zugehöriges Epizentrum (Stern) sowie der nach den Erdbeben installierten Erschütterungsstation D103S in Scharnhorst (farbloses Quadrat).

Die PGV-Werte zeigen keine kontinuierliche Abnahme der Bodenschwinggeschwindigkeit mit zunehmender Epizentralentfernung. Für Standorte in ähnlichen Epizentralentfernungen wird eine hohe Variabilität beobachtet. Zudem unterscheidet sich die räumliche Verteilung der gemessenen PGV-Werte des Erdbebens um 22:32 Uhr auffällig von derjenigen des Erdbebens um 18:28 Uhr. Amplitudenverhältnisse für Stationspaare variieren im Vergleich der beiden Erdbeben erheblich, obwohl die Hypozentren und damit die jeweiligen Hypozentralabstände identisch sind.

Zum Beispiel ist die Bodenschwinggeschwindigkeit um 22:32 Uhr an der Station WHSS mit 5,1 mm/s bei sehr ähnlicher Epizentralentfernung mehr als doppelt so hoch wie die an der

Station DEEL gemessene Bodenschwinggeschwindigkeit von 2,0 mm/s. Dieser Unterschied von 3,1 mm/s zwischen den an den Stationen WHSS und DEEL gemessenen Bodenschwinggeschwindigkeiten wird für das Erdbeben um 18:28 Uhr nicht beobachtet (Tab. 4). Die maximale Bodenschwinggeschwindigkeit an der Station TRIFS in Verden ist für das frühere Erdbeben um 18:28 Uhr mit 1,9 mm/s höher als die für TRIFS mit 1,5 mm/s bestimmte Bodenschwinggeschwindigkeit für das Erdbeben um 22:32 Uhr, für das insgesamt stärkere Auswirkungen (Makroseismik und PGV-Messungen) beobachtet werden. Trotz der Epizentralentfernung von 6 km und vier näher am Epizentrum liegender Stationen weist die Messstation TRIFS für das frühere Erdbeben den zweithöchsten Messwert der Bodenschwinggeschwindigkeit auf.

Physikalisch können solche Abweichungen mit kleinräumigen Unterschieden im Aufbau des oberflächennahen Untergrundes erklärt werden, die zu lokalen Verstärkungen oder Verminderungen der Schwinggeschwindigkeiten führen (Standorteffekte, engl.: site effects). Andere Gründe für die beobachtete Verteilung der Bodenschwinggeschwindigkeiten können die richtungsabhängige Energieabstrahlung vom Erdbebenherd (Abstrahlcharakteristik) oder Effekte des Bruchverlaufs (Direktivität) sein. Auch eine Kombination dieser Effekte ist möglich.

Aus den zur Verfügung stehenden Messungen ist abzuleiten, dass solche Effekte bei der Bewertung der gemessenen Bodenschwinggeschwindigkeiten berücksichtigt werden müssen und die Bodenschwinggeschwindigkeiten in Verden verstärken könnten. Hinweise auf kleinräumige Variationen der Bodenschwinggeschwindigkeit zeigten sich schon in der Auswertung des Erdbebens am 22. April 2016. Damals wurde die höchste Bodenschwinggeschwindigkeit in der Allerniederung gemessen (Station ZURM). Sie lag deutlich über den Werten von Stationen mit geringerer Epizentralentfernung (Stationen TRFTS, GRO1S, BGR3) und wurde als ein Hinweis interpretiert, dass Standorteffekte im Landkreis Verden berücksichtigt werden müssen.

Zusammenfassend folgt aus den Messungen der Bodenschwinggeschwindigkeiten, dass der Anhaltswert gemäß DIN 4150 von 5 mm/s bei dem Erdbeben am 20. November 2019 um 22:32 Uhr überschritten wurde. Zudem deuten die gemessenen PGV-Werte auf kleinräumige Variationen der Bodenschwinggeschwindigkeiten, z.B. durch die Herdmechanismen oder durch Standorteffekte hin. Die Messungen der Bodenschwinggeschwindigkeit sind somit als Punktmessungen zu bewerten, in deren Umfeld auch höhere oder niedrigere Bodenschwinggeschwindigkeiten auftreten können. Es ist möglich, dass an einigen Gebäuden vorrangig empfindlicher Bauart leichte Schäden durch die Erschütterungswirkung entstanden sein können.

Auf eine weitergehende Betrachtung des Erdbebens am 29. November 2019 um 18:28 Uhr, wird in diesem Bericht aufgrund der zeitlichen und räumlichen Nähe zum Erdbeben am 29. November 2019 um 22:32, für das die stärkeren Auswirkungen beobachtet werden, verzichtet. Das Erdbeben am 29. November um 20:52 Uhr, M_L 1,0, liegt weit unterhalb der Spürbarkeitsgrenze und wird daher nicht betrachtet.

4.3 Einwirkungen auf Gebäude

Schadensmeldungen

Dem NED liegen nur wenige Schadensmeldungen vor. Entsprechend der medialen Berichterstattung und den Aussagen des Förderunternehmens während der Informationsveranstaltung in Kirchlinteln ist davon auszugehen, dass dem Förderunternehmen mehr als 500 Schadensmeldungen vorliegen. Bei den meisten der gemeldeten Schäden handelt es sich demnach um leichte, nicht-strukturelle Schäden.

Eine vollständige Übersicht über Schadensmeldungen liegt nur dem Betreiber des Erdgasfelds vor. Das genaue Ausmaß der Schäden ist dem LBEG nicht bekannt. Da Bewertungen durch Bausachverständige für die Schadensmeldungen nicht vorliegen, kann die Frage nach deren Ursache bisher nicht abschließend beantwortet werden. Eine Bewertung der dem Betreiber gemeldeten Schäden erfolgt nicht durch das LBEG.

Einwirkungsbereich nach Auftritt einer Erschütterung

Schäden durch Erschütterungen aufgrund von induzierten Erdbeben sind Bergschäden im Sinne des Bundesberggesetzes. Durch die Novellierung der Einwirkungsbereichsbergverordnung (EinwirkungsBergV) wurden die gesetzliche Regelungen für die Schadensregulierung für die Bevölkerung verbessert. Im Einwirkungsbereich (Intensität V, Bodenschwinggeschwindigkeit ≥ 5 mm/s) gilt die Bergschadensvermutung. Ein Einwirkungsbereich ist für bergbauinduzierte Erdbeben „bei einer zumindest starken makroseismischen Intensität und entsprechenden Bodenschwinggeschwindigkeiten“ (§3 (4) EinwirkungsBergV) festzulegen.

Die Auswertungen der makroseismischen Meldungen sowie der gemessenen Bodenschwinggeschwindigkeiten für das Erdbeben am 20. November 2019 um 22:32 Uhr (M_L 3,0) ergeben, dass lokal die Intensität V gemäß EMS-98 erreicht und der Anhaltswert der Bodenschwinggeschwindigkeit gemäß DIN 4150 von 5 mm/s überschritten wurde. Ausgehend von den Ergebnissen ist es möglich, dass an einigen Gebäuden vorrangig empfindlicher Bauart Schäden durch die Erschütterungswirkung entstanden sein können. Ein möglicher Einwirkungsbereich sollte mindestens die Bereiche umfassen, in denen die beschriebenen und gemessenen Auswirkungen aufgetreten sind. Der Einwirkungsbereich wird in einem eigenen Verfahren, unabhängig von diesem fachlichen Bericht, festgelegt.

5 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

5.1 Seismizität am Erdgasfeld Völkersen

Am 20. November 2019 ereigneten sich drei Erdbeben mit Lokalmagnituden (M_L) zwischen 1,0 und 3,2 bei Kirchlinteln am Erdgasfeld Völkersen. Sie werden im südöstlichen Teil der Erdgaslagerstätte Völkersen und im Rahmen der Lokalisierungsgenauigkeit von etwa 1 km am selben Ort lokalisiert. Die Herdtiefen der beiden spürbaren Erdbeben (Wahrnehmungsschwelle für Völkersen: $M_L \geq 1,8$) werden instrumentell mit 3,9 km +/- 1 km berechnet und liegen damit im Niveau des Lagerstättenreservoirs. Aufgrund der Lage der Epizentren und der geringen Herdtiefen ist ein Zusammenhang mit der Erdgasförderung sehr wahrscheinlich.

Die Erdbeben am 20. November 2019 können in die zuvor am Erdgasfeld Völkersen beobachtete Seismizität eingeordnet werden. Der Zusammenhang zwischen Erdbeben und der Erdgasförderung am Erdgasfeld Völkersen ist durch frühere Arbeiten gut belegt. Ausführliche Begründungen geben die Berichte zu den Erdbeben bei Völkersen am 22. November 2012 (Bischoff et al., 2013) und am 22. April 2016 (Bischoff et al., 2016). Für den Zusammenhang sprechen vor allem die zuverlässigen Lokalisierungen, die die Erdbebenherde im Lagerstättenniveau verorten, und die Häufung der Ereignisse am Erdgasfeld sowie fehlende Erdbeben außerhalb. Durch die verbesserten Ortungen in den letzten Jahren deutet sich an, dass verschiedene Strukturen innerhalb der Lagerstätte seismisch aktiviert worden sind. Dies führt zu einem besseren Verständnis der Ursachen und ist ein wichtiger Beitrag zur Gefährdungsabschätzung.

Seit Beginn der Förderung 1994 wurden an der Erdgaslagerstätte Völkersen insgesamt 21 Erdbeben im Magnitudenbereich von 0,5 bis 3,2 registriert, zuerst am 3. April 2008 (M_L 2,8). Zwölf Erdbeben erreichten Magnituden oberhalb von 1,8 und konnten von der lokalen Bevölkerung als Erschütterungen wahrgenommen werden. Die beiden spürbaren Erdbeben am 20. November 2019 wurden mit M_L 3,2 bzw. 3,0 bewertet und gehören damit zu den stärksten Erdbeben am Erdgasfeld Völkersen. Das bis dahin stärkste Erdbeben hatte eine Magnitude von 3,1 und ereignete sich am 22. April 2016. Ähnlich starke Erdbeben traten auch an anderen Erdgaslagerstätten auf: 2018 an der Erdgaslagerstätte Hemmelte/Kneheim/Vahren (M_L 3,1), 2014 an der Erdgaslagerstätte Goldenstedt/Visbek bei Emstek (M_L 3,1) und ebenfalls 2014 an der Erdgaslagerstätte Klosterseele/Kirchseele/Ortholz bei Syke (M_L 3,2). Im Gebiet der Erdgasförderung Norddeutschlands ereigneten sich insgesamt zehn Erdbeben mit Magnituden größer als 3,0.

Im Kontext der Produktion von Kohlenwasserstoffen sind verschiedene Aktivitäten potentiell geeignet, zu Spannungsverlagerungen im Untergrund zu führen. Für die Erdgaslagerstätte Völkersen ist festzustellen, dass die letzten Frac-Maßnahmen in der Lagerstätte Völkersen im Juni 2011 durchgeführt wurden. Schon aufgrund des zeitlichen Abstands sind diese Maßnahmen als Ursache für das Erdbeben am 20. November 2019, wie auch für frühere Erdbeben (Ladage et al., 2016), auszuschließen. Lagerstättenwasser wird im Erdgasfeld Völkersen nicht

versenkt. Auch in der Vergangenheit wurde in dieser Region kein Lagerstättenwasser in der Tiefe des Hypozentrums versenkt, so dass hiermit zusammenhängende Prozesse ebenfalls als Ursache auszuschließen sind.

Als Ursache kommt vielmehr die Druckabsenkung in der Lagerstätte selbst 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 oder auch innerhalb der Lagerstätte liegen. Wird durch den Spannungsaufbau die Scherfestigkeit des Gebirges überschritten, kann die Spannung durch die Reaktivierung vorhandener Störungen durch ein seismisches Ereignis impulsartig abgebaut werden. Dieses Erklärungsmodell passt zu bekannten Verhältnissen der Lagerstätte Völkersen, z.B. hohe Druckabsenkungen und Herdmechanismen, deren Bruchflächen mit Streichrichtungen bekannter Störungszonen übereinstimmen (Bischoff et al., 2012; Bischoff et al., 2016). Zwischen dem Beginn der Förderung aus der Erdgaslagerstätte Völkersen 1994 und dem ersten dort lokalisierten seismischen Ereignis 2008 besteht eine Zeitdifferenz von 14 Jahren. Dies deutet darauf hin, dass sich Spannungen im Untergrund über viele Jahre akkumulieren können, ehe sie seismisch freigesetzt werden. Es ist daher davon auszugehen, dass am Erdgasfeld Völkersen weitere Erdbeben auftreten können.

Im Unterschied zu früheren Erdbeben ähnlicher Stärke an Erdgasfeldern in Niedersachsen ereigneten sich am Erdgasfeld Völkersen zwei Erdbeben mit $M_L \geq 3$ innerhalb von vier Stunden. Eine so kurze Folge von Erdbeben dieser Stärke wurde in Niedersachsen zuvor noch nicht beobachtet. Ähnliche Beobachtungen wurden mit einer etwas größeren zeitlichen Verzögerung von zweieinhalb Tagen für zwei Erdbeben mit M_L 3,1 und 3,6 am 28. September 2018 bzw. am 1. Oktober 2019 an der Erdgaslagerstätte Hemmelte/Kneheim/Vahren gemacht (Bischoff et al., 2019).

Eine weitere Besonderheit ist das nicht spürbare Erdbeben mit M_L 1,0 am 20. November 2019 um 20:52 Uhr, da bei den induzierten Erdbeben in Niedersachsen trotz der guten seismischen Überwachung bisher nur sehr vereinzelt Vor- oder Nachbeben beobachtet worden sind.

Die Erwartung, dass durch sensitivere Messnetze viele schwache Erdbeben unterhalb der Wahrnehmungsschwelle registriert würden, hat sich bisher nicht bestätigt. Typische Prozesse, die bei tektonischen Erdbeben zu Vor- und Nachbeben führen, scheinen nicht allgemein auf die Prozesse übertragbar zu sein, die in Niedersachsen zu induzierten Erdbeben durch Erdgasförderung führen. Im Rahmen dieses Berichts können die Ursachen der räumlichen und zeitlichen Häufung der Erdbeben am 20. November 2019 nicht abschließend geklärt werden. Eine genaue Bewertung erfordert detaillierte Analysen, wie Relativlokalisierungen oder Analysen der Herdmechanismen der stärkeren Ereignisse, um so beteiligte Störungsflächen zu identifizieren.

5.2 Auswirkungen an der Oberfläche

Die Erdbeben am 20. November 2019 um 18:28 Uhr und um 22:32 Uhr wurden von der Bevölkerung als Erschütterungen verspürt. Die Auswirkungen beider Erdbeben werden anhand der makroseismischen Meldungen der Bevölkerung sowie der gemessenen Bodenschwinggeschwindigkeiten bewertet.

Entsprechend der medialen Berichterstattung und den Aussagen des Förderunternehmens während der Informationsveranstaltung in Kirchlinteln ist davon auszugehen, dass dem Förderunternehmen mehr als 500 Schadensmeldungen vorliegen. Dementsprechend ist das öffentlich am stärksten diskutierte Thema im Zusammenhang mit den Erdbeben der Umgang mit der Schadensregulierung. Eine Bewertung von gemeldeten Schäden erfolgt jedoch nicht seitens LBEG oder BGR.

Das Erdbeben um 22:32 Uhr wurde in der Bevölkerung am stärksten und zwar als mäßig starke bis sehr starke Erschütterung wahrgenommen. Insgesamt können diesem Erdbeben 100 makroseismische Fragebögen aus der Bevölkerung zugeordnet werden. Eine Bestimmung von Intensitätswerten nach EMS-98 ist aufgrund der Anzahl, der räumlichen Verteilung sowie der Nachbarschaft von Meldungen mit sehr unterschiedlichen Angaben nicht möglich. Die makroseismischen Beschreibungen legen nahe, dass nach EMS-98 die Intensität V für dieses Erdbeben erreicht wurde. Für diese Bewertung spricht auch der Vergleich mit makroseismischen Auswertungen von Erdbeben ähnlicher Stärke und mit ähnlichen Herdtiefen. Zum Beispiel werden die Erdbeben Syke 2014 (ML 3,2, Herdtiefe 4 km; Bischoff et al., 2014) und Völkersen 2016 (ML 3,1, Herdtiefe 4,1 km; Bischoff et al., 2016) mit maximalen Intensitäten von IV bis V bzw. V bis IV bewertet. Insgesamt wird das Erdbeben um 22:32 Uhr mit einer maximalen Intensität von V bewertet.

Zur Überwachung der Bodenschwinggeschwindigkeiten stehen in Epizentralentfernungen bis 10 km zehn seismische Messstationen zur Verfügung, so dass eine unabhängige Bewertung der Auswirkungen gut möglich ist. Die maximale Bodenschwinggeschwindigkeit (PGV) wurde in einer Epizentralentfernung von 2 km gemessen und beträgt 5,1 mm/s. Der in DIN 4150 festgelegte Anhaltswert einer Schwinggeschwindigkeit von 5 mm/s, unterhalb dessen nicht von Gebäudeschäden auszugehen ist, wurde nachweislich an einem Messort geringfügig überschritten. Leichte nicht-strukturelle Gebäudeschäden durch die Erschütterungswirkung sind demnach nicht ausgeschlossen. In diesem Sinne stützen die Messungen der Bodenschwinggeschwindigkeiten die makroseismische Bewertung mit der Intensität V.

Die räumliche Verteilung der Auswirkungen kann anhand der vorliegenden Daten nicht umfassend bewertet werden. Die PGV-Werte zeigen keine kontinuierliche Abnahme der Bodenschwinggeschwindigkeit mit zunehmender Entfernung. Stattdessen wird für Standorte in ähnlichen Entfernungen eine hohe Variabilität beobachtet. Auch variieren Amplitudenverhältnisse für Stationspaare im Vergleich der beiden Erdbeben erheblich, obwohl die Hypozentren und

damit die jeweiligen Hypozentralabstände identisch sind. Hinweise auf kleinräumige Variationen der Bodenschwinggeschwindigkeit zeigten sich auch in der Auswertung des Erdbebens bei Völkersen am 22. April 2016. Damals wurde die höchste Bodenschwinggeschwindigkeit in der Allerniederung gemessen (Station ZURM) und gefolgert, dass Standorteffekte im Landkreis Verden berücksichtigt werden müssen. Darauf deuten auch die aktuellen Messungen z.B. in Verden hin. Weitere Gründe für die beobachtete Variabilität könnten die richtungsabhängige Energieabstrahlung vom Erdbebenherd (Abstrahlcharakteristik) oder Effekte des Bruchverlaufs (Direktivität) sein. Auch eine Kombination dieser Effekte ist möglich. PGV-Messungen können daher nur als Punktmessungen betrachtet werden, in deren Umfeld höhere oder niedrigere PGV-Werte auftreten können.

Die gemeinsame Interpretation von gemessenen Bodenschwinggeschwindigkeiten und Makroseismik ist nicht in allen Gebieten eindeutig. So liegen Hinweise auf Intensität V, und damit auf leichte Schäden an wenigen Gebäuden, zum Beispiel für den Ostteil Langwedels und für Verden in Gebieten vor, in denen PGV-Messungen von 1,3 mm/s bzw. 1,5 mm/s (Stationen GRO1S bzw. TRIFS) und damit deutlich unterhalb des Anhaltswertes von 5 mm/s vorliegen.

Auch das Erdbeben um 18:28 Uhr mit ML 3,2 wurde von der Bevölkerung stark verspürt. Zu diesem Erdbeben liegen 59 auswertbare makroseismische Fragenbögen vor. Die Erschütterungen werden als schwach bis sehr stark beschrieben. Aufgrund der geringen Anzahl von Meldungen und deren Verteilung können keine Intensitätswerte nach EMS-98 bestimmt werden. Insgesamt geben 24 Meldungen Hinweise auf das Erreichen einer Intensität von V. Allerdings sprechen die Anzahl und die räumliche Verteilung gegen eine Bewertung des Erdbebens mit einer maximalen Intensität V. Die gemessenen maximalen Bodenschwinggeschwindigkeiten (PGV) erreichen für dieses Erdbeben Werte bis 2,0 mm/s in einer Entfernung von etwa 2 km. Auf eine weitergehende Betrachtung und die Festlegung einer maximalen Intensität für das Erdbeben um 18:28 Uhr wird in diesem Bericht aufgrund der zeitlichen und räumlichen Nähe zu dem Erdbeben um 22:32 Uhr, mit den stärkeren Auswirkungen an der Erdoberfläche, verzichtet.

Zusammengefasst ergeben die makroseismischen und instrumentellen Auswertungen zum Erdbeben am 20. November 2019 um 22:32 Uhr mit ML 3,0, dass lokal die Intensität V gemäß EMS-98 erreicht und der Anhaltswert der Bodenschwinggeschwindigkeit gemäß DIN 4150 von 5 mm/s an einer Messstelle überschritten wurde. Durch die Erschütterungswirkungen könnten leichte Schäden an Gebäuden vorrangig empfindlicher Bauart entstanden sein.

Zu den Auswirkungen der Seismizität am Erdgasfeld Völkersen lässt sich abschließend feststellen, dass nicht-strukturelle Schäden an Gebäuden für zukünftige Erdbeben nicht ausgeschlossen werden können. Für solche Ereignisse werden durch das LBEG Einwirkungsbereiche festgelegt. Hintergrundinformationen und Empfehlungen hierzu gibt der Leitfaden zur Festlegung des Einwirkungsbereichs nach Auftritt einer Erschütterung (Arbeitskreis 7 des Direktorenkreises der Staatlichen Geologischen Dienste, 2018). Ein Einwirkungsbereich für die

Erdbeben am 20. November 2019 sollte mindestens die Bereiche umfassen, in denen die beschriebenen und gemessenen Auswirkungen aufgetreten sind. Die Variabilität der PGV-Messungen ist konservativ im Sinne eines Sicherheitsbereiches zu berücksichtigen. Der Einwirkungsbereich wird in einem eigenen Verfahren, unabhängig von diesem fachlichen Bericht, festgelegt.

Bei Konflikten zur Schadensregulierung bietet die Schlichtungsstelle Bergschaden Niedersachsen, angesiedelt am Landkreis Rotenburg, außergerichtliche Schlichtungen an.

5.3 Seismische Messnetze

Es hat sich bestätigt, dass der Ausbau des Stationsnetzes zu genaueren Herdparametern geführt hat. Die Herdtiefenbestimmung ist für die aktuellen Erdbeben am Erdgasfeld Völkersen möglich. Es deutet sich an, dass mit dem bestehenden Stationsnetz Strukturen innerhalb des Erdgasfeldes seismologisch aufgelöst werden können.

Das durch die Förderunternehmen am Erdgasfeld Völkersen betriebene Erschütterungsnetz wurde in den vergangenen Jahren in mehreren Stufen verdichtet. Standen 2012 zunächst nur die Erschütterungsstationen in Achim und Verden zur Verfügung, wurden sie 2013 um Stationen in Langwedel und Holtebüttel ergänzt. Fünf weitere Stationen kamen 2017 und 2018 in Walle, Dauelsen, und Wulmstorf sowie im dünner besiedelten nördlichen und im südwestlichen Bereich der Lagerstätte hinzu. Als Reaktion auf die Erdbeben am 20. November 2019 hat Wintershall Dea am 27. November 2019 eine neue Erschütterungsstation in Scharnhorst (Abb. 8) in Betrieb genommen. Zählt man auch die Station in Sottrum im Norden der Lagerstätte hinzu, stehen heute in Abständen von weniger als 10 km zur Lagerstätte elf Erschütterungsstationen zur Verfügung, um die Bodenschwingungsgeschwindigkeiten an den Messorten entsprechend DIN 4150 zu bewerten. Von allen Erdgaslagerstätten in Niedersachsen ist die Erdgaslagerstätte Völkersen damit seismisch am stärksten instrumentiert. Sowohl für das Erdbeben am 20. April 2016 als auch für die aktuellen Erdbeben standen zur Erfassung der maximalen Bodenschwingungsgeschwindigkeiten entsprechende Erschütterungsmessstationen in geringen Epizentralentfernungen von 3 km bzw. 2 km zur Verfügung.

Das LBEG baut zurzeit ein eigenes seismisches Messnetz auf. Ziel ist es, die Seismizität in Niedersachsen flächendeckend zu überwachen. Bis 2022 werden sechs Stationen in Betrieb genommen. Die erste Station des Messnetzes wird seit 2017 in Loccum betrieben. Außerdem werden die bisher im Gebiet der Erdgasförderung in Niedersachsen durch die BGR betriebenen Stationen zukünftig in Kooperation durch LBEG und BGR gemeinsam betrieben. In diesem Zuge wird das bestehende Messnetz technisch für den Langzeitbetrieb überarbeitet und die räumliche Verteilung der Stationen optimiert, so dass für die Erdgasförderregionen zwischen Cloppenburg und Munster eine unabhängige seismische Überwachung besteht.

Literatur

Arbeitskreis 7 des Direktorenkreises der Staatlichen Geologischen Dienste, 2018: Leitfaden zur Festlegung des Einwirkungsbereichs nach Auftritt einer Erschütterung, verursacht durch ein seismisches Ereignis, im Sinne der Bergverordnung über Einwirkungsbereiche (EinwirkungsBergV) und des Bundesberggesetzes (BBergG). 33 S., https://www.infogeo.de/Infogeo/DE/Downloads/leitfaden_einwirkungsBergV_20180702.html

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.

Bischoff, M., Ceranna, L., Fritz, J., Gestermann, N., Plenefisch, T., 2014: Untersuchungsergebnisse zum Erdbeben bei Syke (Landkreis Diepholz) am 01.05.2014. LBEG / BGR. Hannover, 33 S.

Bischoff, M., Ceranna, L., Fritz, J., Gestermann, N., Plenefisch, T., 2016: Kurzbericht zum Erdbeben bei Völkersen (Landkreis Verden) am 22. April 2016, M_L 3,1. LBEG / BGR. Hannover, 29 S.

Bischoff, M., Gestermann, N., Pasternak, M., Plenefisch, M., Schindewolf, A., 2019: Bericht zu den Erdbeben bei Lastrup (LK Cloppenburg) im September und Oktober 2018, M_L ≤ 3,6. LBEG / BGR. Hannover, 28 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.

Ladage, S., Andrulleit, H., Babies, H. et al, 2016: Schieferöl und Schiefergas in Deutschland. Potenziale und Umweltaspekte. BGR. Hannover, 197 S.

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

Anhang

Anhang 1 - Europäische Makroseismische Skala (EMS-98)

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