

Erdbebenbeobachtung in Mitteldeutschland

Dreijahresbericht 2019 – 2021



LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE



Freistaat
SACHSEN

Freistaat
Thüringen



Landesamt für
Umwelt, Bergbau
und Naturschutz

LANDESAMT FÜR
GEOLOGIE UND
BERGWESEN



SACHSEN-ANHALT

Erdbebenbeobachtung in Mitteldeutschland

Dreijahresbericht 2019 – 2021

Vorwort	3
1 Seismologische Überwachung in Mitteldeutschland	4
I. Rappsilber, I. Pustal & L. Sonnabend	
2 Seismische Aktivität in Mitteldeutschland (Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen) und im globalen Umfeld	6
2.1 Seismische Aktivität in Mitteldeutschland und in der westlichen Tschechischen Republik	6
S. WENDT & P. BUCHHOLZ	
2.2 Induzierte Seismizität im Südharzgebiet im Zeitraum 2019 bis 2021 unter besonderer Berücksichtigung der automatischen Detektion	17
M. VAN LAATEN, J. MARTIN & U. WEGLER	
2.3 Induzierte Seismizität in Sachsen	23
F. HÄNEL	
2.4 Vergleich: Stärkste Erdbeben weltweit	24
I. Rappsilber	
3 Seismologische Netze in Mitteldeutschland	25
3.1 Sachsennetz (SXNET) mit den Stationen von Sachsen-Anhalt	25
S. FUNKE & F. HÄNEL	
3.2 Seismologische Station in Landsberg (LANDS)	31
I. RAPPILBER, S. FUNKE & R. VOIGT	
3.3 Zur Entwicklung des Thüringer Seismologischen Netzes (TSN) im Zeitraum 2019–2021	33
U. WEGLER, D. SCHÖNWALD & I. PUSTAL	
4 Seismologische Auswertung in Mitteldeutschland	40
4.1 Automatische Auswertung von Erdbeben	40
S. FUNKE	
4.2 Vergleich der automatischen und der manuellen Auswertung für lokale Erdbeben mit dem Thüringer Seismologischen Netz (TSN) im Jahr 2021	44
T. BURGHARDT	
5 Seismologische Arbeiten in Mitteldeutschland	52
5.1 Spektren zur Identifikation von lokalen und induzierten Erdbeben	52
T. BURGHARDT	
5.2 Das Erdbeben vom 9. Mai 2020 nahe Chemnitz	59
L. SONNABEND	
Begriffserklärungen	62
Europäische Makroseismische Skala (EMS) - Kurzform -	65
Fragebogen zur Erdbebenbeobachtung	66

Vorwort

Im Berichtszeitraum 2019–2021 traten weltweit verheerende Erdbeben auf. Es wurden bei den stärksten Beben Magnituden von 8 bis 8,2 gemessen. Betrachten wir die Opferzahlen und Zerstörungen, so muss das Beben in Haiti am 14. August 2021 mit mehr als 2000 Toten, über 12 000 Verletzten und zehntausenden von zerstörten Gebäuden im Berichtszeitraum als katastrophalstes bezeichnet werden.

Mit solchen enormen Folgen müssen wir in Mitteldeutschland nicht rechnen. Da wir nicht im Bereich aktiver Kontinentalplattenränder liegen, sind derartig verheerende Erdbeben in unseren drei Bundesländern Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen nicht zu erwarten. Mit der Betrachtung und Auswertung der Ereignisse in den vergangenen Jahren kann in dem vorliegenden Bericht eingeschätzt werden, dass die seismische Aktivität in Mitteldeutschland im Dreijahreszeitraum 2019 bis 2021 vergleichbar mit der vorheriger Jahre war.

Auch Mitteldeutschland bleibt von Erdbeben nicht verschont. Bemerkenswert waren zum Beispiel zwei schwache Erdbeben bei Chemnitz am 09. Mai 2020 (Magnitude 1,8) und bei Döbeln am 09. September 2021 (Magnitude 1,1), welche deutlich machen, dass auch abseits der bekannten tektonischen Zonen Beben auftreten können. Doch selbst wenn solche Ereignisse selten und zumeist nur schwach auftreten, werden sie bemerkt. Diese ungewöhnlichen Ereignisse können auch dazu führen, dass die Bevölkerung verunsichert reagiert und von

den zuständigen Behörden Antworten auf Beobachtungen und Fragen erwartet.

Zuständig sind in den Ländern die Geologischen Dienste. Die seismologische Überwachung liegt in der Länderhoheit. Dafür wurden Einrichtungen geschaffen, Messnetze eingerichtet und Kompetenzen aufgebaut.

In Mitteldeutschland bündeln die geologischen Dienste Sachsens, Sachsen-Anhalts und Thüringens ihre Aktivitäten gemeinsam mit den Universitäten in Leipzig, Jena und Freiberg und weiteren Unternehmen und Einrichtungen im Seismologie-Verbund zur Erdbebenbeobachtung. Die seismologischen Stationen der drei Länder sind zu einem Überwachungsnetz zusammengeschlossen. Die Auswertung der Erdbeben erfolgt in enger Zusammenarbeit. Die Erdbebeninformationen werden über einen gemeinsamen Internetauftritt und durch Publikationen der breiten Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt.

Das vorliegende Heft ist die 9. Ausgabe einer Reihe von Erdbebeninformationen, die im Jahre 1998 begann. Es soll dazu beitragen, Bevölkerung, Wirtschaft und Behörden für das Thema Erdbeben zu sensibilisieren. Es informiert über die seismischen Ereignisse, die sich im Zeitraum 2019–2021 im mitteldeutschen Gebiet ereignet haben, über das bestehende seismologische Beobachtungsnetz und über die Auswertung der Aufzeichnungen.



Heinz Bernd Bettig
Präsident des Sächsischen Landesamtes
für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie



Kurt Schnieber
Präsident des Landesamtes für
Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt



Mario Suckert
Präsident des Thüringer Landesamtes
für Umwelt, Bergbau und Naturschutz

1 Seismologische Überwachung in Mitteldeutschland

I. RAPPILBER, I. PUSTAL & L. SONNABEND

Erdbeben sind Naturereignisse, die nicht verhindert werden können. Trotz aller Anstrengungen und weltweiter wissenschaftlicher Forschung ist es bisher nicht möglich, sie vorherzusagen. Der einzig mögliche Schutz besteht darin, Gebiete, die besonders gefährdet sind, abzugrenzen und dort durch geeignete Maßnahmen vorzusorgen, so dass im Falle eines Erdbebens die Schäden minimiert werden. Ein Echtzeitmonitoringsystem ermöglicht zudem eine sofortige Information nach einem Schadenserdbeben und somit eine schnelle Einleitung von Gegenmaßnahmen, um die Folgen abzumildern.

In den drei Bundesländern Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen sind verheerende Erdbeben nicht zu erwarten. Trotzdem sollte die seismische Aktivität hier nicht vernachlässigt werden. Erdbebenkataloge vermitteln uns einen Überblick über die Erdbebenaktivität in der Vergangenheit (Abb. 1-1). Sie verdeutlichen, dass es im mitteldeutschen Raum durchaus auch zu Erdbeben mit Intensitäten von 7 bis 8 beziehungsweise Magnituden im Bereich von 5 kommen kann. Daraus folgend ist ein Gebiet im Dreiländereck als Erdbebenzone nach DIN 4149/DIN EN 1998-1/NA eingestuft, das vom Vogtland bis in den Südraum Leipzig/Halle im Wesentlichen dem Verlauf der Leipzig-Regensburg-Zone folgt. Neben den natürlichen Erdbeben gibt es in einigen Regionen Mitteldeutschlands eine bergbaubedingte, induzierte Seismizität. Auch diese darf nicht außer Acht gelassen werden, wie die Folgen von schweren Gergirgsschlägen der Vergangenheit zeigen.

Die seismische Gefährdung in Mitteldeutschland kann nur durch eine langfristige Beobachtung der Erdbebenaktivität beurteilt werden. Deshalb arbeiten die drei Länder Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen im Seismologie-Verbund zur Erdbebenbeobachtung zusammen. Seit 1994 wurde im Rahmen dieses Verbundes in Mitteldeutschland ein seismologisches Überwachungsnetz aufgebaut und optimiert.

Der Seismologie-Verbund koordiniert die staatliche Erdbebenüberwachung in Mitteldeutschland, sichert die seismologische Registrierung, führt wissenschaftliche Untersuchungen durch und informiert staatliche Stellen, Medien und Bevölkerung. Die Ergebnisse werden in Forschungsberichten, wissenschaftlichen Publikationen, Pressemitteilungen und Broschüren zusammengestellt und veröffentlicht.

Im Rahmen des Seismologie-Verbundes arbeiten folgende Institutionen und Einrichtungen zusammen:

- ◆ Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie,
- ◆ Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt,
- ◆ Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz,
- ◆ Universität Leipzig mit dem Geophysikalischen Observatorium Collm,
- ◆ TU Bergakademie Freiberg mit dem Seismologischen Observatorium Berggießhübel,
- ◆ Friedrich-Schiller-Universität Jena mit dem Geodynamischen Observatorium Moxa,
- ◆ Wismut GmbH und
- ◆ Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen.

Darüber hinaus besteht eine intensive Zusammenarbeit mit den Geologischen Diensten der Nachbarländer und mit der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Das seismologische Datenzentrum der BGR ist die zentrale Sammelstelle und das Datenarchiv der verschiedensten seismologischen Einrichtungen in Deutschland. Die BGR betreibt auch das Deutsche Regionalnetz seismologischer Breitbandstationen (GRSN).

Zusammengefasst ergeben sich für den Seismologie-Verbund folgende Hauptaufgaben:

- ◆ weiterer Ausbau, Optimierung und Betrieb des seismischen Stationsnetzes,
- ◆ schnelle Bestimmung von Epizentren, Magnituden und weiteren Herdparametern nach dem Auftreten stärkerer Ereignisse,
- ◆ umgehende Informationen an staatliche Stellen, Medien und die Bevölkerung nach dem Auftreten stärkerer Ereignisse,
- ◆ Monitoring seismisch aktiver Gebiete zur Verbesserung der Datenbasis für Risikoanalysen,

- ◆ Aussagen zu standortspezifischen seismischen Risiken und ingenieurseismologischen Untersuchungen und
- ◆ Untersuchung von tektonisch aktiven Gebieten und Krustendeformationen.

Ein wesentlicher Punkt in der Arbeit des Seismologie-Verbundes ist die zeitnahe Information der Öffentlichkeit über das seismische Geschehen in Mitteldeutschland. Neben den Informationswegen über bestimmte Meldekettten ist der gemeinsame Internetauftritt ein wichtiger Baustein. Unter Federführung des Thüringer Landesamtes für Umwelt, Bergbau und Naturschutz können auf dieser Internetseite interaktive Karten

oder Listen zu aktuellen und älteren Beben, die Tagesplots der Online-Stationen und Seismogramme abgerufen werden. Auch die Standorte der seismologischen Stationen sind dargestellt und werden erläutert.

<https://antares.thueringen.de/cadenza/>

Parallel können die ständig aktualisierten Tagesplots auch auf folgender Internetseite eingesehen werden:

<https://sachsenetz.geo.uni-leipzig.de>

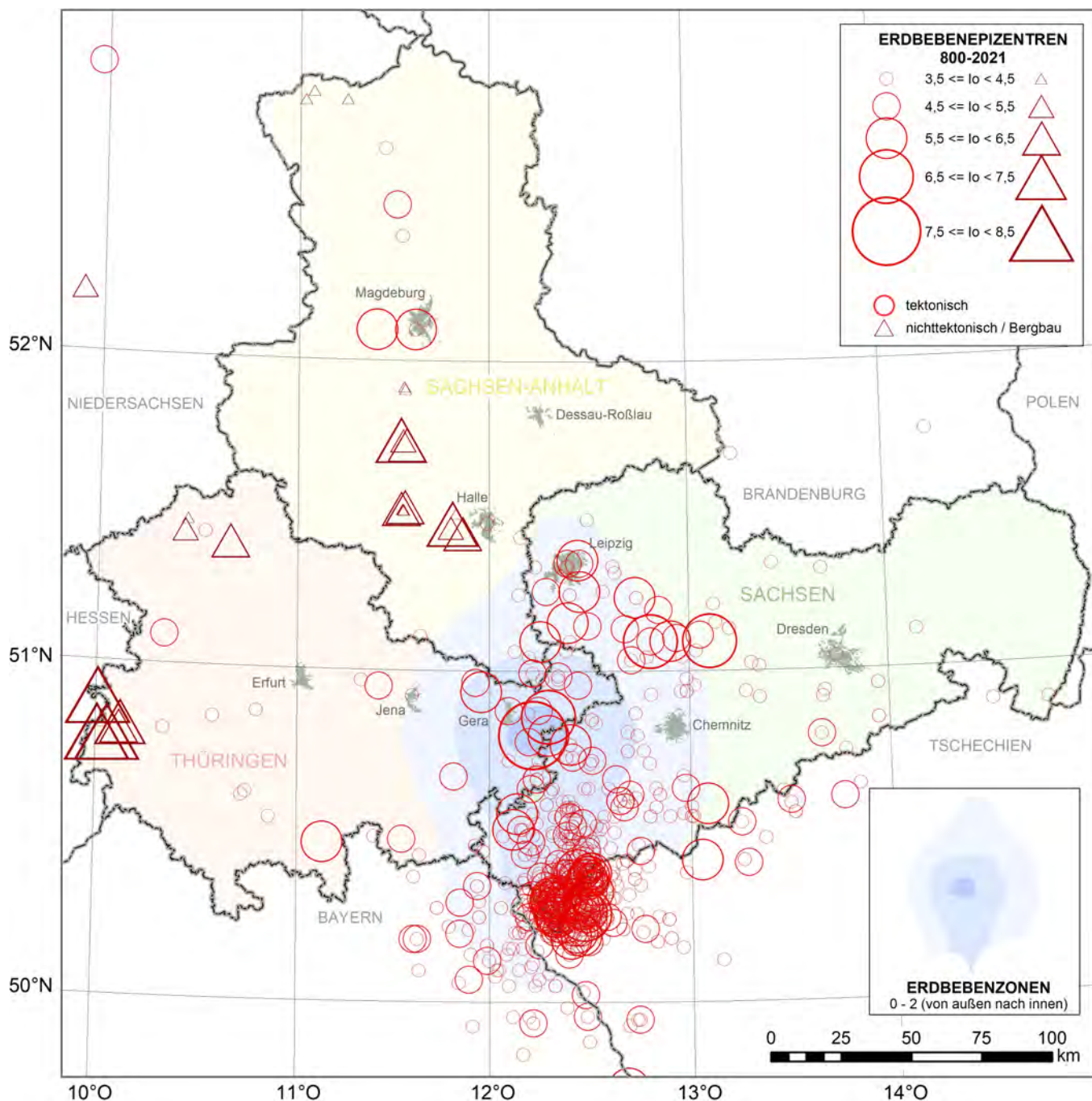


Abb. 1-1: Seismizität in Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen für die Jahre 800 bis 2021, auf der Basis verschiedener Erdbebenkataloge. Dargestellt sind Erdbeben ab einer Intensität I_0 von 4, die allgemein verspürt wurden. Die mit bläulichen Farben dargestellten Erdbebenzonen entsprechen denen der DIN 4149/DIN EN 1998-1/NA. Sie sind in den einzelnen Ländern in Form von Technischen Baubestimmungen gemeindekonkret umgesetzt.

2 Seismische Aktivität in Mitteldeutschland (Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen) und im globalen Umfeld

2.1 Seismische Aktivität in Mitteldeutschland und in der westlichen Tschechischen Republik

SIEGFRIED WENDT & PETRA BUCHHOLZ

Die seismische Aktivität in Mitteldeutschland und der westlichen Tschechischen Republik ist im Dreijahreszeitraum 2019 bis 2021 hinsichtlich der Anzahl der ausgewerteten Beben (Abb. 2.1-1) vergleichbar mit der vorheriger Jahre, weist aber auch Besonderheiten auf.



Abb. 2.1-1: Anzahl der pro Jahr ausgewerteten Beben mit Unterteilung in Herdregionen und Magnitudenklassen.

Seit 2008 ereignen sich im Gebiet Luby/Novy Kostel in der westlichen Tschechischen Republik im Abstand von drei bis vier Jahren Erdbebenschwärme (Ausnahme 2014: kein Schwarm, sondern Hauptbeben mit vielen Nachbeben). Der für 2020 erwartete Schwarm begann tatsächlich im Dezember und erreichte im April 2021 die Phase größter Aktivität. Allerdings ist das in der Kurve der aufsummierten Energiefreisetzung (Abb. 2.1-3) kaum zu erkennen, da ein exponentieller Zusammenhang zwischen Magnitude und freigesetzter Energie besteht. Eine Zunahme der lokalen Magnitude um eine Einheit entspricht einer Energiezunahme auf das 90-fache. Das stärkste Beben nordöstlich von Luby im April 2021 hatte aber

nur eine Magnitude von 3,1, während das stärkste Beben des Schwarms im Mai 2018 eine Magnitude von $M_L = 3,9$ hatte.

In Abb. 2.1-1 wurde eine Unterteilung in drei verschiedene Regionen vorgenommen, da sich die Anzahl der ausgewerteten Beben erheblich unterscheidet:

- ◆ „Nördliche Region“,
- ◆ „Oberes Vogtland“ und
- ◆ „Westliche Tschechische Republik“.

Deshalb sind in Abb. 2.1-1 die senkrechten Achsen mit der Anzahl der Beben pro Jahr verschieden skaliert.

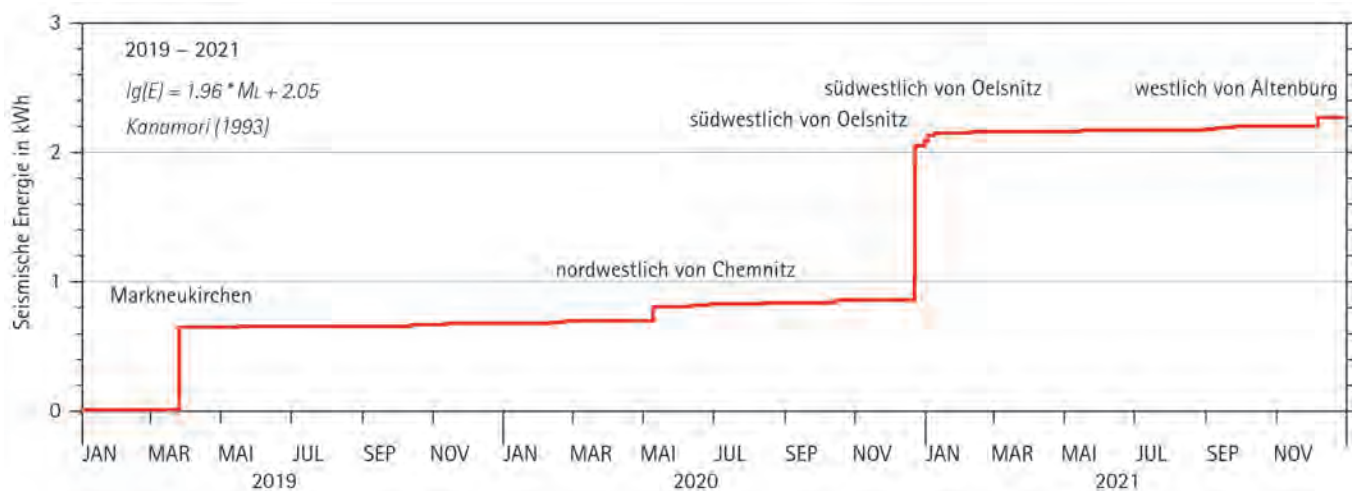


Abb. 2.1-2: Aufsummierte Energiefreisetzung in den Herden der Erdbeben im mitteldeutschen Gebiet im Zeitraum 2019 bis 2021.

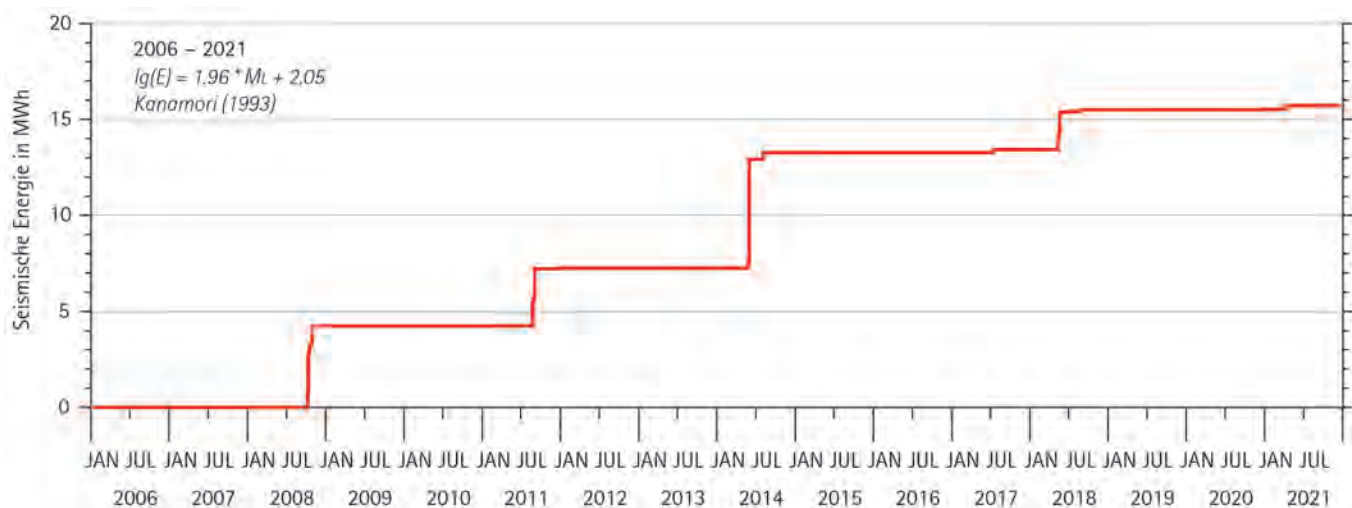


Abb. 2.1-3: Aufsummierte Energiefreisetzung in den Herden der Erdbeben der Region Luby/Novy Kostel in der westlichen Tschechischen Republik im Zeitraum 2006 bis 2021

Auf deutschem Territorium sind alle detektierten Ereignisse ausgewertet worden. In die Datenbank aufgenommen werden nur Beben, zu deren Lokalisierung mindestens fünf Stationen verwendet werden konnten, davon mindestens drei mit Sta-

tionsmagnituden und Lokalisierungsfehlern kleiner als 3 km. Weniger als 1 % der ausgewerteten Beben scheitern an einem oder mehreren dieser Kriterien, in den meisten Fällen an einer für die Lokalisierung zu geringen Stationsanzahl < 5 .

Einen Überblick über die Beben auf deutschem Gebiet ab Magnitude 1,0 geben die Epizentrenkarte Abb. 2.1-4, die zugehörige Tabelle Tab. 2.1-1 und die aufsummierte Energiefreisetzung (Abb. 2.1-2). Bemerkenswert sind dabei zwei Beben außerhalb der Leipzig-Regensburg-Zone: am 9. 5. 2020 nordwestlich von Chemnitz und am 9. 9. 2021 nördlich von Döbeln.

Die Bebenaktivität der drei Regionen „Nördliche Region“, „Oberes Vogtland“ und „Westliche Tschechische Republik“ wird in den folgenden Abschnitten einzeln analysiert.

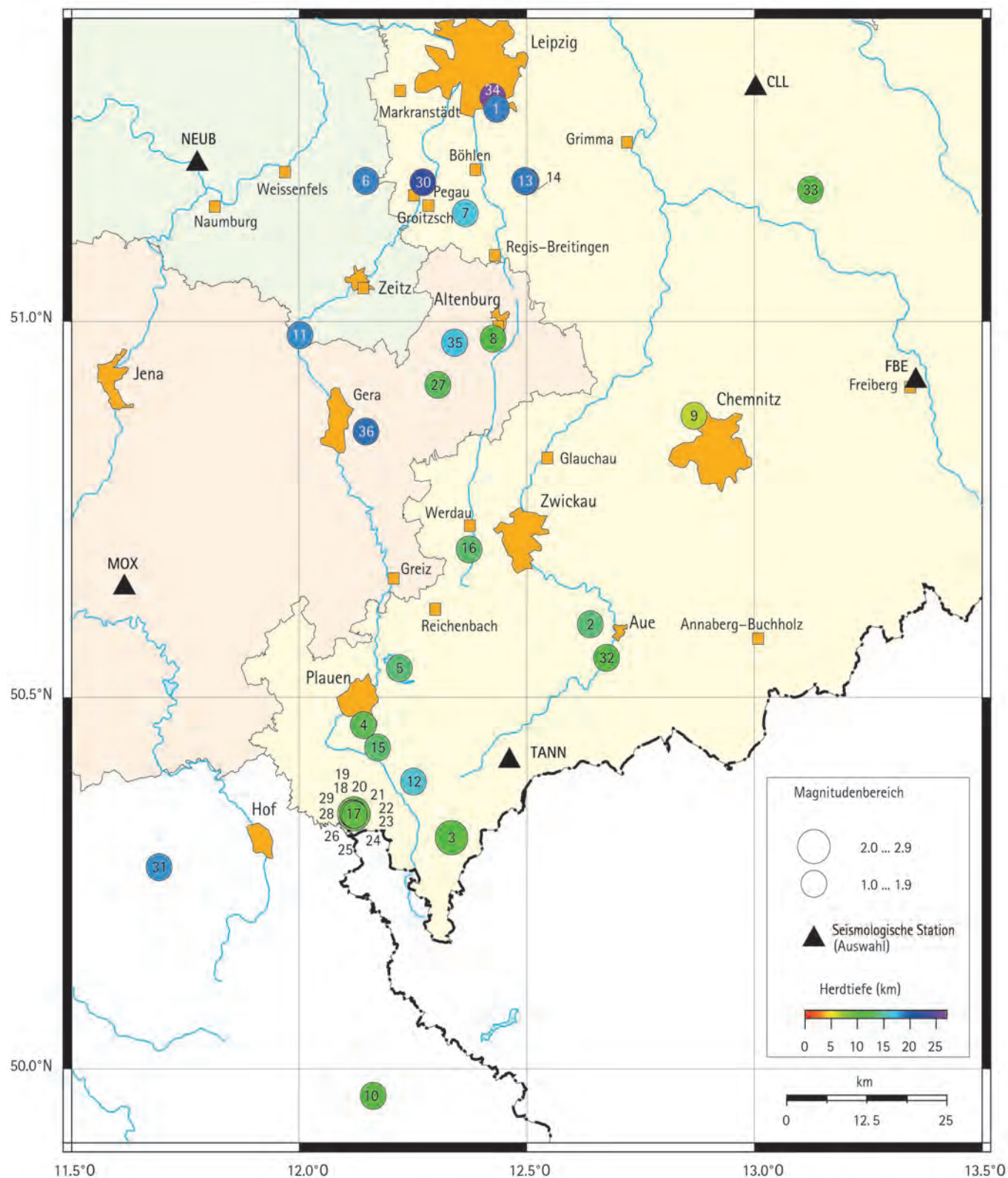


Abb. 2.1-4: Karte der Epizentren von Beben mit Lokalmagnitude $M_L \geq 1,0$ auf deutschem Territorium (Nummern entsprechend Tab. 2.1-1).

Tab. 2.1-1: Erdbeben in Sachsen, Ost-Thüringen, Sachsen-Anhalt und Nord-Franken mit $M_L \geq 1,0$.

Ereignis-Nr. Abb. 2.1-3	Datum	Herdzeit (UTC) [hh:mm:ss]	Koordinaten [°N°O]	Herdtiefe [km]	Lokalmagnitude (Anz. Stationen)	Herdgebiet
1	02. 01. 2019	20:56:57,0	51,281/12,433	18,6	1,2 (21)	südöstlich Leipzig
2	07. 01. 2019	10:22:10,7	50,598/12,639	13,8	1,1 (21)	Schneeberg
3	25. 03. 2019	19:51:43,6	50,312/12,334	11,6	2,2 (12)	Markneukirchen
4	12. 10. 2019	16:35:03,8	50,463/12,141	13,0	1,0 (12)	südlich Plauen
5	12. 11. 2019	01:40:28,6	50,539/12,220	13,8	1,3 (11)	nordöstlich Plauen
6	10. 02. 2020	20:03:43,5	51,186/12,146	18,5	1,2 (19)	westlich Pegau
7	18. 02. 2020	12:42:51,7	51,143/12,365	16,6	1,1 (23)	östlich Groitzsch
8	13. 04. 2020	23:44:11,9	50,997/12,426	10,6	1,1 (22)	Altenburg
9	09. 05. 2020	18:50:26,2	50,875/12,867	6,5	1,8 (25)	nordwestlich Chemnitz
10	28. 05. 2020	10:25:35,0	49,964/12,162	10,3	1,1 (12)	südöstlich Marktredwitz
11	11. 06. 2020	14:22:18,9	50,982/12,001	18,3	1,1 (20)	östlich Eisenberg
12	11. 06. 2020	18:54:23,8	50,387/12,251	16,0	1,0 (12)	westlich Schöneck/V.
13	27. 06. 2020	21:34:32,6	51,186/12,495	18,7	1,0 (25)	nördlich Borna
14	27. 06. 2020	21:34:33,7	51,185/12,498	19,2	1,1 (21)	nördlich Borna
15	13. 08. 2020	01:28:19,7	50,433/12,172	13,5	1,3 (13)	nördlich Oelsnitz/V.
16	14. 10. 2020	19:57:17,8	50,697/12,373	13,5	1,3 (24)	südlich Werdau
17	22. 12. 2020	08:14:02,7	50,344/12,118	10,4	1,8 (12)	südwestlich Oelsnitz/V.
18	22. 12. 2020	10:14:08,8	50,344/12,120	10,4	1,6 (12)	südwestlich Oelsnitz/V.
19	22. 12. 2020	10:20:08,1	50,344/12,119	10,3	1,2 (12)	südwestlich Oelsnitz/V.
20	22. 12. 2020	11:04:48,5	50,343/12,117	10,6	1,0 (12)	südwestlich Oelsnitz/V.
21	22. 12. 2020	11:14:09,1	50,343/12,119	10,7	1,3 (12)	südwestlich Oelsnitz/V.
22	22. 12. 2020	12:04:23,7	50,344/12,120	10,4	2,3 (12)	südwestlich Oelsnitz/V.
23	23. 12. 2020	15:30:35,4	50,344/12,117	10,4	1,0 (12)	südwestlich Oelsnitz/V.
24	30. 12. 2020	09:56:43,6	50,343/12,121	10,5	1,0 (11)	südwestlich Oelsnitz/V.
25	31. 12. 2020	07:55:07,9	50,344/12,118	10,4	1,5 (12)	südwestlich Oelsnitz/V.
26	31. 12. 2020	11:16:53,2	50,344/12,118	10,7	1,2 (11)	südwestlich Oelsnitz/V.
27	03. 01. 2021	01:56:01,8	50,916/12,304	13,1	1,6 (21)	nordwestlich Schmölln
28	08. 01. 2021	10:07:09,7	50,345/12,119	10,6	1,3 (13)	südwestlich Oelsnitz/V.
29	08. 01. 2021	16:56:25,6	50,344/12,119	10,4	1,1 (13)	südwestlich Oelsnitz/V.
30	18. 01. 2021	14:08:07,3	51,184/12,271	23,2	1,1 (25)	nordöstlich Pegau
31	08. 02. 2021	15:40:55,3	50,272/11,692	18,2	1,3 (13)	westlich Hof
32	31. 08. 2021	15:05:13,6	50,553/12,675	11,6	1,3 (24)	südlich Aue
33	09. 09. 2021	21:09:59,5	51,174/13,123	12,1	1,1 (28)	nördlich Döbeln
34	24. 09. 2021	21:59:12,5	51,296/12,425	26,0	1,3 (25)	südöstlich Leipzig
35	07. 12. 2021	02:42:16,3	50,972/12,341	16,8	1,7 (32)	westlich Altenburg
36	07. 12. 2021	21:08:03,3	50,854/12,146	18,9	1,0 (11)	südwestlich Ronneburg

2.1.1 Nördliche Region

Die räumliche und zeitliche Verteilung aller Beben in der nördlichen Region (nördlich von Plauen bis in den Raum Leipzig/Halle) zeigen die Abb. 2.1-5 und 2.1-6. Üblicherweise treten die Beben hier einzeln, gelegentlich als ein Hauptbeben mit

wenigen Nachbeben auf. Eine Ausnahme bildete ein aus 35 Beben bestehender kleiner Schwarm südlich von Werdau am 14./15. Oktober 2020 (Beikarte in Abb. 2.1-5).

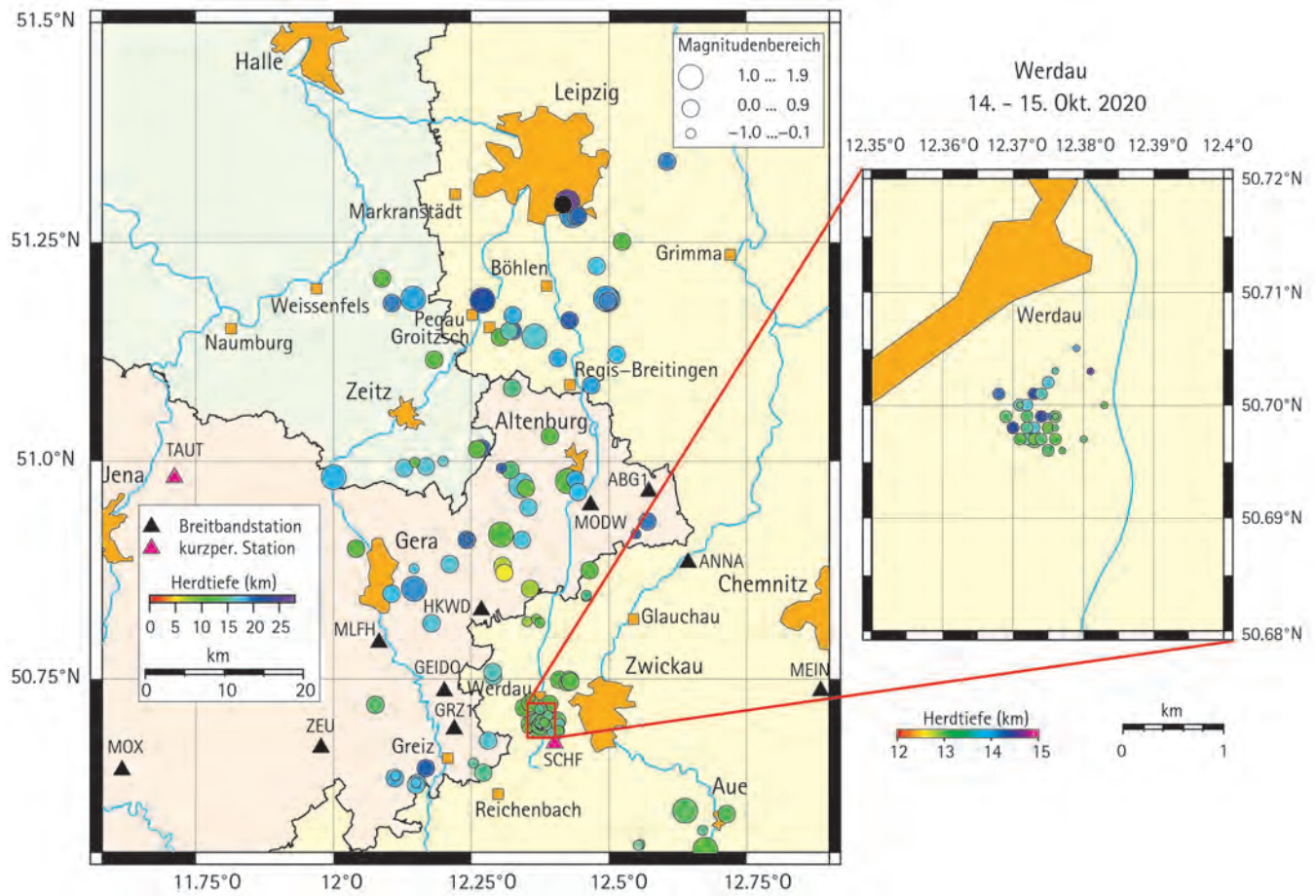


Abb. 2.1-5: Seismische Ereignisse in West-Sachsen, Ost-Thüringen und Sachsen-Anhalt im Zeitraum 2019 bis 2021. Es sind nur die seismologischen Stationen eingetragen, die zur Lokalisierung der Herde bei Werdau verwendet wurden. Auf der Nebenkarte vergrößert das Gebiet südlich Werdau (Zeitraum: 14. bis 15. Oktober 2020, Anzahl der Beben: 35, Tiefenbereich: 13–14,5 km, Magnitudenbereich: -0,5–1,3).

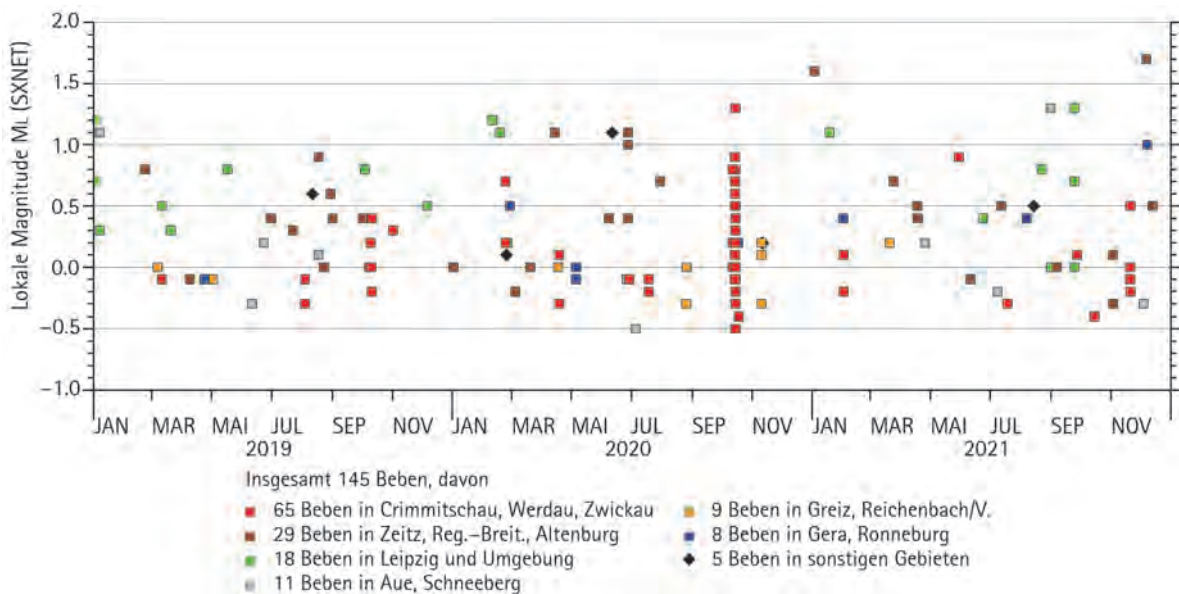


Abb. 2.1-6: Zeitliche Verteilung der Magnituden und die Anzahl der tektonischen seismischen Ereignisse in West-Sachsen, Ost-Thüringen und Sachsen-Anhalt 2019 bis 2021.

2.1.2 Oberes Vogtland

In Abb. 2.1-1 ist die zeitliche Verteilung der pro Jahr ausgewerteten Beben dargestellt. Für das Obere Vogtland fällt eine merklich über dem langjährigen Durchschnitt liegende Anzahl von Beben in den Jahren 2020/2021 auf. Neben den Herdgebieten

südlich bis südwestlich von Plauen, östlich von Plauen, Klingenthal und Markneukirchen gibt es ein Gebiet ungewöhnlich hoher Aktivität südwestlich von Oelsnitz, genauer südlich von Triebel (Abb. 2.1-7 und Abb. 2.1-8).

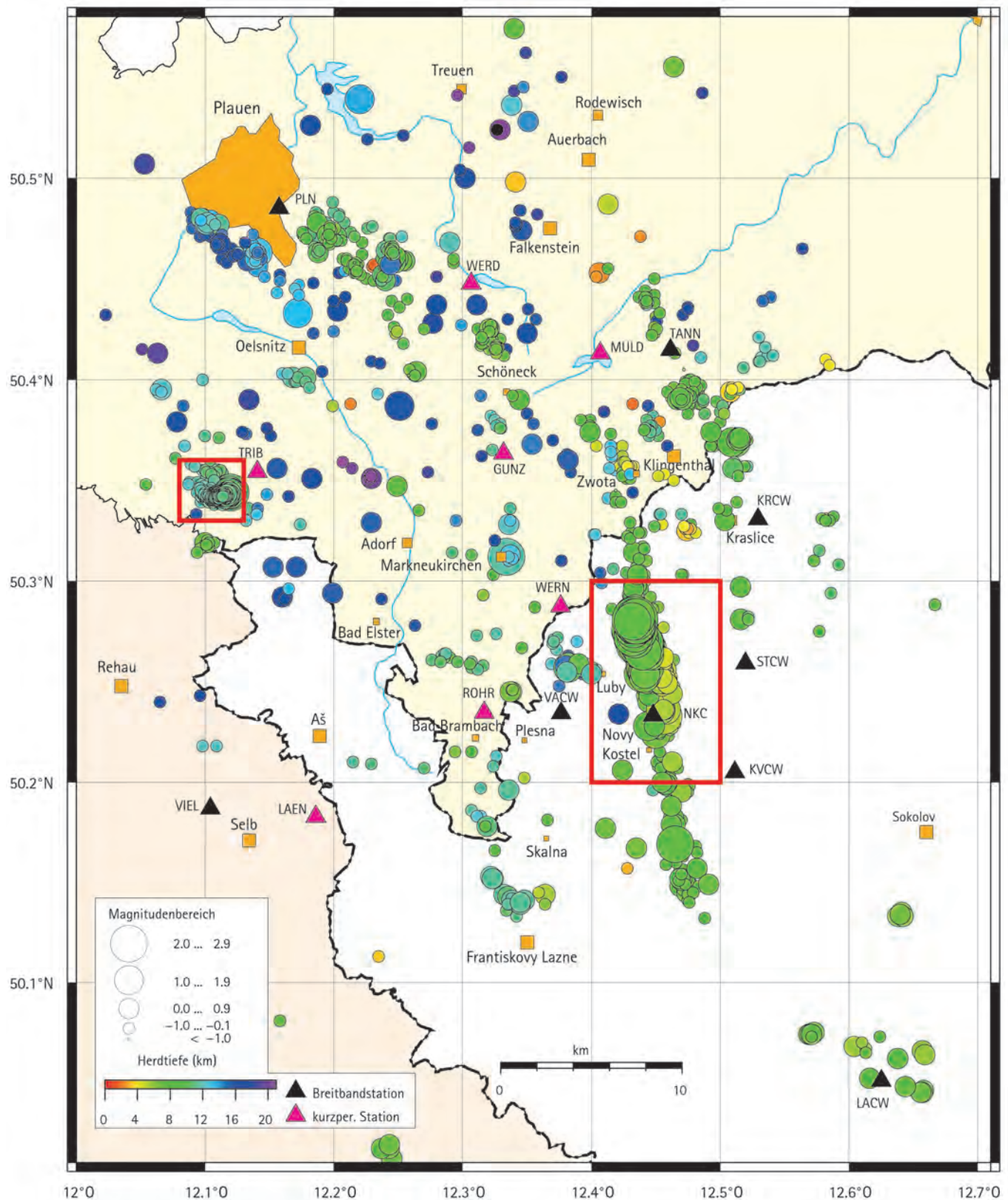


Abb. 2.1-7: Epizentren der Beben im oberen Vogtland und in West-Böhmen im Zeitraum 2019 bis 2021. Die beiden Rahmen markieren die Kartenausschnitte der Abb. 2.1-9 und 2.1-13. Es sind nur die seismologischen Stationen eingetragen, die zur Lokalisierung verwendet wurden.

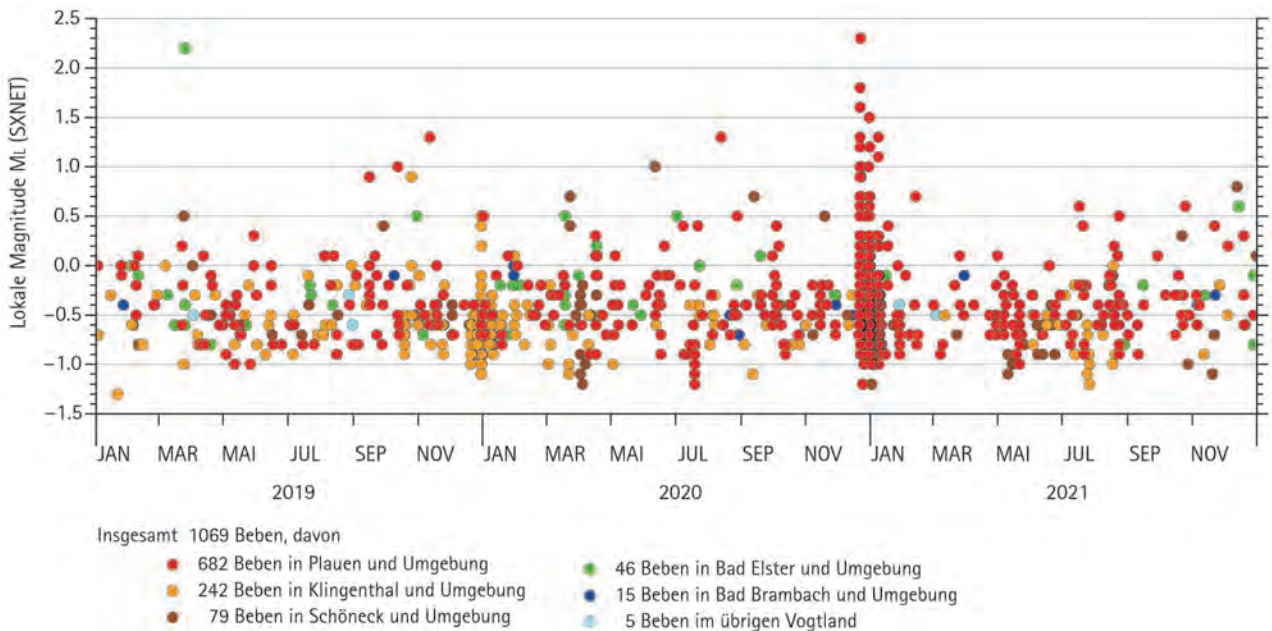


Abb. 2.1-8: Zeitliche Verteilung und Anzahl der tektonischen seismischen Ereignisse im oberen Vogtland 2019 bis 2021.

Tab. 2.1-2 enthält die Herde der 24 stärksten Beben des Schwarms südwestlich von Oelsnitz bzw. südlich von Triebel mit Magnituden $M_L \geq 0,5$. Die mehr als 350 ausgewerteten Beben erfüllen alle Kriterien eines typischen Schwarms: ein räumlich begrenztes Gebiet (Abb. 2.1-9), drei Phasen innerhalb von knapp drei Wochen (Abb. 2.1-11) und kein dominantes Beben. Die Herdtiefe nimmt von Ost nach West um etwa zwei Kilometer zu. Im Gegensatz dazu nimmt die Herdtiefe bei den immer wieder auftretenden Einzelbeben in Richtung Oelsnitz deutlich von 10 auf 18 km zu. Ungewöhnlich für einen Schwarm ist der kleine Wert $b=0,86$ der Magnituden-Häufigkeitsverteilung (Abb. 2.1-10) für den Schwarm Dezember 2020 / Januar 2021. Die Magnituden-Häufigkeitsverteilung lässt sich am besten an einem Beispiel

verstehen: Die Länge der Säule bei $M_L = 1,1$ beträgt 0,95. Das ist der Logarithmus der neun Beben mit Magnituden $M_L \geq 1,1$. Der b -Wert ist der Anstieg der an die Säulen der aufsummierten Magnituden gelegten Ausgleichsgerade.

Der kleine b -Wert bedeutet, dass sich relativ viele „starke“ Beben im Verhältnis zu den Beben mit kleinen Magnituden ereignet haben. Umso erstaunlicher ist es, dass der b -Wert für das gesamte Obere Vogtland für den Zeitraum Januar 2019 bis Dezember 2021 mit 0,96 deutlich über dem Wert des Schwarms liegt. Für den nördlichen Teil zwischen Plauen und Leipzig/Halle beträgt der b -Wert für den Zeitraum Januar 2006 bis Juni 2022 ab $M_L = 0,0$ nur 0,79.

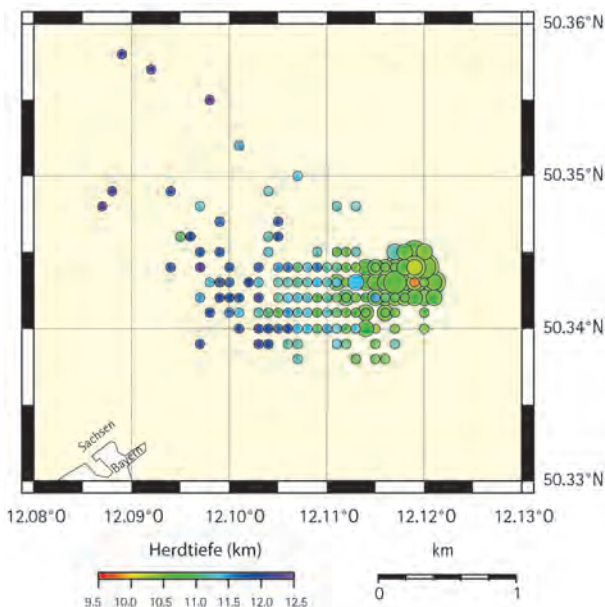


Abb. 2.1-9: Epizentren des Schwarms südwestlich von Oelsnitz/südlich von Triebel. Zeitraum 21. Dezember 2020 bis 28. Januar 2021, Anzahl der Beben: 353, Tiefenbereich: 9,8–12,3 km, Magnitudenbereich: -1,2–2,3.

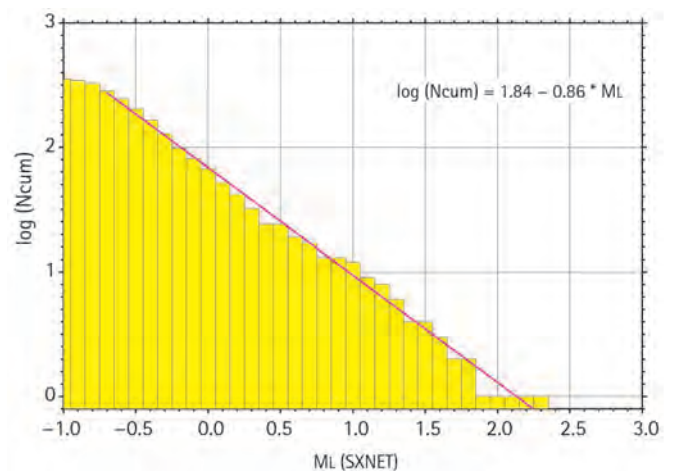


Abb. 2.1-10: Magnitudenhäufigkeitsverteilung des Schwarms südwestlich von Oelsnitz/südlich von Triebel im Dezember 2020/Januar 2021.

Tab. 2.1-2: Herdliste der Beben des Schwarms südwestlich von Oelsnitz mit $M_L \geq 0,5$.

Ereignis-Nr.	Datum	Herdzeit (UTC) [hh:mm:ss]	Koordinaten [°N/°O]	Herdtiefe [km]	Lokalmagnitude (Anz. Stationen)	Herdgebiet
1	22. 12. 2020	03:51:20,8	50,343/12,116	10,7	0,7 (12)	südwestlich Oelsnitz
2	22. 12. 2020	05:11:51,3	50,344/12,114	10,9	0,5 (11)	südwestlich Oelsnitz
3	22. 12. 2020	05:39:35,2	50,343/12,113	10,7	0,9 (12)	südwestlich Oelsnitz
4	22. 12. 2020	08:14:02,7	50,344/12,118	10,4	1,8 (12)	südwestlich Oelsnitz
5	22. 12. 2020	08:14:48,4	50,342/12,117	10,3	0,6 (12)	südwestlich Oelsnitz
6	22. 12. 2020	10:14:08,8	50,344/12,120	10,4	1,6 (12)	südwestlich Oelsnitz
7	22. 12. 2020	10:20:08,1	50,344/12,119	10,3	1,2 (12)	südwestlich Oelsnitz
8	22. 12. 2020	10:24:53,7	50,343/12,117	10,9	0,5 (11)	südwestlich Oelsnitz
9	22. 12. 2020	11:04:43,2	50,341/12,116	10,4	0,5 (11)	südwestlich Oelsnitz
10	22. 12. 2020	11:04:48,5	50,343/12,117	10,6	1,0 (12)	südwestlich Oelsnitz
11	22. 12. 2020	11:14:09,1	50,343/12,119	10,7	1,3 (12)	südwestlich Oelsnitz
12	22. 12. 2020	12:04:23,7	50,344/12,120	10,4	2,3 (12)	südwestlich Oelsnitz
13	23. 12. 2020	14:31:04,6	50,345/12,120	10,4	0,7 (11)	südwestlich Oelsnitz
14	23. 12. 2020	15:30:35,4	50,344/12,117	10,4	1,0 (12)	südwestlich Oelsnitz
15	28. 12. 2020	02:53:33,7	50,344/12,120	10,7	0,5 (12)	südwestlich Oelsnitz
16	30. 12. 2020	09:56:43,6	50,343/12,121	10,5	1,0 (11)	südwestlich Oelsnitz
17	31. 12. 2020	03:19:53,3	50,344/12,116	10,8	0,5 (10)	südwestlich Oelsnitz
18	31. 12. 2020	04:59:27,4	50,345/12,118	10,8	0,7 (12)	südwestlich Oelsnitz
19	31. 12. 2020	07:55:06,5	50,343/12,118	10,6	0,6 (7)	südwestlich Oelsnitz
20	31. 12. 2020	07:55:07,9	50,344/12,118	10,4	1,5 (12)	südwestlich Oelsnitz
21	31. 12. 2020	11:16:53,2	50,344/12,118	10,7	1,2 (11)	südwestlich Oelsnitz
22	31. 12. 2020	13:25:55,9	50,343/12,119	10,3	0,7 (11)	südwestlich Oelsnitz
23	08. 01. 2021	10:07:09,7	50,345/12,119	10,6	1,3 (13)	südwestlich Oelsnitz
24	08. 01. 2021	16:56:25,6	50,344/12,119	10,4	1,1 (13)	südwestlich Oelsnitz

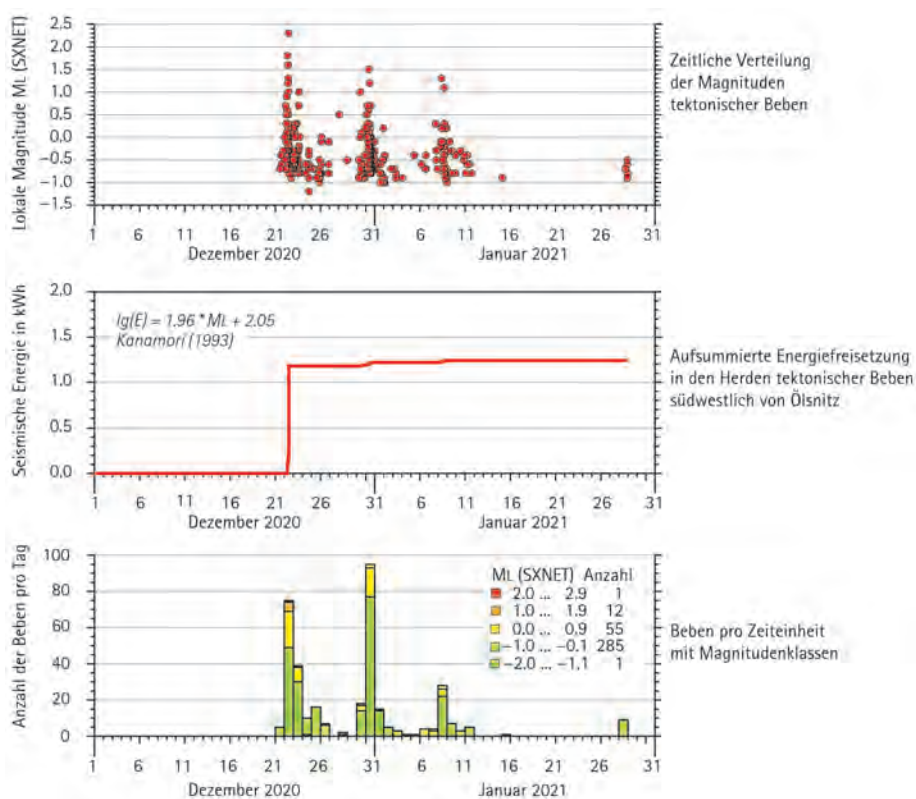


Abb. 2.1-11: Zeitliche Verteilung der Magnituden, der freigesetzten Energie und der pro Tag ausgewerteten Beben des Schwarms südwestlich von Oelsnitz/südlich von Triebel im Dezember 2020/Januar 2021.

2.1.3 Westliche Tschechische Republik

Rund 78 % der 5470 im Berichtszeitraum ausgewerteten Beben haben ihren Herd auf dem Gebiet der Tschechischen Republik, die meisten davon im Gebiet Luby/Novy Kostel nahe der tschechisch-deutschen Grenze. Auf deutscher Seite wird alles ausgewertet, was detektiert worden ist. Das ist vom Zeitaufwand her bei den Beben auf tschechischem Gebiet nicht möglich. In ruhigen Zeiten, d.h. außerhalb von Schwärmen, wird eine Vollständigkeit ab Magnitude -0.5 angestrebt. Bei

Schwärmen sollten zumindest die oberen beiden Magnitudenklassen vollständig sein, um einen glaubwürdigen b-Wert der Magnituden-Häufigkeitsverteilung bestimmen zu können.

In der zeitlichen Verteilung der Magnituden (Abb. 2.1-12) fallen bereits die Monate erhöhter Aktivität Dezember 2020 bis April 2021 auf. Dieser Zeitabschnitt soll etwas genauer betrachtet werden.

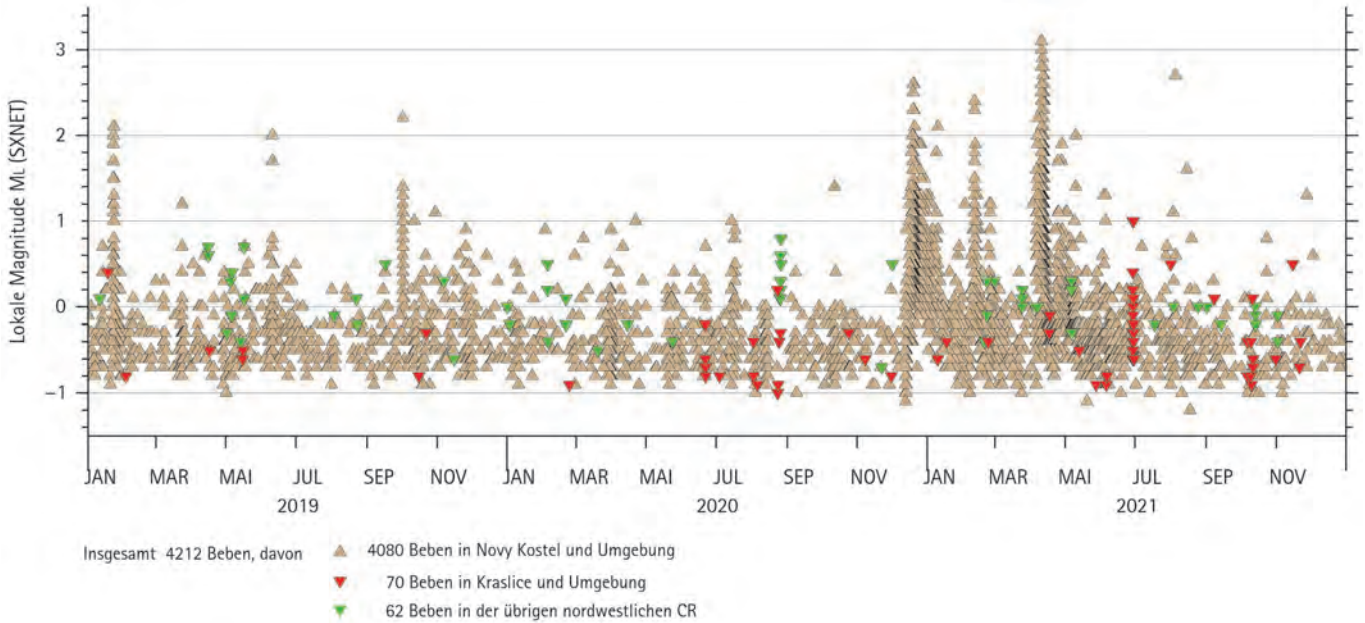


Abb. 2.1-12: Zeitliche Verteilung der Magnituden und die Anzahl von Beben in der westlichen Tschechischen Republik 2019 bis 2021.

Die Epizentrenkarte des Schwarms (Abb. 2.1-13) zeigt wie schon bei früheren Schwärmen deutliche Unterschiede der Herdtiefen. Die flachsten Herde befinden sich am südöstlichen Rand des Gebiets, während die Tiefen nach Westen hin zunehmen. Letzteres ist insbesondere bei Einzelbeben außerhalb des Schwarms in Luby bis westlich von Luby zu beobachten. Erst im Mai 2021 traten zahlreiche Beben östlich von Luby in einer Tiefe von ca. 5 km auf (Abb.2.1-14).

Die zeitliche Verteilung der Magnituden, der kumulierten Energiefreisetzung und der Anzahl der ausgewerteten Beben (Abb. 2.1-15) zeigt die für Schwärme typischen Phasen erhöhter Aktivität, zwischen denen ruhigere Abschnitte liegen. Bemerkenswert ist hier, dass das Aktivitätsmaximum erst in der letzten Phase im April 2021 zu finden ist.

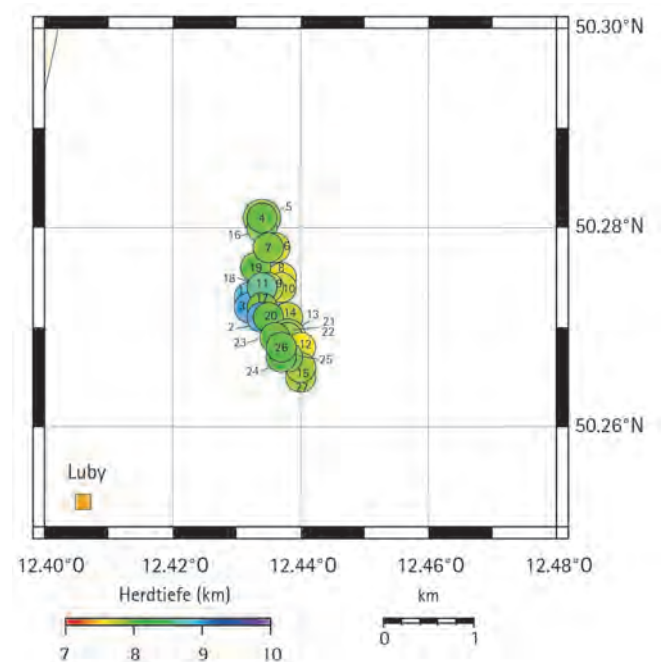


Abb. 2.1-13: Epizentrenkarte des Schwarms 2020/21 nahe Luby im Zeitraum: 19. Dezember 2020 bis 12. April 2021, Anzahl der Beben: 27 (vgl. Tab. 2.1-3), Tiefenbereich: 7,6–9,0 km, Magnitudenbereich: 2,5–3,1.

Tab. 2.1-3: Herdliste der größten Beben des Schwarms 2020/21 nordöstlich und östlich von Luby mit $M_L \geq 2,5$.

Ereignis-Nr.	Datum	Herdzeit (UTC) [hh:mm:ss]	Koordinaten [°N/°O]	Herdtiefe [km]	Lokalmagnitude (Anz. Stationen)	Herdgebiet
1	19. 12. 2020	18:59:28,8	50,273/12,432	8,9	2,5 (12)	nordöstlich Luby/CR
2	19. 12. 2020	20:55:31,4	50,271/12,434	9,0	2,6 (12)	nordöstlich Luby/CR
3	20. 12. 2020	10:48:33,9	50,272/12,432	9,0	2,6 (12)	nordöstlich Luby/CR
4	10. 04. 2021	08:04:06,8	50,281/12,434	8,0	2,6 (12)	nordöstlich Luby/CR
5	10. 04. 2021	08:53:23,1	50,281/12,434	8,0	3,1 (12)	nordöstlich Luby/CR
6	10. 04. 2021	09:25:27,8	50,278/12,436	7,7	2,5 (12)	nordöstlich Luby/CR
7	10. 04. 2021	09:26:28,3	50,278/12,435	7,9	2,5 (12)	nordöstlich Luby/CR
8	10. 04. 2021	09:33:23,2	50,275/12,437	7,6	2,6 (11)	nordöstlich Luby/CR
9	10. 04. 2021	09:47:49,4	50,274/12,435	7,8	2,5 (12)	nordöstlich Luby/CR
10	10. 04. 2021	09:48:53,0	50,274/12,437	7,7	2,5 (12)	nordöstlich Luby/CR
11	10. 04. 2021	10:03:27,4	50,274/12,434	7,9	2,6 (12)	nordöstlich Luby/CR
12	10. 04. 2021	13:12:06,8	50,268/12,440	7,6	2,5 (12)	nordöstlich Luby/CR
13	10. 04. 2021	13:26:00,5	50,269/12,438	7,9	3,0 (12)	nordöstlich Luby/CR
14	10. 04. 2021	13:27:31,5	50,271/12,438	7,7	2,8 (12)	nordöstlich Luby/CR
15	10. 04. 2021	13:40:21,1	50,266/12,440	7,8	2,5 (12)	nordöstlich Luby/CR
16	11. 04. 2021	07:44:03,6	50,280/12,434	8,1	2,9 (12)	nordöstlich Luby/CR
17	11. 04. 2021	18:48:30,7	50,272/12,434	8,2	2,7 (12)	nordöstlich Luby/CR
18	11. 04. 2021	19:01:19,9	50,274/12,434	8,6	2,5 (12)	nordöstlich Luby/CR
19	11. 04. 2021	20:02:26,3	50,276/12,433	8,3	2,6 (12)	nordöstlich Luby/CR
20	11. 04. 2021	23:57:28,1	50,271/12,435	8,3	2,6 (12)	nordöstlich Luby/CR
21	12. 04. 2021	00:40:15,5	50,269/12,438	8,0	2,6 (12)	nordöstlich Luby/CR
22	12. 04. 2021	00:40:24,8	50,269/12,438	8,3	2,7 (12)	nordöstlich Luby/CR
23	12. 04. 2021	01:31:58,3	50,269/12,436	8,2	2,8 (12)	nordöstlich Luby/CR
24	12. 04. 2021	01:32:07,6	50,267/12,437	8,2	2,5 (11)	nordöstlich Luby/CR
25	12. 04. 2021	01:33:01,9	50,267/12,438	8,0	2,7 (12)	nordöstlich Luby/CR
26	12. 04. 2021	01:38:36,1	50,268/12,437	8,2	2,8 (12)	nordöstlich Luby/CR
27	12. 04. 2021	02:10:29,5	50,265/12,440	7,8	2,7 (12)	nordöstlich Luby/CR

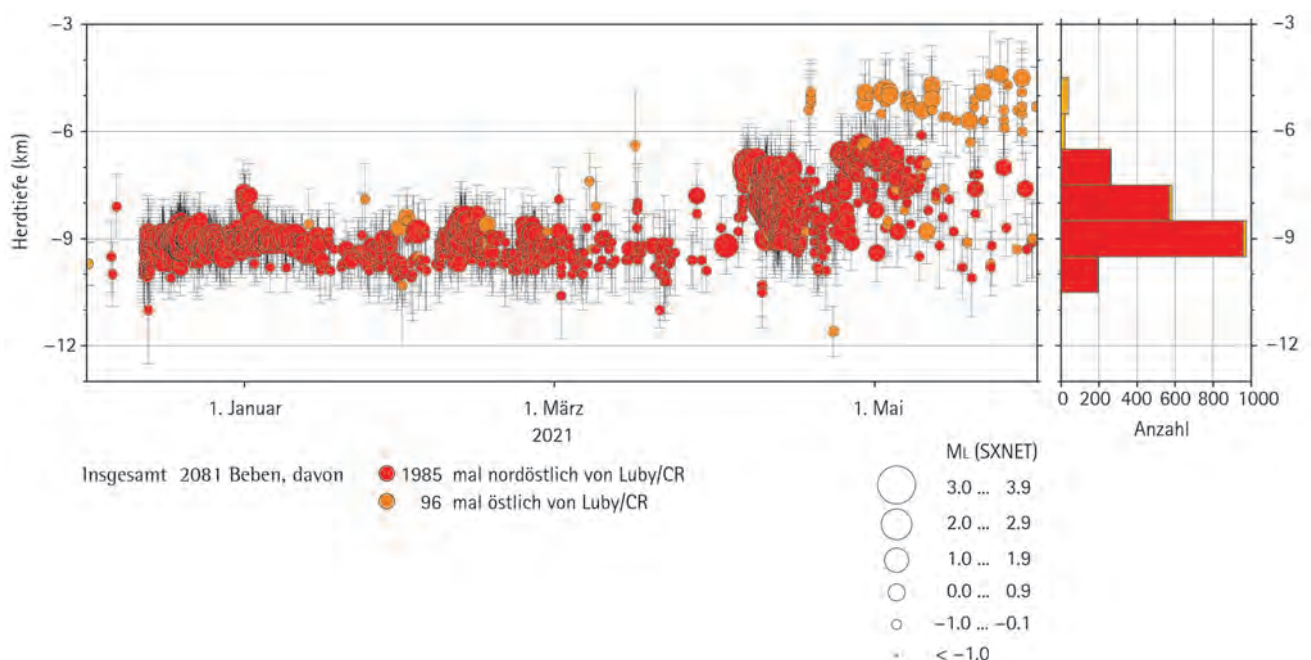


Abb. 2.1-14: Zeitliche Verteilung der Herdtiefen des Schwarms nahe Luby vom Dezember 2020 bis Mai 2021.

Die Magnituden-Häufigkeitsverteilung aller von Dezember 2020 bis Mai 2021 ausgewerteten Beben des Schwarms nahe Luby lässt sich nicht mit einem einzelnen b-Wert beschreiben. Der unterschiedliche Anstieg der Geraden wird in Abb. 2.1-16 deutlich.

Begrenzt man allerdings den Bereich auf die erste Phase des Schwarms, dann ergibt sich ab einer unteren Magnitudengrenze von 0,5 ein stabiler b-Wert von 1,05 (Abb. 2.1-17).

Nach der seismisch sehr aktiven Zeit von Ende 2020 bis in das Frühjahr 2021 folgte zunächst eine vergleichsweise ruhige Zeit bis in das Jahr 2022 hinein.

Am 8.12.2022 ereignete sich im Gebiet östlich von Luby ein aus reichlich 50 Beben bestehender kleiner Schwarm. Das größte Beben hatte eine Magnitude $M_L = 3.1$.

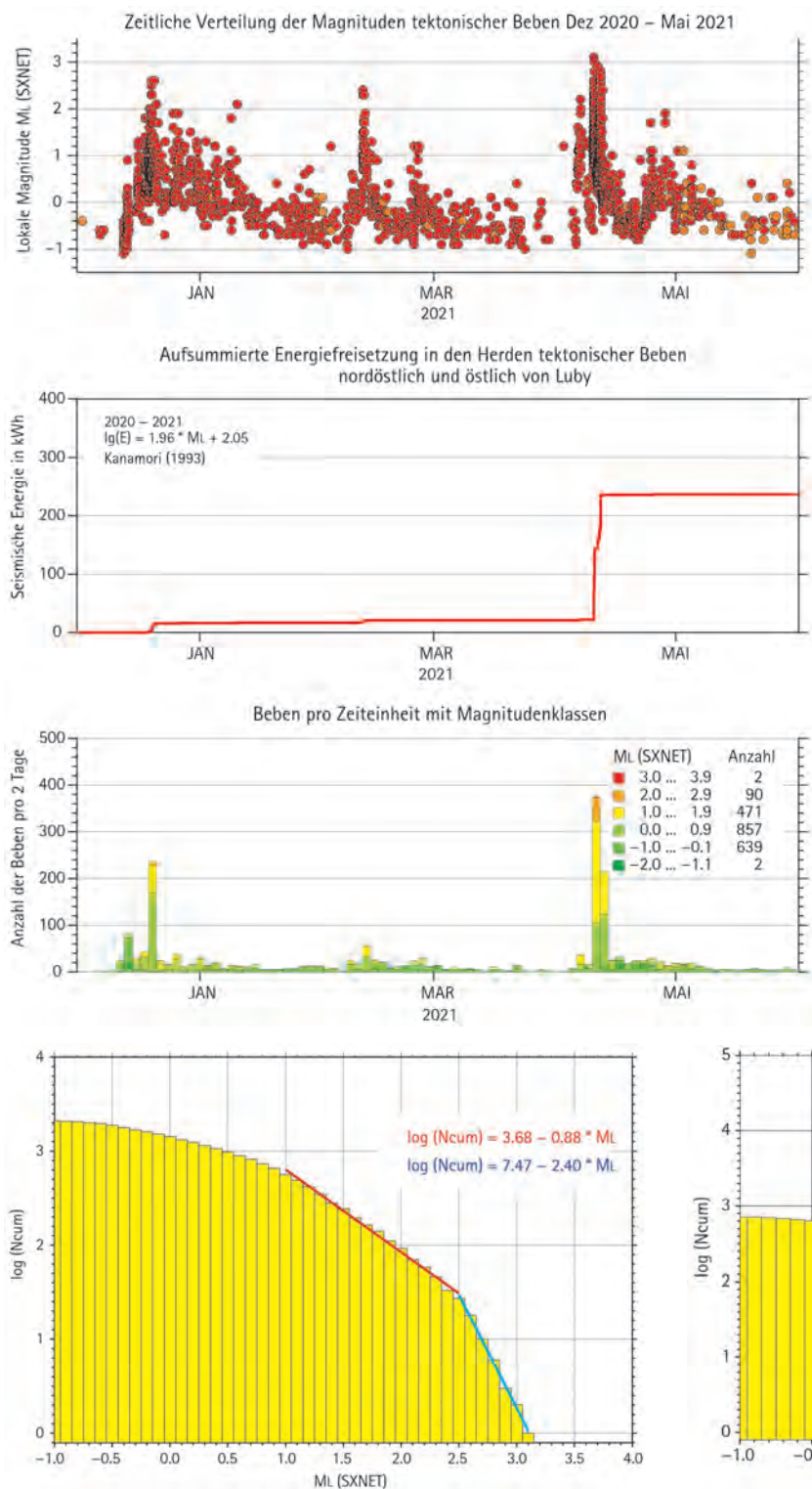


Abb. 2.1-15: Vergleichende Darstellung von zeitlicher Verteilung der Magnituden, der aufsummierten Energiefreisetzung und der pro 2 Tage ausgewerteten Anzahl von Beben mit Einteilung in Magnitudenklassen für den Schwarm 2020/21 nahe Luby.

Abb. 2.1-16: Magnituden-Häufigkeitsverteilung aller Beben des Schwarms Dezember 2020 bis Mai 2021 nahe Luby mit zwei unterschiedlichen b-Werten für die Magnitudenbereiche 1,0–2,5 und 2,5–3,1.

Abb. 2.1-17: Magnituden-Häufigkeitsverteilung der ersten Phase (10. Dezember bis 31. Januar) des Schwarms 2020/2021 nahe Luby.

2.2 Induzierte Seismizität im Südharzgebiet im Zeitraum 2019 bis 2021 unter besonderer Berücksichtigung der automatischen Detektion

MARCEL VAN LAATEN, JÖRG MARTIN & ULRICH WEGLER

2.2.1 Einleitung

Wie sich der tiefe Untergrund verhält, bewegt oder reagiert ist in vielerlei Hinsicht von Interesse und Anlass wissenschaftlicher Untersuchungen, aber auch Gegenstand rein praktischer, technischer Mess- und Überwachungsaufgaben. In Thüringen werden mehrere Messnetze sowohl durch staatliche Stellen als auch durch private Betreiber unterhalten. Anlass dafür ist einerseits die natürlich auftretende und andererseits die durch anthropogenen Einfluss verursachte Seismizität.

Eine Übersicht der seismischen Aktivität im Freistaat Thüringen und dessen Umland ist für den Zeitraum von 2019 bis 2021 in Abb. 2.2-1 dargestellt. Neben der natürlichen seismischen

Aktivität in der Region Vogtland und Westböhmen sowie der Region Ostthüringen und Westsachsen, die detailliert in Kapitel 2.1 beschrieben ist, spielt die induzierte Seismizität eine nicht unwesentliche Rolle in Thüringen. Hervorgerufen wird diese im Wesentlichen durch den Salzbergbau in den Regionen Südwestthüringen und Südharz, in denen induzierte Erdbeben vorkommen. Eine Ausnahme bildete das Erdbeben vom 12. 05. 2020 um 00:48:51 UTC östlich von Bad Tennstedt (in Abb. 2.2-1 zwischen Erfurt und Mühlhausen) mit einer Lokalmagnitude von $M_L = 0,8$. Dieses Erdbeben stellt eine Besonderheit dar, da in dieser Region tektonische Erdbeben nur sehr selten vorkommen.

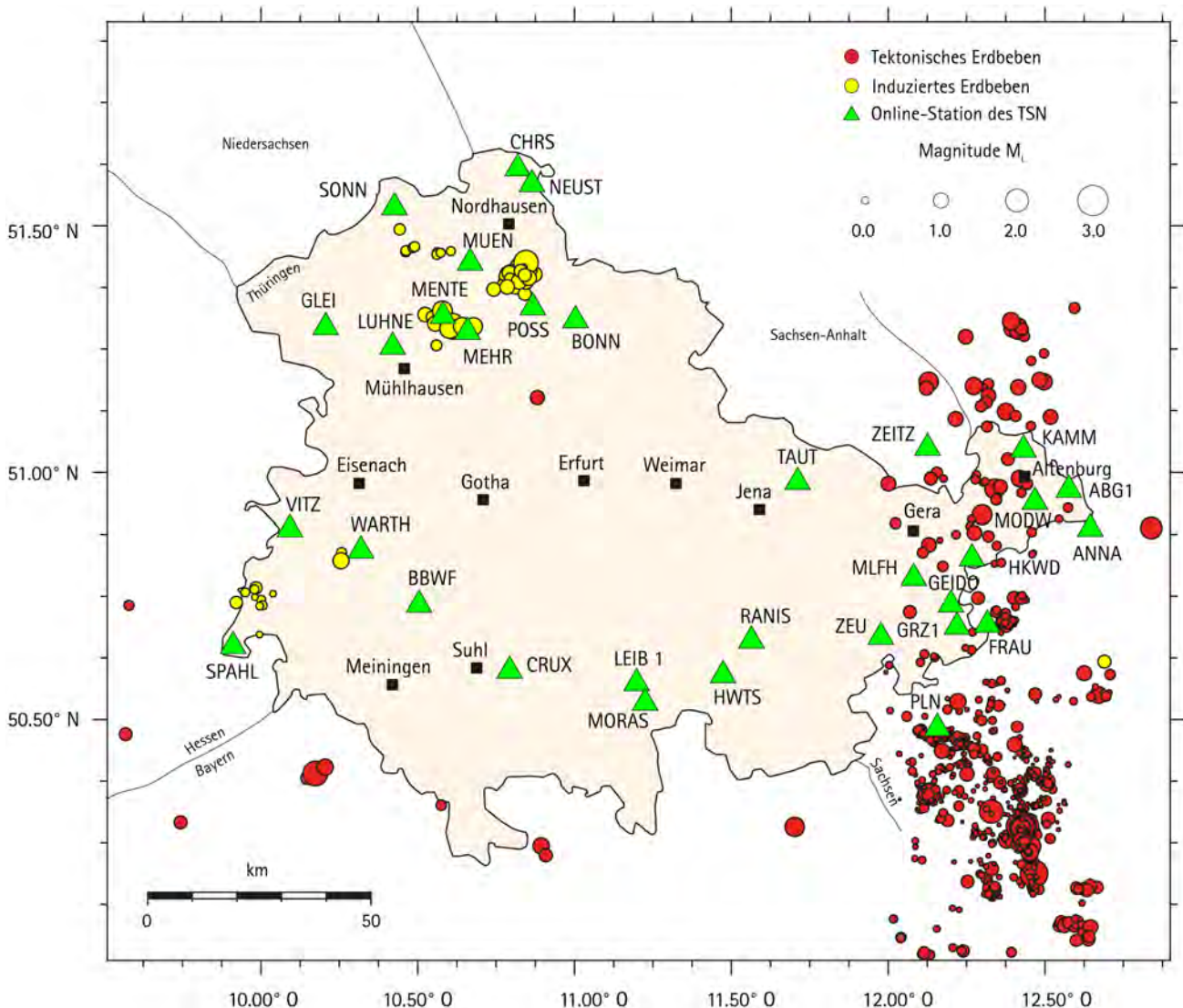


Abb. 2.2-1: TSN-Stationen und seismische Ereignisse in und um Thüringen im Zeitraum 2019 bis 2021.

2.2.2 Bergbauinduzierte Seismizität im Südharz

Im Gegensatz zu Erdbeben tektonischen Ursprungs, die durch ruckartige Bewegungen entlang von Störungszonen entstehen, werden induzierte Erdbeben durch anthropogene Ursachen ausgelöst. Im Bereich Südharz (Abb. 2.2-2) wird dies im Wesentlichen durch den ehemaligen untertägigen Abbau von Kalisalzen hervorgerufen. Durch die untertägigen Auffahrungen und die damit verbundene Hohlräumerschaffung kommt es nach wie vor zu Veränderungen der Spannungsverhältnisse im Untergrund. Die Folge sind u.a. seismische Ereignisse, die durch das Entladen akkumulierter Spannungen bei Überschreitung von Grenzgleichgewichten auftreten. Vor allem durch die relativ geringe Herdtiefe, aber auch durch das etwas andersgeartete Frequenzspektrum werden bereits schwächere Erdbeben von der Bevölkerung eher wahrgenommen als bei natürlicher Seismizität.

Bis zum Beginn der 1990er Jahre wurde und zum Teil wird auch heute noch im Südharz um Bischofferode, Bleicherode, Sollstedt, Menteroda und Sondershausen Bergbau auf Kali- und Steinsalz betrieben, wobei der Höhepunkt in den 1970er und 1980er-Jahren lag. Infolgedessen kommen selbst nach Einstellung des Bergbaus bis heute in diesen Gebieten induzierte Erdbeben vor, wobei neben der markscheiderischen auch anhand der seismischen Überwachung die Erfolge der durchgeführten Sanierungs- und Sicherungsmaßnahmen der letzten Dekaden im ehemaligen Südharz-Kalirevier belegt werden können. Sowohl die seismologischen Netze der Unternehmen im Einwirkungsbereich ihrer Gruben als auch das staatliche Thürin-

ger Seismologische Netz (TSN) sind dabei unverzichtbarer Bestandteil dieser Überwachung. Durch die Verdichtung des TSN sind die Erdbeben im Südharz mittlerweile gut zu detektieren. Die Standorte der seismischen Stationen des TSN sind in Tab. 2.2-1 aufgelistet. Die Bergbauunternehmen betreiben sowohl übertägig als auch untertägig aufgestellte Stationen in bzw. über ihrem ortsspezifisch begrenzten Grubenfeldareal. Logischerweise führt die damit verbundene lokale Konzentration gegenüber dem überregionalen TSN in der Regel zu einer höheren Auflösung in der Magnitudenbestimmung und der Ortungsgenauigkeit für diesen Bereich. Neben der Überwachung des Grubengebäudes dient dies insbesondere auch der Beweissicherung, um Auswirkungen des Bergbaus entsprechend ein- bzw. zuzuordnen zu können. Auftretende Erdbeben ab einer Lokalmagnitude von 1 sind von den Bergbauunternehmen an die zuständige Bergbehörde zu melden. In Abb. 2.2-3 sind exemplarisch die Seismogramme der Südharz-Stationen für ein tektonisches und ein induziertes Erdbeben sowie eine Steinbruchsprengung dargestellt. Sowohl Sprengungen als auch induzierte Erdbeben regen auf Grund ihrer geringen Herdtiefe hochfrequente Oberflächenwellen an, während dies bei tiefen natürlichen Erdbeben nicht der Fall ist (Abb. 2.2-3).

Die derzeit aktivste Region befindet sich nordwestlich von Sondershausen: 31 von insgesamt 55 detektierten Erdbeben im Bereich Südharz wurden hier geortet. Eine Auflistung der stärkeren Ereignisse im Südharz aus dem Zeitraum 2019 bis 2021 ist in Tab. 2.2-2 zu finden.

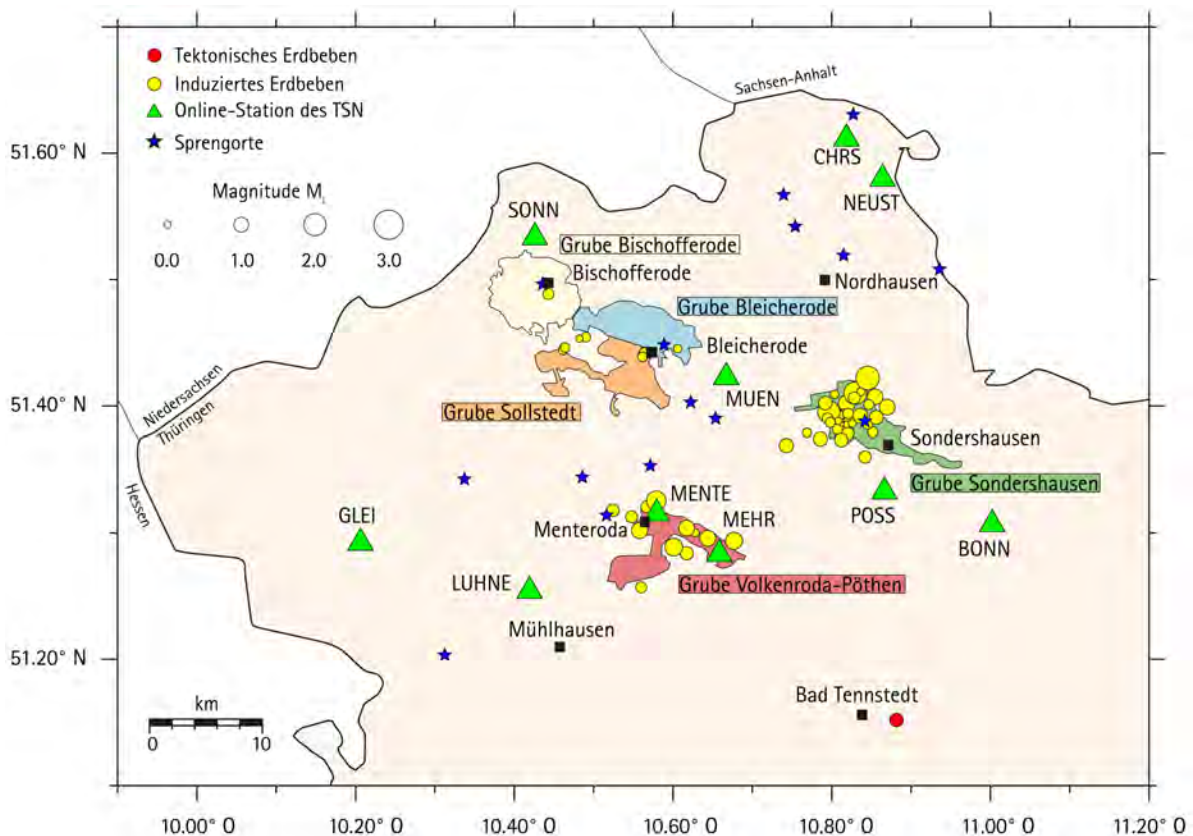


Abb. 2.2-2: TSN-Stationen und seismische Ereignisse im Südharzgebiet im Zeitraum 2019 bis 2021. Sprengorte (z. B. Tagebau) sind als blaue Sterne markiert. Farblich ausgefüllte Flächen entsprechen den Ausmaßen der Bergwerke.

Tab. 2.2-1: Stationen des Thüringer Seismologischen Netzes (TSN) im Südharz-Kalirevier.

Nr.	Station	Ort	Koordinaten [°N/°O]	Höhe [m NN]	in Betrieb seit
1	POSS	Possen	51,33267/10,86677	425	16. 09. 2010
2	CHRS	Christianenhaus	51,60994/10,81861	560	09. 05. 2012
3	NEUST	TS Neustadt	51,57828/10,86430	454	01. 09. 2014
4	BONN	Klostergut Bonnrode	51,30677/11,00242	358	01. 06. 2016
5	MENTE	Menteroda	51,31555/10,57980	393	05. 06. 2019
6	SONN	Sonnenstein	51,53225/10,42599	228	30. 07. 2019
7	LUHNE	HRB Luhne-Lengefeld	51,25384/10,41937	228	27. 08. 2019
8	MEHR	Mehrstedt	51,28330/10,65876	298	12. 11. 2020
9	MUEN	Kloster Muenchenlohra	51,42218/10,66725	286	19. 02. 2020
10	GLEI	Burg Gleichenstein	51,29231/10,20623	462	02. 12. 2021

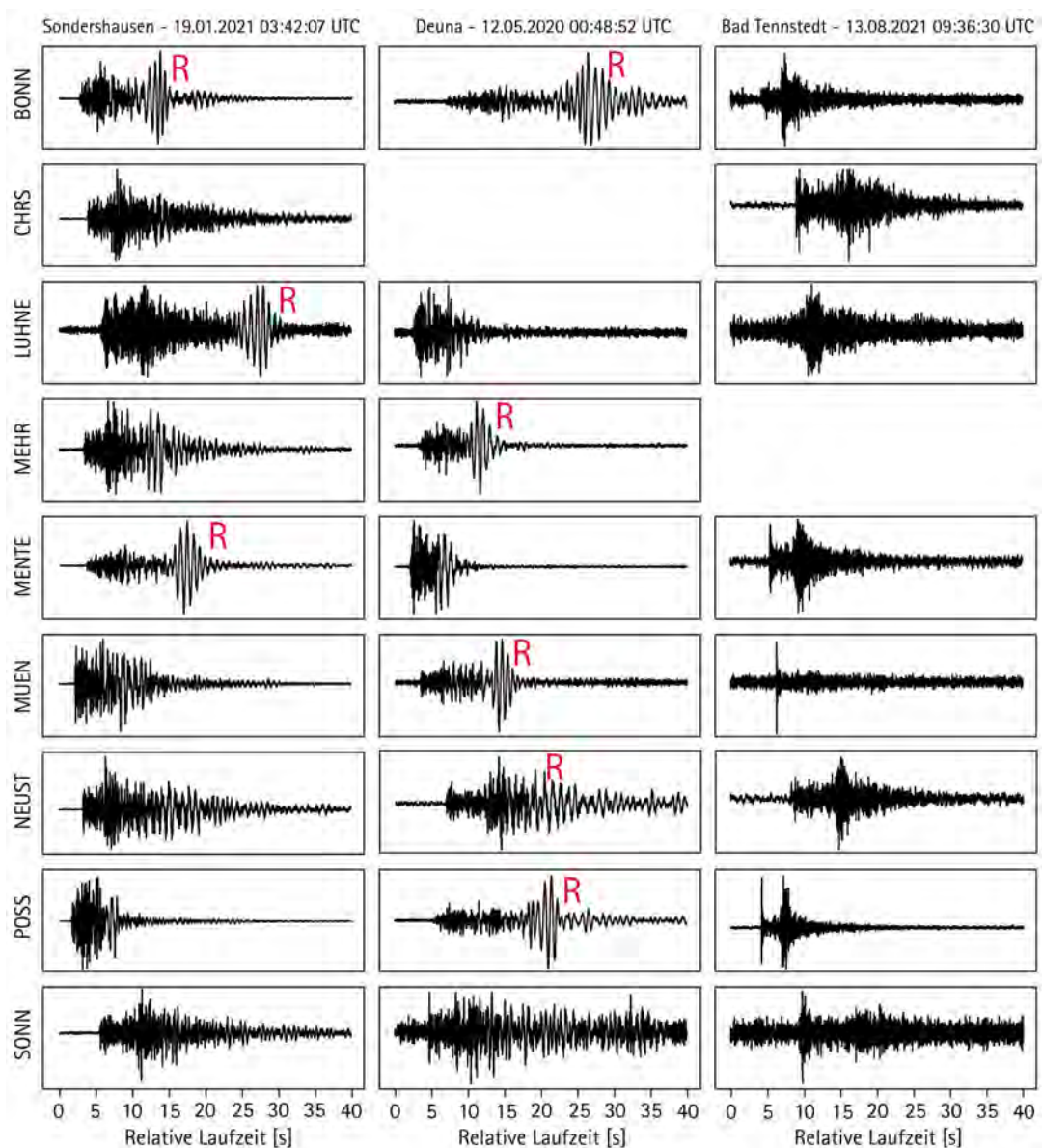


Abb. 2.2-3: Seismogramme (Vertikalkomponente) der Südharz-Stationen des TSN für ein induziertes Erdbeben bei Sondershausen mit einer Lokalmagnitude von 2,2 (linke Spalte), eine Steinbruchsprengung bei Deuna mit einer Lokalmagnitude von 1,8 (mittlere Spalte) und für das tektonische Erdbeben bei Bad Tennstedt mit einer Lokalmagnitude von 0,8 (rechte Spalte). Das rote R markiert die registrierte Oberflächenwelle (Rayleigh-Welle).

Tab. 2.2-2: Seismische Ereignisse im Südharz-Kalirevier 2019–2021 mit $M_L > 1,0$ (Quelle: TSN). Eine Tiefe ist hier nicht angegeben. Um die Tiefe eines Erdbebens zu bestimmen, ist eine Messstation notwendig, die weniger als die Herdtiefe vom Erdbeben entfernt ist. Dies ist bei den flachen induzierten Erdbeben im Allgemeinen nicht der Fall. Deshalb wurde die Herdtiefe auf 1 km festgesetzt.

Ereignis-Nr.	Datum	Herzzeit (UTC) [hh:mm:ss]	Koordinaten [°N/°O]	Lokalmagnitudo	Herdgebiet
1	01. 02. 2019	10:17:28,84	51,296/10,644	1,2	westlich Menteroda
2	01. 02. 2019	16:39:07,75	51,392/10,836	1,0	nordwestlich Sondershausen
3	06. 06. 2019	14:09:13,88	51,325/10,579	1,7	nordöstlich Menteroda
4	14. 06. 2019	00:03:56,30	51,289/10,601	1,4	südöstlich Menteroda
5	19. 06. 2019	11:47:38,81	51,422/10,845	2,2	nördlich Sondershausen
6	29. 09. 2019	10:32:53,46	51,302/10,558	1,2	Menteroda
7	03. 10. 2020	08:21:16,19	51,294/10,677	1,4	östlich Menteroda
8	04. 11. 2020	11:32:53,61	51,407/10,855	1,1	nordwestlich Sondershausen
9	19. 01. 2021	03:42:06,97	51,410/10,830	2,1	nordöstlich Sondershausen
10	29. 03. 2021	16:26:46,29	51,304/10,617	1,1	östlich Sondershausen
11	25. 04. 2021	20:23:34,75	51,385/10,817	1,4	nordwestlich Sondershausen
12	04. 07. 2021	18:21:35,87	51,382/10,816	1,1	nordwestlich Sondershausen
13	20. 07. 2021	17:04:47,09	51,402/10,819	1,3	nordwestlich Sondershausen
14	18. 12. 2021	20:22:54,50	51,399/10,870	1,2	nördlich Sondershausen
15	20. 12. 2021	10:40:28,11	51,395/10,796	1,9	nordwestlich Sondershausen

2.2.3 Automatische Detektionsmechanismen im Südharz

Die mit komplexen IT-Systemen gekoppelten Messstationen ermöglichen es uns, permanent seismische Ereignisse zu erfassen, sodass im Ereignisfall nur wenige Sekunden bis Minuten nach einem Erdbeben bereits eine (grobe) Auswertung vorliegt. Im Bereich des Südharzes kommen hier zwei verschiedene Methoden zum Einsatz, die nach Ereignissen im kontinuierlichen Datenstrom suchen.

Der erste automatische Detektionsmechanismus ist ein Amplitudendetektor [STA-LTA-Detektor (ALLEN 1978)], der die eingehenden Datenströme nach markanten Ausschlägen scannt. Gibt es mehrere markante Ausschläge nahezu zeitgleich an mehreren Stationen einer Region, schlägt der Detektor aus und versucht das Ereignis zu orten. Ob es sich dabei um eine Steinbruchsprengung, ein tektonisches Erdbeben oder ein induziertes Erdbeben handelt, kann dieser Detektionsmechanismus jedoch nicht beurteilen. Aktive Steinbrüche (siehe Abb. 2.2–2), die zur Gewinnung Sprengstoff verwenden, erschweren die Detektion und die Auswertung von Erdbeben. Besonders kompliziert wird es, zwischen einer Sprengung im Tagebau und einem induzierten Erdbeben zu unterscheiden, wenn der Steinbruch über einem Grubenfeld liegt (z.B. Einwirkungsbereiche der Bergwerke Volkenroda und Bleicherode). In Abb. 2.2–4 ist das Verhältnis der georteten Sprengungen/Fehlortungen gegenüber induzierten Erdbeben der Jahre 2019 bis 2021 des Amplitudendetektors für den Bereich Südharz dargestellt. Insgesamt wurden 267 Ereignisse automatisch geortet. Ausgehend von der manuellen Auswertung waren nur etwa 10% induzierte Erdbeben. Die Herausforderung ist es hier, die wenigen induzierten Erdbeben zuverlässig zu detektieren und

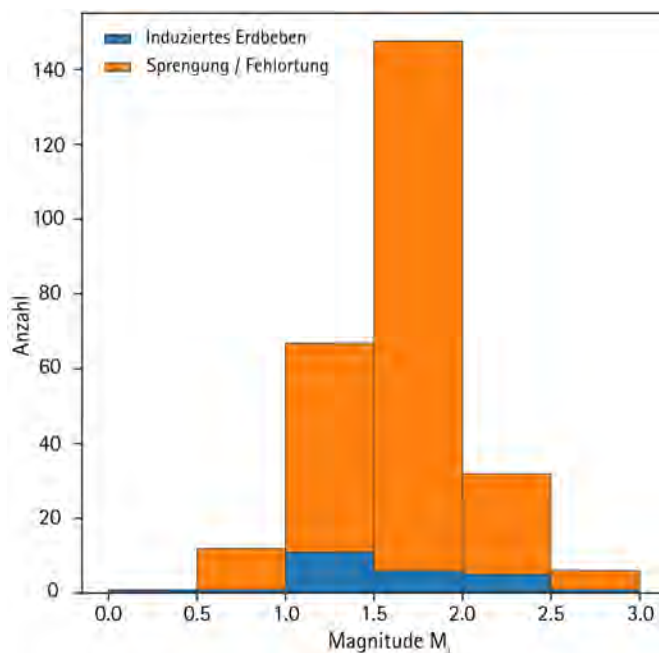


Abb. 2.2-4: Verhältnis zwischen detektierten Sprengungen/Fehlortungen (orange) und induzierten Erdbeben (blau) des Amplitudendetektors im Bereich Südharz 2019 bis 2021 als Funktion der Magnitude.

die Vielzahl an Sprengungen nicht fälschlicherweise als induziertes Erdbeben zu interpretieren.

Zur Verbesserung der Ortung und Aussagefähigkeit der erfassten seismischen Ereignisse kommt deshalb seit August 2017 ein zweiter automatischer Detektionsmechanismus zum Einsatz, der sogenannte Kreuzkorrelationsdetektor (VASTERLING et al. 2017). Dieser Detektor beruht auf dem Zusammenhang, dass Ereignisse vom selben Ort meistens sehr ähnliche Seismogramme liefern. Ein bereits ausgewertetes Einzelereignis von einem bestimmten Ort dient hier als sogenanntes Musterereignis. Dieses Muster wird dann permanent mit den in Echtzeit eingehenden Daten verglichen und wenn die Ähnlichkeit der Wellenform an mehreren Messstationen gleichzeitig groß genug ist, schlägt der Detektor an. Dies hat den Vorteil, dass auch Sprengungen als Muster verwendet werden können und der automatische Prozess zwischen induzierten Erdbeben und Sprengungen unterscheiden kann.

Zwei unterschiedlich eingestellte Kreuzkorrelationsdetektoren werden für den Südharz verwendet, wobei die Einstellungen der Detektoren über die Jahre immer weiter optimiert wurden. Kreuzkorrelator 1 ist dabei "streng" eingestellt, sodass die Ähnlichkeit zwischen dem Muster und den Echtzeitdaten sehr groß sein muss und Kreuzkorrelator 2 ist "weniger streng" eingestellt, sodass die Wellenformen nur ähnlich sein müssen, damit der Detektor anschlägt.

Abb. 2.2-5 stellt einen Vergleich dar, wie erfolgreich dabei die verschiedenen Detektoren im Zeitraum 2019 bis 2021 waren. Die Diskrepanz in der Gesamtanzahl der Erdbeben zwischen dem Amplitudendetektor und den Kreuzkorrelationsdetektoren entsteht durch einen temporären Defekt der Kreuzkorrelationsdetektoren im Jahr 2019. Ersichtlich ist, dass alle Erdbeben mit einer Magnitude von mindestens $M_L = 1,5$ von allen Detektoren erfolgreich gefunden wurden. Unterhalb dieser Schwelle ist jedoch festzustellen, dass die Detektoren unterschiedlich reagieren. Während der Amplitudendetektor weniger anschlägt, je niedriger die Magnitude wird, können die Kreuzkorrelatoren noch immer einen Großteil der Erdbeben identifizieren. Beispielsweise konnten die Kreuzkorrelatoren 14 von 19 induzierten Erdbeben im Magnitudenbereich $M_L = 0,0$ bis $0,49$ orten. Beim Amplitudendetektor waren es im gleichen Magnitudenbereich nur 4 von 19 induzierten Erdbeben. Im Vergleich der beiden Kreuzkorrelatoren miteinander schneidet der weniger strikte Kreuzkorrelator 2 in der Detektion etwas besser ab als der strikte Kreuzkorrelator 1. Die weniger strenge Einstellung des Kreuzkorrelators 2 hat jedoch zur Folge, dass ein identifiziertes Erdbeben häufiger einem falschen Musterereignis zugeordnet wird (Abb. 2.2-6). Des Weiteren ist auch die Standardabweichung bei der Magnitudenbestimmung etwas ungünstiger. Sie beträgt beim Kreuzkorrelator 2 gegenüber der manuellen Auswertung 0,33, dagegen beim Kreuzkorrelator 1 nur 0,28. Die höchste Abweichung ist beim Amplitudendetektor mit 0,44 festzustellen.

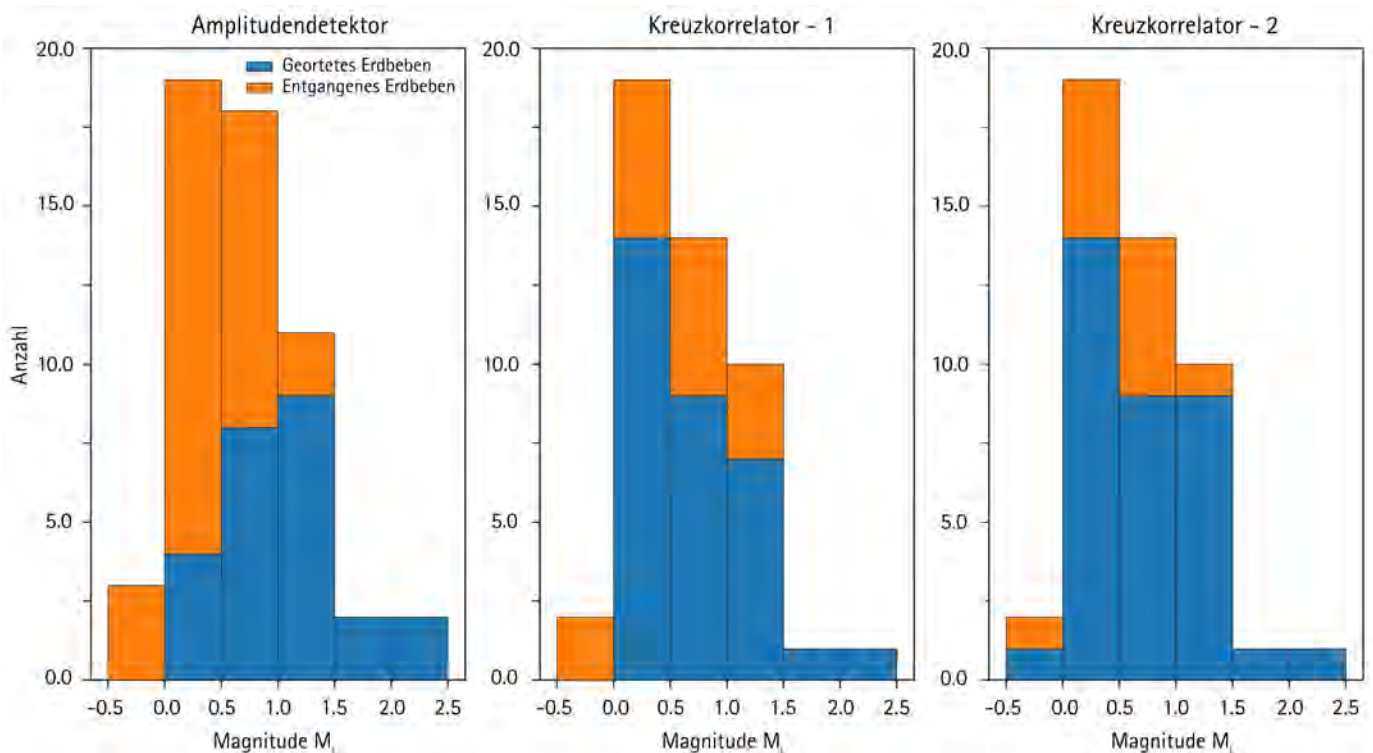


Abb. 2.2-5: Vergleich der Erfolgsquote der drei unterschiedlichen automatischen Detektoren für induzierte Erdbeben im Bereich Südharz 2019 bis 2021 in Abhängigkeit von der Magnitude. Als Maßstab für den Vergleich wird die manuelle Auswertung verwendet. Die unterschiedlichen Gesamthöhen der Balken resultieren aus einem temporären Ausfall der Kreuzkorrelatoren.

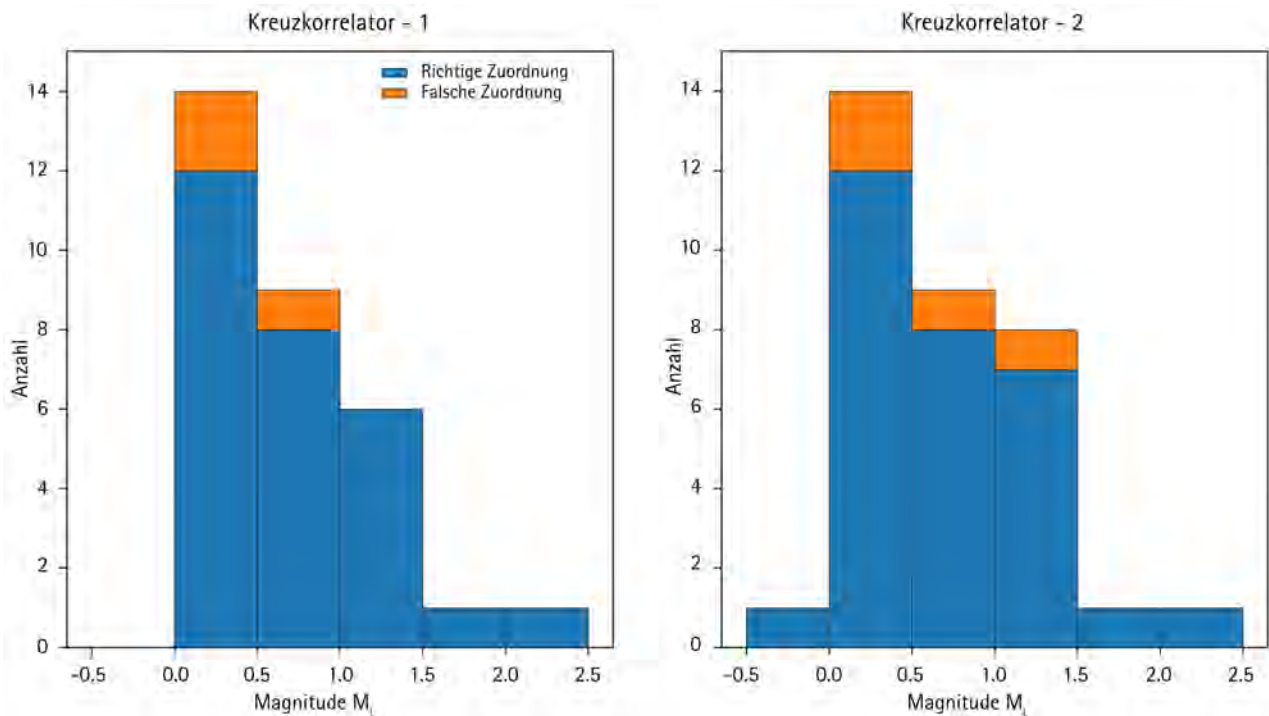


Abb. 2.2-6: Anzahl der Zuordnung zum jeweils richtigen oder falschen Musterevent beider Kreuzkorrelatoren im Bereich Südharz 2019 bis 2021. Als Maßstab für den Vergleich wird die manuelle Auswertung verwendet.

Schlussfolgernd aus den vergleichenden Betrachtungen können den beiden Kreuzkorrelatoren bessere Ergebnisse in der Detektion als dem Amplitudendetektor bescheinigt werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass sie zusätzlich noch zwischen Sprengung und Erdbeben unterscheiden können.

Aber diesen Vorteilen stehen auch einige Nachteile gegenüber. So ist die Kreuzkorrelation rechenintensiver und insgesamt aufwendiger zu bewerkstelligen. Es stellte sich heraus, dass beim Hinzufügen von zu vielen Mustereignissen die Kreuzkorrelatoren den Vergleich mit den Echtzeitdaten nicht mehr realisieren können und sich dadurch eine immer größere Verzögerung aufbaut. Ferner reagieren die Kreuzkorrelatoren sehr empfindlich auf Stationsausfälle. Nicht vorhandene Echtzeitdaten, die im Mustereignis vorkommen, werden als unähnlich interpretiert. Beim Ausfall von mehreren Messstationen einer Region kommt es dann zu keiner Detektion mehr, während der Amplitudendetektor wenigstens noch Detektionen für stärkere Erdbeben liefert. Nachteilig wirkt sich bei den Kreuzkorrelati-

onsdetektoren aus, dass sie nur Muster von bestimmten Regionen implementiert haben. Kommt es zu einem Ereignis, das nicht von den Mustern abgedeckt ist, so ist es möglich, dass die Kreuzkorrelatoren dieses Ereignis erst gar nicht entdecken.

Die vollständige automatisierte Erfassung und digitalisierte Auswertung von seismischen Ereignissen ist nach wie vor noch nicht vollständig realisierbar. Unverkennbar ist aber, dass in den letzten Jahren neben der Verdichtung des Überwachungsnetzes, der Einführung komplexer Detektionsmechanismen und -algorithmen sowie leistungsfähigerer IT-Systeme eine deutliche Verbesserung der Aussagefähigkeit des TSN sowohl in der Orts- und Magnitudenbestimmung als auch in der Auswertegeschwindigkeit ohne gesteigertem Aufwand erreicht wurde. Dieses Niveau zu halten, bedarf sowohl der kontinuierlichen Pflege und Wartung der installierten Stationen als auch der Fortentwicklung und Anpassung der Erfassungs- und Auswertesysteme und nicht zuletzt auch einer hinreichenden Ausstattung in personeller Hinsicht.

Literatur

ALLEN, R. (1978): Automatic earthquake recognition and timing from single traces.— Bulletin of the Seismological Society of America, 68: 1521–1532.

VASTERLING, M.; WEGLER, U.; BECKER, J.; BRÜSTLE, A. & BISCHOFF, M. (2017): Real-time envelope cross-correlation detector: application to induced seismicity in the Insheim and Landau deep geothermal reservoirs.— Journal of Seismology, 21(1): 193–208.

2.3 Induzierte Seismizität in Sachsen

FALK HÄNEL

Die Überwachung von induzierter Seismizität durch lokale seismische Stationsnetze hat sich im Laufe der Zeit als Standard etabliert. Unter induzierter Seismizität versteht man das Auftreten von erdbebenähnlichen Erschütterungen infolge menschlicher Aktivitäten. Neben der induzierten Seismizität in den Bergbaugebieten Polens, die teilweise auch in Ostsachsen verspürt werden kann, auf die hier aber nicht näher eingegangen werden soll, beobachtet man in Sachsen induzierte Seismizität vorwiegend im Zusammenhang mit Bergbau und dessen Folgen.

Nach dem Ende des aktiven Bergbaus der WISMUT im Raum Aue/Hartenstein begann die Flutung der ca. 2 km tiefen Uranerzgrube Schlema/Alberoda. Durch die Flutung der Hohlräume kommt es zu Spannungumlagerungen im unter der Lagerstätte befindlichen Granitkörper. Bei Überschreitung der Bruchfestigkeit des Gesteins der in den Granit eindringenden geologischen Schwächezonen treten räumlich eng begrenzte Brüche, die als sogenannte Bergstöße messbar und teilweise spürbar sind, auf. Zusätzlich zur Überwachung durch die Wismut GmbH ist seit 1997 in der Umgebung des Bergbaugebietes Aue/Hartenstein ein aus fünf Stationen bestehendes lokales Offline-Stationsnetz zur Überwachung des Flutungs-

prozesses installiert (s. Tab. 3.1-2). In Koordination mit dem Messnetz der WISMUT GmbH werden die Registrierungen des Offline-Netzes für eine Regulierung des Flutungsgeschehens im Hinblick auf eine Begrenzung der induzierten seismischen Aktivität genutzt. Ebenso dient das Netz einer unabhängigen Abschätzung der seismischen Gefährdung durch Messung der durch die induzierten seismischen Ereignisse hervorgerufenen maximalen Bodenerschütterungen.

Der zeitliche Verlauf der seismischen Aktivität ist gemeinsam mit dem Flutungsgeschehen (Quelle: WISMUT GmbH) für den gesamten Zeitraum seit Installation des Offline-Stationsnetzes in Abb. 2.3-1 dargestellt. Aus der zeitlichen Verteilung der induzierten Ereignisse relativ zu Änderungen des Wasserpegels im Grubengebäude ist zu schlussfolgern, dass das umgebende Gebirge in der Regel nicht sofort auf Spannungumlagerungen infolge von Pegeländerungen (Erhöhung oder Absenkung) reagiert, sondern ein rheologisches Verhalten zeigt: Die seismische Energiefreisetzung folgt zeitverzögert und äußert sich in einer Erhöhung der Aktivität sowohl in Anzahl als auch Stärke der induzierten seismischen Ereignisse. Die maximale Stärke der flutungsinduzierten seismischen Ereignisse bleibt aber unter prognostizierten möglichen natürlichen Erdbeben.

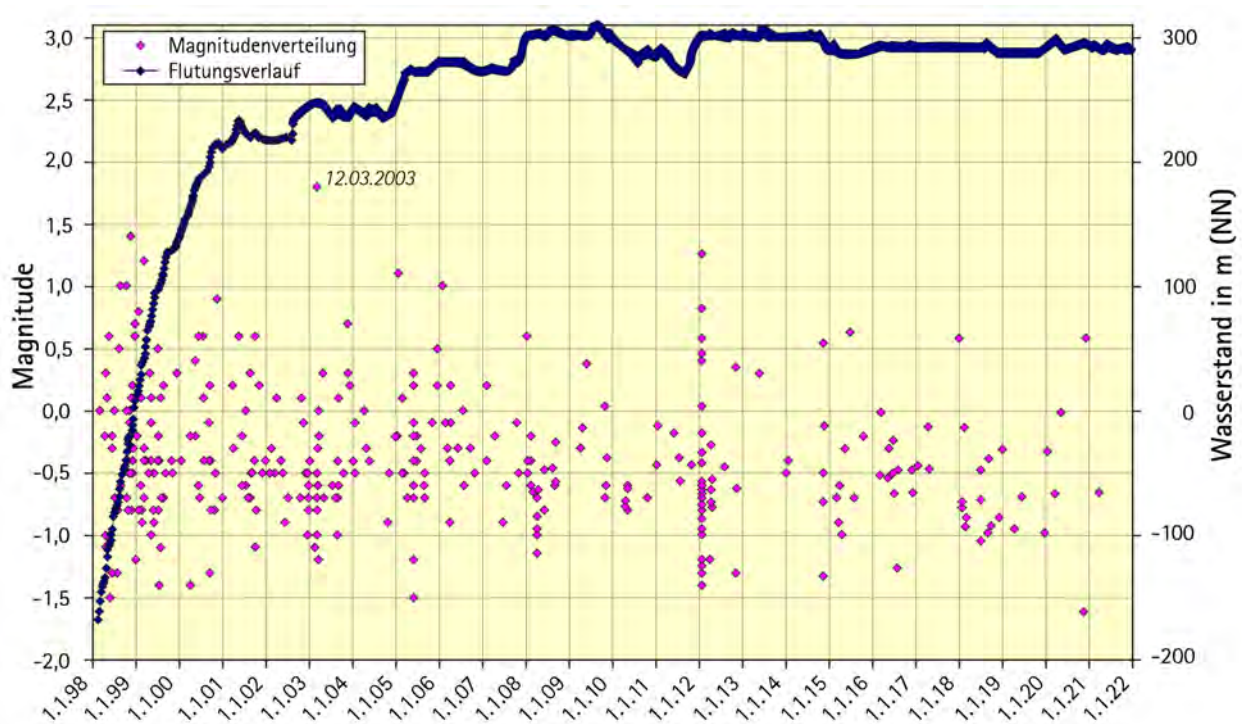


Abb. 2.3-1: Flutungsverlauf (Quelle: WISMUT GmbH) und Magnitudenverteilung der durch das Offline-Stationsnetz erfassten induzierten Seismizität im Bereich der Grube Schlema-Alberoda seit 1998.

2.4 Vergleich: Stärkste Erdbeben weltweit

Ivo RAPPSILBER

Die seismische Aktivität in Mitteldeutschland ist keinesfalls bedeutungslos. Trotzdem kann eingeschätzt werden, dass die drei Länder Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen im Vergleich zum globalen seismischen Geschehen in einer tektonisch ruhigen Region liegen. Zur Einordnung wird hier eine Auflistung

der stärksten weltweiten Beben im Dreijahreszeitraum 2019–2021 gegeben (Tab. 2.4–1). Es sei darauf hingewiesen, dass ein exponentieller Zusammenhang der Magnitude zur freigesetzten Energie besteht. Ist die Magnitude um eine Einheit größer, erhöht sich die Energie um den Faktor 90.

Tab. 2.4-1: Schadensbeben weltweit mit Magnitude 7 und größer. Quelle: U.S. Geological Survey.

Datum	Herdzeit (UTC) [hh:mm]	Region	Opfer	Magnitude	Tiefe [km]	Intensität
22. 02. 2019	10:17	Ecuador	0	7,5	145	VII
01. 03. 2019	08:50	Peru	0	7,0	267	IV
06. 05. 2019	21:19	Papua-Neuguinea	0	7,1	146	VII
14. 05. 2019	12:58	Papua-Neuguinea	0	7,6	10	VII
26. 05. 2019	07:41	Peru	2	8,0	120	VIII
15. 06. 2019	22:55	Südpazifik	0	7,3	46	IV
24. 06. 2019	02:53	Bandasee	0	7,3	212	VI
06. 07. 2019	03:19	Kalifornien	0	7,1	8	IX
14. 07. 2019	09:10	Indonesien	14	7,2	19	VII
14. 11. 2019	16:17	Indonesien	0	7,1	33	VI
28. 01. 2020	19:10	Karibik	0	7,7	15	VI
13. 02. 2020	10:33	Kurilen	0	7,0	143	VI
25. 03. 2020	02:49	Kurilengraben	0	7,5	58	V
18. 06. 2020	12:49	Südpazifik	0	7,4	10	VII
23. 06. 2020	15:29	Mexiko	10	7,4	20	IX
17. 07. 2020	02:50	Papua-Neuguinea	1	7,0	73	VII
22. 07. 2020	06:12	Alaska	0	7,8	28	VII
19. 10. 2020	20:54	Alaska	0	7,6	28	VII
30. 10. 2020	11:51	Griechenland/Türkei	119	7,0	21	VIII
21. 01. 2021	12:23	Philippinen	0	7,0	80	V
10. 02. 2021	13:20	Südpazifik	0	7,7	10	IV
13. 02. 2021	14:07	Japan	1	7,1	44	VIII
04. 03. 2021	13:27	Neuseeland	0	7,4	10	VI
04. 03. 2021	19:28	Südpazifik	0	8,1	29	VIII
20. 03. 2021	09:09	Japan	0	7,0	43	VII
21. 05. 2021	18:04	China	0	7,3	10	IX
29. 07. 2021	06:15	Alaska	0	8,2	35	VIII
11. 08. 2021	17:46	Philippinen	1	7,1	55	VII
12. 08. 2021	18:35	Südatlantik	0	8,1	23	VII
14. 08. 2021	12:29	Haiti	>2248	7,2	10	IX
22. 08. 2021	21:33	Südatlantik	0	7,1	6	IV
08. 09. 2021	01:47	Mexiko	2	7,0	20	VIII
02. 10. 2021	06:29	Südpazifik	0	7,3	527	IV
28. 11. 2021	10:52	Peru	0	7,5	126	VIII
14. 12. 2021	03:20	Indonesien	1	7,3	14	VI
29. 12. 2021	18:25	Indonesien	0	7,3	165	VII

3 Seismologische Netze in Mitteldeutschland

3.1 Sachsennetz (SXNET) mit den Stationen Sachsen-Anhalts

SIGWARD FUNKE & FALK HÄNEL

Die sächsischen Erdbebenstationen werden traditionell als Online- und Offline-Stationen beschrieben. Dabei geht es um die dauerhafte Datenanbindung, die eine Fernwartung und einen zeitnahen kontinuierlichen Datenabruf sämtlicher Messergebnisse ermöglicht. Die Online-Verbindungen werden sämtlich über das Internet realisiert; die technische Basis bilden jeweils eigene Mobilfunk- oder Festnetzverbindungen oder auch Netzwerkverbindungen, die einige Gastgeber der Standorte der Erdbebenstationen bereitstellen. Die früher üblichen Wählverbindungen im Festnetz per ISDN sind restlos durch die DSL-Verbindungen abgelöst, die als Standleitung betrachtet werden können.

Der etwas größere Installationsaufwand einer Online-Station führte in der Vergangenheit dazu, dass die Online-Stationen auch als „permanentes Netz“ und die Offline-Stationen als „mobiles Netz“ bezeichnet wurden. Diese Unterscheidung tritt derzeit etwas in den Hintergrund.

Die Online-Stationen werden überwiegend von der Universität Leipzig im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) betrieben. Hinzu kommen im Auftrag des Landesamtes für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt (LAGB) vier ähnliche Stationen Sachsen-Anhalts. Im Routinebetrieb kommen sämtliche erfassten Daten binnen einiger Sekunden oder weniger Minuten vollständig und automatisch ins Leipziger Datenzentrum.

Die Offline-Stationen betreibt die Bergakademie Freiberg bedarfsweise an wechselnden Standorten. Auf die Daten kann nur zeitverzögert im Rahmen regelmäßiger Ortstermine zugegriffen werden, wenn die Datenträger (oder deren Inhalte) ins Datenzentrum geholt werden. Schrittweise werden auch diese Stationen auf Online-Zugriff umgestellt; Ende 2021 waren drei Freiberger Stationen bereits online.

3.1.1 Online-Stationsnetz (permanentes Netz)

3.1.1.1 Übersicht

Auch im Berichtszeitraum 2019–2021 konnte das sächsische Online-Netz (siehe Tab. 3.1-1 und Abb. 3.1-1) ohne größere Eingriffe kontinuierlich betrieben und deutlich verdichtet werden. Die folgende Einschätzung ist damit auch eine Fortschreibung des letzten Dreijahresberichtes (SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE 2019: S. 29):

- ◆ Hinsichtlich der Stationstechnik und der Standortwahl haben sich Konzepte der letzten Jahre weiter bewährt.
- ◆ Eine wichtige Voraussetzung für diesen langjährigen Betrieb ist die hervorragende Kooperation mit allen Gastgebern der Stationsstandorte; ihnen gebührt großer Dank.
- ◆ Auch im Berichtszeitraum 2019–2021 gelang es den beteiligten Technikern, längere Datenlücken zu vermeiden.

Das Sachsennetz wuchs bis 2021 um 6 weitere Online-Stationen auf 15 Erdbebenstationen in Sachsen und 4 in Sachsen-Anhalt an; alle bisherigen Stationen sind weiterhin in Betrieb.

3.1.1.2 Neue Stationen

In Sachsen-Anhalt konnte in Landsberg (Saalekreis) eine neue Erdbebenstation (LANDS) in einem ehemaligen Bunker im Festgestein eingerichtet werden (Kap. 3.2). Gastgeber ist die Stadtverwaltung Landsberg nordöstlich von Halle. Gemeinsam mit der Station Burzelberg (BURZL, siehe unten) verdichtet sie das Stationsnetz nördlich von Halle und Leipzig. Damit wird die Überwachung des nördlichen Abschnitts der von Oberfranken und NW-Böhmen nach Norden verlaufenden Erdbebenzone verbessert. Verbesserungen werden bei der Tiefenbestimmung der in diesem Bereich seltenen tektonischen Beben erwartet. Für die Detektionsschwelle, die für tektonische Beben bereits deutlich unter der Fühlbarkeitsgrenze liegt, wird der Gewinn eher gering ausfallen, weil die Registrierbedingungen aus mehreren Gründen beeinträchtigt sind, z. B. durch dichte Besiedlung, Verkehrswege und Industrieanlagen.

Nordöstlich von Leipzig liegt die Erdbebenstation Burzelberg (BURZL) in den Hohburger Bergen in der Gemeinde Lossatal



Abb. 3.1-1: Erdbebenstationen, deren Daten kontinuierlich für die seismologische Auswertung zur Verfügung stehen: Sachsennetz (SXNET) mit Stationen von Sachsen-Anhalt, Thüringer Netz (TSN) und Stationen angrenzender Gebiete (Stationsabkürzungen der Online-Netze Tab. 3.1-1 und 2.2-1 und des Offline-Sachsennetzes in Tab. 3.1-2).

Tab. 3.1-1: Stationen des Online-Netzes (SXNET) mit den Stationen Sachsen-Anhalts

Stationskürzel	Standort	geogr. Breite [°N]	geogr. Länge [°O]	Höhe [m NN]	In Betrieb seit
Sachsen					
BURZL	Hohburger Berge, Trinkwasserhochbehälter	51,431	12,815	220	01. 11. 2020
EIBE	Talsperre Eibenstock	50,530	12,560	491	15. 07. 2020
FBE	Freiberg, Lehr- und Besucherbergwerk „Alte Elisabeth“, 4. Gezeugstrecke	50,921	13,354	235	27. 09. 2004
FROHN	Frohnau, Besucherbergwerk	50,595	12,989	483	22. 08. 2019
GUNZ	Gunzen, Trinkwasserhochbehälter	50,364	12,332	669	08. 08. 2001
LEUT	Leutersbach, private Wetterstation	50,607	12,523	410	04. 05. 2016
MEINS	Meinersdorf, privater Erdschacht	50,732	12,881	501	17. 04. 2020
MULD	Muldenberg, Talsperre	50,412	12,404	678	20. 12. 2007
ROHR	Rohrbach, Trinkwasserhochbehälter	50,234	12,317	629	07. 08. 2001
SCHF	Schönfels, Burgmuseum	50,677	12,403	435	14. 06. 2007
SOSA	Talsperre Sosa, östliche Mauerkrone	50,491	12,640	645	07. 09. 2021
TANN	Tannenbergesthal, Besucherbergwerk	50,415	12,461	836	19. 12. 2000
TRIB	Obertriebel, privater Schuppen	50,352	12,137	510	19. 12. 2001
WERD	Werda, Talsperre	50,448	12,306	589	13. 06. 2001
WERN	Wernitzgrün, Trinkwasserhochbehälter	50,287	12,376	672	02. 08. 2000
Sachsen-Anhalt					
LANDS	Landsberg, ehemaliger Bunker	51,526	12,163	115	27. 11. 2018
MUHB	Muldenstein, Trinkwasserhochbehälter	51,658	12,342	115	10. 11. 2015
NEUB	Neuenburg, Burgmuseum	51,208	11,775	200	21. 08. 2003
WIMM	Wimmelburg, W-Schacht	51,521	11,505	80	16. 09. 2008

(Landkreis Leipzig) ebenfalls auf Festgesteinsuntergrund. Hier ist der örtliche Trinkwasserversorger Gastgeber im Nebengebäude eines Trinkwasserhochbehälters.

Südlich von Chemnitz bietet die Station Meinersdorf (MEINS) im gleichnamigen Ortsteil der Gemeinde Burkhardtsdorf (Erzgebirgskreis) mehrere Besonderheiten: Nach der Station Leutersbach (LEUT) arbeitet hier das zweite Seismometer des Sachsennetzes in einem Erdschacht. Die restliche Stationstechnik findet in einem weiteren Erdschacht in unmittelbarer Nähe ihren Platz. Die erforderlichen Kabelverbindungen (230 V, Internet) zu den benachbarten Gebäuden liegen ebenfalls unter der Erde. Die beiden Erdschächte wurden aus zwei 200-Liter-Fässern errichtet. Damit zeigen die Stationen LEUT und MEINS, dass ein Aufbau und Betrieb auch außerhalb von Gebäuden möglich ist. Die Seismogramme werden mit einem vor einigen Jahren ausgesonderten Digitizer Quanterra Q730 aufgezeichnet, der um einen Mini-PC ergänzt und damit vollwertig wiederbelebt wurde. Die Platine des Mini-PCs findet dabei im Gehäuse des Quanterra-Digitizers Platz (Abb. 3-1.2). Neben der etwas kompakteren Bauweise mit modernem Netzwerk-Anschluss (Ethernet) statt serieller Leitungen (RS232) ist der

wichtigste Nutzen der Modernisierung, dass der sogenannte „Überlauf der Wochenummer“ (Week Number Roll Over) der ursprünglichen GPS-Empfänger zuverlässig und zeitnah korrigiert wird. Erst mit diesen Änderungen können mit diesem Typ Digitizer wieder Seismogramme mit korrekter Zeitinformation gewonnen werden.

Weiter südlich von Chemnitz registriert die Erdbebenstation Frohnau (FROHN) im gleichnamigen Stadtteil von Annaberg-Buchholz (Erzgebirgskreis) im gastgebenden Besucherbergwerk Markus-Röhling-Stolln. Die Messkammer befindet sich etwa 1000 m vom Stollenmundloch entfernt seitlich der Besucherstrecke, die Gesteinsüberdeckung bis zur Tagesoberfläche beträgt etwa 80 m. Wie bei jeder Untertagestation stellen Stromversorgung, Fernzugriff (Internet) und Zeitdienst eine besondere Herausforderung dar. Anders als bei den anderen Stationen des Online-Netzes wurde auf eine GPS-Antenne und entsprechende exklusive Kabelverlängerung verzichtet. Stattdessen wird die besondere Funktion des Datenloggers (Typ Centaur der Fa. Nanometrics) genutzt und das Zeitsignal aus der Internetanbindung gewonnen.



Abb. 3.1-2: Geöffneter Quanterra-Koffer. Unten (silberner Hintergrund) ist die originale Elektronik zu sehen, oben (schwarzer Hintergrund) finden sich links die zusätzliche Platine (Typ Alix, Größe ca. 15 x 15 cm) und weiter rechts Schnittstellenwandler und die zusätzliche Verkabelung (Foto: R. Voigt).

Im Westen des Erzgebirgskreises unweit vom Vogtland hat die Bergakademie Freiberg die beiden Erdbebenstationen Eibenstock (EIBE) und Sosa (SOSA) von Offline- zu Online-Stationen umgebaut; Einzelheiten folgen weiter unten im Kapitel Offline-Netz.

3.1.1.3 Modernisierung im Bestand

Im November 2021 konnte die Station Leutersbach (LEUT, Stadtteil von Kirchberg, Landkreis Zwickau) von der TU Bergakademie Freiberg mit Geräten der Fa. Guralp ausgestattet werden. Dank

dieser Kooperation wurde der zuvor etwas problematische Betrieb dieser Station stabilisiert. Zuvor war dort ein einfaches Geophon als Sensor eingesetzt, später kam es wegen Reparaturen zu größeren Datenlücken.

3.1.1.4 Nachbarnetze

Die bereits gewohnte Zusammenarbeit mit den Nachbarnetzen wurde nahtlos und mit unveränderten Konditionen fortgesetzt. Aus Sicht der Datenauswertung bilden alle Stationen der Umgebung ein einheitliches Netzwerk. Nahezu alle Netze verzeichnen einen Zuwachs an Erdbebenstationen wie er auch in Abb. 3.1-1 erkennbar wird. Von nahezu allen genannten Online-Stationen stehen die elektronischen Seismogramme lückenlos bereits nach einigen Sekunden im Leipziger Datenzentrum und damit zur automatischen und manuellen Auswertung bereit. Neben den 19 Stationen des sächsischen Online-Netztes stehen weitere 85 Stationen der Nachbarnetze bereit, die überwiegend innerhalb des Kartenausschnitts der Abb. 3.1-1 liegen:

- ◆ Thüringer Seismologisches Netz (TSN) – 33 Stationen,
- ◆ Deutsches Regionalnetz seismologischer Breitbandstationen (GRSN) – 18 Stationen,
- ◆ Tschechisches Regionales Seismisches Netzwerk (CRSN) – 13 Stationen,
- ◆ Westböhmennetz (WB, Tschechische Akademie der Wissenschaften) – 5 Stationen,
- ◆ Bayern-Netz (BW, Universität München) – 5 Stationen,
- ◆ Geofon-Netz (GE, Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum) – 4 Stationen,
- ◆ Universität Potsdam (WA) – 1 Station,
- ◆ Hessennetz (HS, Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie) – 6 Stationen.

Damit sind in Mitteldeutschland und Umgebung über 100 Erdbebenstationen mit kontinuierlichen Daten verfügbar.

3.1.2 Offline-Stationsnetz (mobiles Netz)

Das Institut für Geophysik und Geoinformatik der TU Bergakademie Freiberg setzte seit Mitte der 90er Jahre vor allem Offline-Stationen (Datenspeicherung vor Ort auf Datenträger) der Typen MARS-88 und MARSlite der Firma Lennartz electronic/Tübingen ein, um Erdbeben und sonstige Erschütterungen auf dem Gebiet des Freistaates Sachsen und angrenzender Regionen registrieren zu können. Der dauerhafte Betrieb hat jedoch mit der Zeit zu irreparablen Defekten v.a. der magneto-optischen Laufwerke zur Datenspeicherung geführt, sodass eine Erneuerung des mobilen Offline-Stationsnetzes in Richtung eines eingeschränkt mobilen Online-Stationsnetzes mit einer zum bestehenden Online-Stationsnetz SXNET adäquaten und kompatiblen Geräteausstattung eingeleitet wurde.

Zum Einsatz kommen dabei Online-Stationen der Firma Guralp Systems Ltd. Die grundlegenden Komponenten sind in Abb. 3.1-3 dargestellt. Den Vorteil der zeitgemäßen Echtzeitdatenübertragung erkaufte man sich allerdings mit einem erhöhten Installationsaufwand im Gegensatz zur alten Offline-Technik: Ein Internetanschluss bzw. Mobilfunkempfang muss vorhanden sein und eine GPS-Antenne zum Empfang des Zeitsignals muss im Außenbereich angebracht werden. Damit geht einher, dass diese Stationen im Bedarfsfall nicht mehr ganz so schnell und unkompliziert umgesetzt werden können wie bisher.

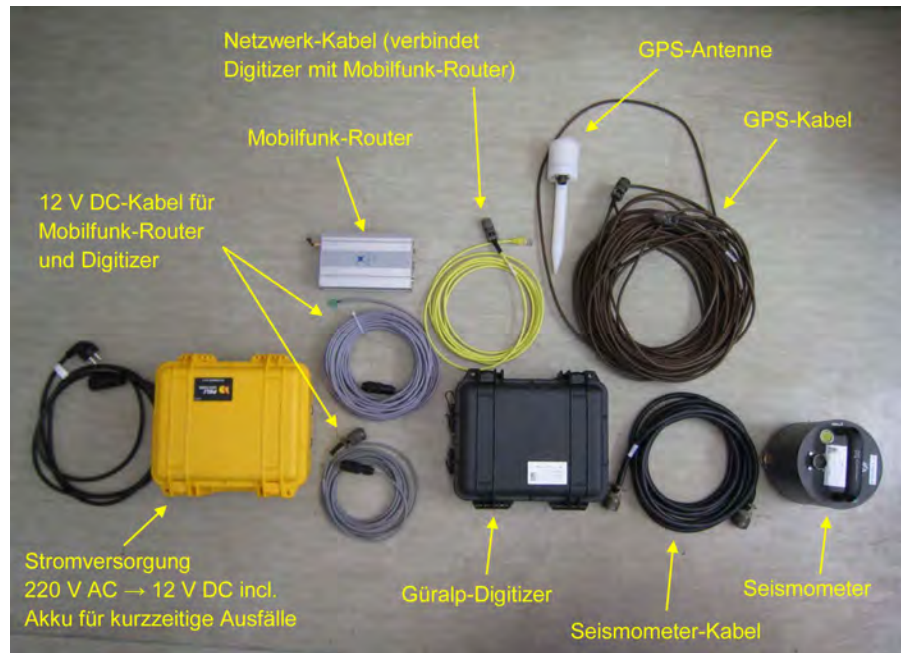


Abb. 3.1-3: grundlegender Aufbau einer (mobilen) Online-Station.

3.1.2.1 Neue Online-Stationen EIBE und SOSA

Die ersten beiden so modernisierten Stationen sind an den Talsperren Eibenstock (Stationscode EIBE, Abb. 3.1-4 und 3.1-5) und Sosa (SOSA) installiert. Sie lösen die veraltete Offline-Technik an diesen Standorten (alte Stationscodes EIF bzw. SOS) ab. Sie werden wie bisher im Auftrag der Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen (LTV) betrieben und dienen in der Hauptsache dem Monitoring der dynamischen Belastung der Talsperrenmauern, hervorgerufen durch natürliche (Erdbeben) und künstliche Erschütterungen (Steinbruchsprengungen). Hierbei geht es vor allem um die Frage der Standsicherheit.

von Mikroseismizität im näheren Umfeld. Die kontinuierlichen Stationsdaten werden hierfür zusammen mit denen der anderen Stationen des Sachsenetzes SXNET mittels der automatischen Detektion (Kap. 4.1) prozessiert und ausgewertet.

Dank gilt an dieser Stelle allen beteiligten Mitarbeitern der Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen in der Verwaltung und vor Ort an den Talsperren, die zum Gelingen der nötigen Umbaumaßnahmen beigetragen haben.

Durch die optimalen Registrierbedingungen in Talsperrenbauwerken ergibt sich zusätzlich die Möglichkeit der Registrierung



Abb. 3.1-4: GPS-Antenne der Online-Station EIBE im Außenbereich der Talsperre Eibenstock.



Abb. 3.1-5: Online-Station EIBE in kleiner Kammer am südlichen Mauerfuß.

Tab. 3.1-2: Standorte und Betriebszeiten der Offline-Stationen

Stationskürzel	Standort	geogr. Breite [°N]	geogr. Länge [°O]	Höhe [m NN]	Betriebszeit
Region Aue					
AUC	Aue, Viehzucht	50,6216	12,7053	448	seit 22. 10. 2004
AUP	Aue, „Prinzenhöhle“, Garage	50,6381	12,6802	369	seit 22. 10. 2004
AUM	Aue, Keller Markus-Semmler-Straße	50,6072	12,6800	401	seit 22. 10. 2004
AUS	Aue, Baumarkt Wildbach	50,6260	12,6440	512	seit 24. 07. 2007
AUX	Aue, Keller Nähe Wasserbehandlungsanlage	50,6257	12,6858	343	29. 04. 2008 - 10. 01. 2017 seit 08.01.19
AUZ	Aue, Keller Mühlweg	50,6191	12,6804	350	10. 07. 2012 - 15. 10. 2013 10. 01. 2017 - 08. 01. 2019
Talsperren					
EIF	Eibenstock, Talsperre, südlicher Mauerfuß	50,5296	12,5990	490	21. 02. 2014 - 07. 09. 2021
BAU	Bautzen, Talsperre Hauptgebäude	51,2199	14,4699	173	seit 03. 05. 2018

Literatur

SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE [HRSG.] (2019): Erdbebenbeobachtung in Mitteldeutschland. Dreijahresbericht 2016-2018.— 66 S.; Dresden.

3.2 Seismologische Station in Landsberg (LANDS)

IVO RAPPSILBER, SIGWARD FUNKE & RENÉ VOIGT

Die stärkeren Erdbeben vom 16.04.2015 bei Gröbers und 29.04.2017 bei Markranstädt haben gezeigt, dass der nördliche Abschnitt der Leipzig-Regensburg-Zone eine zwar geringere, aber eine trotzdem nicht zu vernachlässigende Seismizität aufweist. Schon nach dem Gröbers-Beben wurde im Umfeld ein temporäres Überwachungsnetz installiert, um eventuelle Nachbeben erfassen zu können. Bei der damaligen Standortwahl rückte auch die Stadt Landsberg in den Fokus, da das im weiteren Gebiet ansonsten mächtige Lockergesteinsstockwerk im Stadtgebiet am Kapellenberg durch eine Hochlage permokarboner Vulkanite durchragt wird. Hier besteht die Möglichkeit der direkten Anbindung einer seismologischen Station an den Festgesteinsuntergrund.

Mit der Einrichtung der Station Muldenstein (MUHB, bei Bitterfeld-Wolfen) wurde bereits 2015 ein Beitrag geleistet, den Überwachungsring um das Mitteldeutsche Bebengebiet im Norden zu schließen (SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE 2019). Trotzdem ergab sich die Notwendigkeit, eine weitere Station näher im Gebiet Halle-Leipzig zu platzieren. Damit soll die Empfindlichkeit des Überwachungsnetzes dort so weit erhöht werden, dass auch schwache Erdbeben mit Magnituden um 0 registriert werden können. Deren Auswertung kann Informationen zu den tektonischen Voraussetzungen und den Auslösemechanismen liefern und so einen Beitrag zur Abschätzung der Erdbebengefährdung in diesem dicht besiedelten Gebiet leisten.

Von der Stadt Landsberg wurde ein Standort im Archivbunker angeboten. Dabei handelt es sich um eine Bunkeranlage, die von Norden her rund 20 m weit in den Porphyry des Kapellenberges getrieben wurde (Abb. 3.2-1) und die mehrere Räume enthält. Angelegt worden ist der Hohlraum für diese Bunkeranlage bereits zur Nazizeit. Mit dem beginnenden Kalten Krieg erfolgte in den Jahren 1957/58 der Ausbau zu einer militärischen Führungsstelle. Sie wurde anfangs von der Zivilverteidigung und später von der Bezirksdirektion der Volkspolizei genutzt. Seit Anfang der 1990er Jahre lagert die Stadt Landsberg ihr historisches Archiv dort.

Neben der direkten Anbindung an das Festgestein bietet der Standort zudem den Vorteil einer guten infrastrukturellen Erschließung (Stadtgebiet); ein Stromanschluss steht zur Verfügung. Trotz der zentralen Lage verlaufen die Hauptverkehrsstraßen in einiger Entfernung.

Das Seismometer steht in einer in den Fels gehauenen und ausgemauerten Nische an der am weitesten vom Eingang entfernten Stelle (Abb. 3.2-2). Dort ist es fast 20 m tief im



Abb. 3.2-1: Verwinkelter Eingang zur Bunkeranlage am Kapellenberg in Landsberg. Die Gänge erstrecken sich rund 20 m weit in den Felsen hinein.

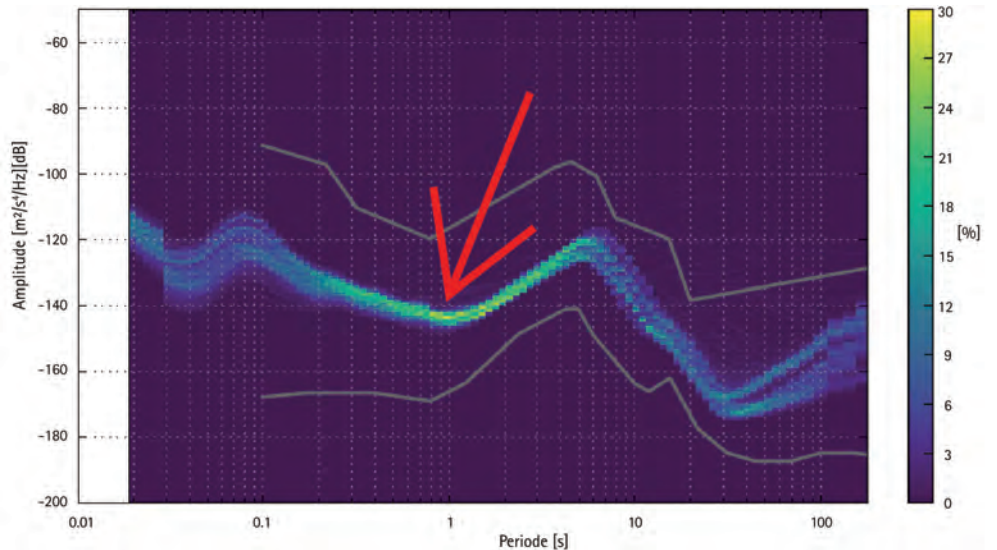
Felsen verborgen. Direkt am Seismometer wird der erste Teil der Stationstechnik durch mehrere Anschlussbaugruppen ergänzt: Ein 12-V-Bleiakku (unter dem Stuhl) sichert mit einem Steckernetzteil (rechts neben dem Stuhl in der 230-V-Steckdosenleiste) und einem Überspannungsschutz in der 230-V-Zuleitung (Wandsteckdose rechts unterhalb der Wandnische) die Betriebsspannung der Messtechnik. In der Wandsteckdose steckt außerdem ein kleiner Stromzähler. Auf dem Stuhl sind in der Mitte die Anschlusseinheit (dunkelgrau) des Seismometers, eine 12-V-Anschlussbox (hellgrau, hinten) sowie ein Steckeradapter (hellgrau, vorn) für das analoge Sensorkabel (hellgrau, links unten im Bild) vom Seismometer zur Datenerfassung zu sehen. Der Bleiakku überbrückt kleinere Unterbrechungen im 230-V-Netz und dient damit einem unterbrechungsfreien Betrieb der Erdbebenstation.



Abb. 3.2-2: Seismometer und Anschlussbaugruppen im Archivbunker der Stadt Landsberg. Das Seismometer ist ca. 20 m tief im Felsen aufgestellt.

Der zweite Teil der Stationstechnik umfasst etwa auf halber Strecke zwischen Eingang und Seismometer den Digitalisierer und die Datenerfassung, die ebenfalls mit einer Kombination aus Ladegerät und Bleiakku mit 12 V Betriebsspannung versorgt werden. Die Datenerfassung übernimmt dabei ein Mini-Computer, der die digitalen Seismogramme vom Digitalisierer entgegennimmt, für ca. 2 Monate zwischenspeichert und für den kontinuierlichen Online-Abwurf aus Leipzig bereitstellt.

Abb. 3.2-3: Bodenunruhe in Landsberg an kontinuierlichen Seismogrammen über 2 Wochen im Dezember 2018 bestimmt. In blau über grün bis gelb (senkrechte Farbskala rechts) ist die Bodenunruhe als Leistungsdichtespektrum dargestellt: quadrierte Amplitude der Bodenbeschleunigung in Abhängigkeit von der Periode der Bodenbewegung. Die Periode reicht dabei in logarithmischer Darstellung von 0,02 s = 50 Hz am linken Bildrand bis 120 s = 0,008 Hz rechts. Die mehr oder weniger parallelen grauen Linien zeigen zum Vergleich das weltweit geringste beobachtete Rauschen (unten) sowie vergleichsweise starkes Rauschen (oben). Das markante Maximum bei 4...5 s = 0,2...0,25 Hz wird als Meereswellenmikroseimik bezeichnet; diese resultiert in Mitteleuropa aus Meereswellen im nördlichen Atlantik und ist bis nach Mitteldeutschland deutlich erkennbar. Der für kleine Lokalbeben wichtigste Periodenbereich liegt unterhalb der Meereswellenmikroseimik etwa bei 0,1...1 s (= 1...10 Hz). Hier liegt ein flaches Minimum des Rauschens bei 1 s (Pfeil). In LANDS fällt dieses Minimum sogar etwas geringer als an den Nachbarstationen aus. Andererseits ist bei 0,1 s (10 Hz) das Rauschen in LANDS etwas stärker als an den Vergleichsstationen.



Der dritte Teil der Stationstechnik befindet sich im Eingangsbereich des Bunkers: Der Mobilfunk-Router ist zur Datenerfassung per Netzwerkkabel und mit der Mobilfunkantenne im Freien verbunden. Die Datenübertragung erfolgt über LTE-Mobilfunk. Die dazu notwendige Antenne und die GPS-Antenne für das Zeitsignal befinden sich im Eingangsbereich des Bunkers.

Ausstattung

Seismometer:	Guralp CMG-3 ESP
Eigenperiode:	30 s
Digitalisierer:	Quanterra Q730
Abtastraten:	100 Hz, 20 Hz, 1 Hz

Erste Testmessungen am Standort erfolgten ab dem Jahr 2018. Die Analyse der Bodenunruhe ergab, dass der Archivbunker als Standort zur Beobachtung kleiner lokaler Erdbeben gut geeignet ist. Diese Einschätzung resultierte aus dem Vergleich mit benachbarten Erdbebenstationen sowohl anhand von Beispielbeben als auch nach Auswertung des Hintergrundrauschens (Abb. 3.2-3). Es wurde eingeschätzt, dass es im gesamten Großraum Halle/Leipzig unwahrscheinlich ist, deutlich bessere Standorte zu finden (dichte Besiedlung, Bodenunruhe durch Industrie und Verkehr, wenig Standorte mit direktem Felsuntergrund). Deshalb wurde die Station endgültig instrumentiert und ist seit 2019 regulär im Betrieb.

Literatur

SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE [HRSG.] (2019): Erdbebenbeobachtung in Mitteldeutschland. Dreijahresbericht 2016-2018.— 66 S.; Dresden.

3.3 Zur Entwicklung des Thüringer Seismologischen Netzes (TSN) im Zeitraum 2019 - 2021

ULRICH WEGLER, DIRK SCHÖNWALD & INA PUSTAL

3.3.1 Aufgaben des Thüringer Seismologischen Netzes

Das Thüringer Seismologische Netz (TSN) dient der Überwachung der Erdbebenaktivität in Thüringen und angrenzenden Ländern. Im Falle spürbarer Erschütterungen oder akustischer Wahrnehmungen (Knall, Grollen), die von einem Erdbeben hervorgerufen werden, ist eine schnelle Information der Anwohner zur Ursache wichtig. Bei Schadensereignissen steht die sofortige Benachrichtigung der zuständigen staatlichen Stellen und der Bevölkerung im Vordergrund. Erdbeben und direkte Erdbebenschäden durch die Erschütterungen können so zwar nicht verhindert werden, aber durch schnelle und koordinierte Katastrophenhilfe nach dem Erdbeben können die weiteren Folgen abgemildert werden, beispielsweise durch das Löschen von Bränden und durch einen schnellen Wiederaufbau kritischer Infrastruktur (z. B. Kommunikation, Strom, Transport und Wasserversorgung).

Die langfristige Dokumentation der starken aber auch der kleineren, nicht spürbareren Erdbeben ist ebenfalls eine wich-

tige Aufgabe des TSN. Die Häufigkeit dieser Mikroseismizität steht im Zusammenhang mit der Wahrscheinlichkeit des Auftretens größerer Erdbeben und wird bei der seismischen Gefährdungsanalyse verwendet.

Das Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz (TLUBN) befasst sich unter anderem mit der kontinuierlichen Überwachung der Umwelt in Thüringen, mit ihrer Dokumentation sowie mit der Information der Öffentlichkeit. Ein Thema des TLUBN ist daher im Rahmen der Georisikobewertung des Freistaates Thüringen auch die Erdbebenüberwachung. Die Friedrich-Schiller-Universität Jena (FSU) hat eine über 100-jährige Tradition in der seismologischen Forschung und im Betrieb seismologischer Observatorien vorzuweisen. Daher kooperieren diese beiden Einrichtungen im Bereich des seismologischen Monitorings in Thüringen und betreiben gemeinsam das TSN.

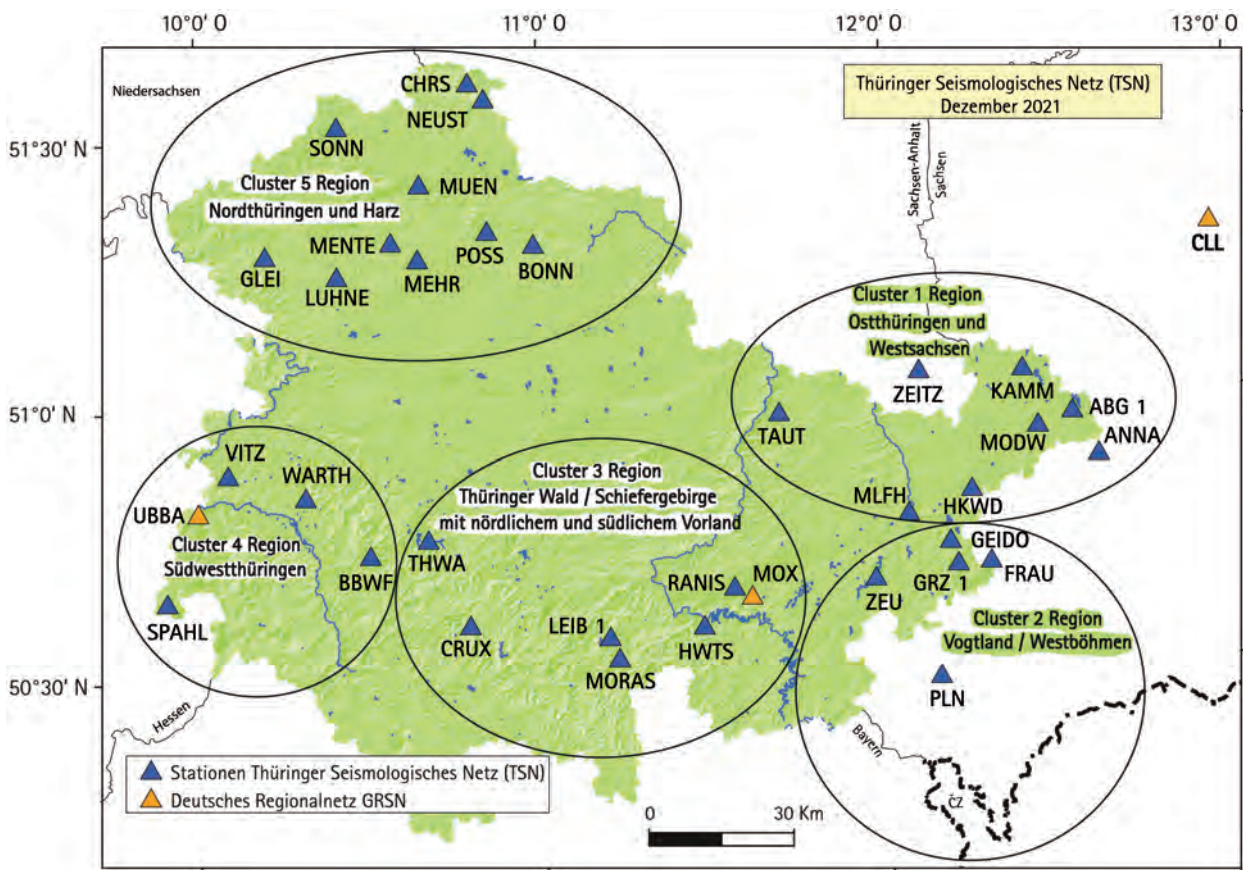


Abb. 3.3-1: Standorte der Messstation des TSN (blaue Dreiecke) zum 31.12.2021. Entsprechend der seismischen Aktivität wurde Thüringen in fünf Mess-Cluster aufgeteilt.

3.3.2 Funktionsweise des Thüringer seismologischen Netzes

Die Erdbebenüberwachung lässt sich in zwei Schritte unterteilen. Hierbei geht es im ersten Schritt um die Aufzeichnung von Seismogrammen an verschiedenen seismologischen Messstellen, die über ganz Thüringen verteilt sind. Die Daten werden per Mobilfunk übertragen und zusammengeführt. In einem

zweiten Schritt müssen nun in den kontinuierlichen Seismogrammen Erdbebensignale detektiert werden und, wenn eine Detektion vorliegt, muss eine Erdbebenalarmierungsmeldung per E-Mail und SMS verschickt werden.

3.3.2.1 Aufzeichnung von Seismogrammen („Wellenformdaten“)

Die Aufzeichnung von Seismogrammen erfolgt an verschiedenen über ganz Thüringen verteilten Messstellen (Abb. 3.3-1). Am Ende des Berichtszeitraums, dem 31.12.2021, betrug die Anzahl der Messstellen im TSN 33. Hierbei richtet sich die Anzahl der Messstellen einer Region nach der dokumentierten Seismizität der Vergangenheit: In bekannten Erdbebenzonen werden mehr Messstationen betrieben als in Regionen, die in der Vergangenheit wenig bis keine seismische Aktivität zeigten. Die technische Ausstattung jeder Messstelle beinhaltet ein Drei-Komponenten-Breitband-Seismometer unterschiedlicher Hersteller mit unterschiedlichen Übertragungscharakteristiken. (Langfristig soll das gesamte Netz möglichst einheitlich mit störungsunanfälligen Geräten ausgerüstet werden.) An jeder Messstelle umfasst der flache Bereich der frequenzabhängigen Übertragungsfunktion aber mindestens den Frequenzbereich von 0,05 Hz bis knapp unter 50 Hz. Die Seismometer wandeln die lokalen Bodenschwinggeschwindigkeiten entlang der drei senkrechten Achsen vertikal, Nord-Süd und Ost-West in drei zeitabhängige Spannungssignale. Diese werden an ein ebenfalls in jeder Messstelle vorhandenes automatisches Datenerfassungssystem inklusive Analog-Digital-Wandler weitergeleitet, das die Daten einschließlich eines hochgenauen Zeitstempels in eine computerlesbare Form umwandelt und als Dateien auf einem lokalen Datenträger zwischenspeichert. Hierbei wird auf allen drei Komponenten in Abhängigkeit von der Messstelle entweder eine Abtastrate von 100 oder von 200 Datenpunkten pro Sekunde eingesetzt. (Auch hier wird eine langfristige Vereinheitlichung auf 200 Hz angestrebt.)

Über einen Router mit digitaler Mobilfunkanbindung werden diese auch „Wellenformdaten“ genannten digitalen Messwerte kontinuierlich und in Echtzeit an das Datenzentrum der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) weitergeleitet. Je nach Hersteller des seismischen Datenerfassungssystems werden das allgemeinere SEEDLink-Protokoll (SEED = „Standard for the Exchange of Earthquake Data“) oder das proprietäre RefTek-Protokoll eingesetzt. Im Datenzentrum der BGR werden die RefTek-Daten ebenfalls in das miniSEED-Format gewandelt. Alle Wellenformdaten des TSN werden im miniSEED-Format in den BGR-Knoten des „European Integrated Data Archive (EIDA)“ eingespielt, dort dauerhaft archiviert und der interessierten Fachwelt zur Verfügung gestellt (STAMMLER et al. 2021). Dies dient einerseits der Beweissicherung und an-

dererseits können so die gewonnenen kontinuierlichen Seismogramme später zu wissenschaftlichen Studien weltweit über eine standardisierte Schnittstelle als Webservice abgerufen werden (<http://eida.bgr.de/fdsnws/dataselect/1/>). Die bereits lange zuvor bestehende Kooperation zwischen TLUBN, BGR und FSU wurde 2019 durch ein „Data Management Agreement“ auch formal abgesichert. Bei Verwendung der TSN-Daten durch andere können diese Nutzer die Daten nun über einen digitalen Objektbezeichner (DOI) referenzieren (<https://www.fdsn.org/networks/detail/TH>).

Neben der Archivierung werden die Daten auch in Echtzeit auf einem sogenannten „SEEDLink-Server“ zur Verfügung gestellt. Von dort gelangen die TSN-Daten an die Universität Leipzig, wo sie im gemeinsamen Wellenformarchiv der drei Länder Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen ein zweites Mal dauerhaft archiviert werden. Darüber hinaus werden die aufgezeichneten Seismogramme aller TSN-Messstationen innerhalb weniger Sekunden zur weiteren Auswertung an das Institut für Geowissenschaften der Universität Jena sowie an das Institut für Geophysik und Geologie der Universität Leipzig übertragen. Die Übertragung und Archivierung der Wellenformdaten erfolgen unabhängig davon, ob tatsächlich ein Erdbeben vorliegt. Wenn kein Erdbeben vorliegt, ist der Ausschlag im Seismogramm dennoch nicht Null, sondern es wird immer ein Hintergrundrauschen aufgezeichnet. Nun erfolgt sowohl in Jena als auch unabhängig davon in Leipzig der zweite Schritt, die Detektion von Erdbebensignalen in den kontinuierlichen Seismogrammen, wobei die Daten aller Messstationen gleichzeitig analysiert werden müssen und der Ausschlag durch das Erdbeben in mehreren Seismogrammen gleichzeitig das Rauschen übertreffen muss.

3.3.2.2 Erzeugung von Erdbebenmeldungen („Ereignisdaten“)

Durch die Standardisierung mittels SEED-Formats können Betreiber seismologischer Messstationen weltweit auf der Grundlage von SEEDLink-Servern ihre aufgezeichneten Seismogramme in nahezu Echtzeit austauschen. Einerseits stellen wir unsere TSN-Wellenformdaten mit Hilfe der BGR anderen Erdbebendiensten unter dem internationalen Netzwerkkürzel TH in Echtzeit zur Verfügung. Andererseits können wir selber auch die Wellenformdaten anderer Erdbebendienste verwenden. Hierbei greifen wir in Echtzeit auf eine Vielzahl nationaler und europäischer seismologischer Messnetze zu, um eine Verwechslung zwischen regionalen Erdbeben außerhalb Thüringens mit lokalen Erdbeben innerhalb Thüringens auszuschließen. Diese Verwechslungsgefahr besteht, da regionale Erdbeben und auch weltweite Erdbeben ebenfalls messbare Ausschläge in TSN-Seismogrammen verursachen können. Darüber hinaus sind die Messstationen benachbarter Erdbebendienste entscheidend, um eine genaue Ortung grenznaher Erdbeben zu gewährleisten, die mit Messstellen ausschließlich in Thüringen nicht erreicht werden könnte.

Vollständig automatisierte Computerprogramme, sogenannte „Detektoren“, analysieren die kontinuierlich einkommenden digitalen Wellenformdaten aller Messstationen rund um die Uhr, um Erdbebensignale zu entdecken. So können auch nachts oder am Wochenende automatisch Erdbebenalarmierungsmeldungen erzeugt werden. Die FSU Jena betreibt zwei automatische Erdbebedetektoren, die auf dem sogenannten „STA-LTA-Algorithmus“ beruhen, der die Standardmethode in der automatischen Erdbebedetektion darstellt. Hierbei wird die Open-Source-Software SeisComP eingesetzt, die am Deutschen GeoForschungsZentrum (GFZ) entwickelt wurde (HANKA et al. 2010). Diese offene Software wird durch kommerzielle Zusatzmodule der Firma Gempa GmbH ergänzt. Als Grundprinzip wird von jedem Seismogramm ein Mittelwert in einem kurzen Zeitfenster (STA = Short Term Average) durch den Mittelwert in einem langen Zeitfenster (LTA = Long Term Average) geteilt. Dieser STA-LTA-Quotient liegt nahe bei Eins, wenn sowohl das betrachtete kurze Zeitfenster als auch das lange Zeitfenster ähnlich starkes Rauschen enthalten. Trifft im kurzen Zeitfenster eine seismische Welle an dieser Messstation ein, steigt der Quotient an. Wird dabei ein vorher festgelegter Schwellenwert überschritten, speichert der Algorithmus die entsprechende Einsatzzeit für dieses Seismogramm. In einem zweiten Schritt prüft nun ein weiterer Algorithmus die gemeldeten Einsatzzeiten aller Stationen. Liegen an den Seismogrammen vieler Messstellen nahezu gleichzeitig Einsatzzeiten vor und sind die gemessenen Ankunftszeiten an vielen Messstellen konsistent mit einem Erdbeben an einem bestimmten Hypozentrum, wird eine Erdbebedetektion definiert. Anhand der Stärke der Ausschläge wird dann noch die Erdbebenmagnitude bestimmt. Diese Erdbebedetektion wird automatisch per E-Mail und SMS verschickt.

Neben den zwei STA-LTA-Detektoren betreibt die FSU Jena noch zwei weitere Detektionen, die auf einem anderen Prinzip beruhen (siehe VAN LAATEN et al. in diesem Band, Kap. 2.2). Bei diesen sogenannten „Kreuzkorrelationsdetektoren“ werden die Seismogramme verschiedener Mustererdbeben und Muster Sprengungen in einer Datenbank hinterlegt. Nun werden durch Berechnung des Kreuzkorrelationskoeffizienten die jeweils einkommenden Daten nacheinander mit allen hinterlegten Mustern verglichen. Sind die einkommenden Daten an vielen Stationen zu einem der Muster ähnlich, d. h. der Kreuzkorrelationskoeffizient liegt nahe bei 1, wird bei dieser Methode eine Erdbebedetektion erzeugt. Der Algorithmus wurde als Open-Source-Software ebenfalls als Zusatzmodul unter SeisComP implementiert (VASTERLING et al. 2017). Der Vorteil dieser Methode ist, dass die Detektionsschwelle gegenüber einem STA-LTA-Detektor um ca. eine Magnitude verringert werden kann. Die Nachteile sind, dass die Methode sehr rechenintensiv ist und dass nur Erdbeben detektiert werden können, die in der Nähe eines bereits hinterlegten Musters stattfinden. Aus diesen Gründen werden die Kreuzkorrelationsdetektoren bisher nur im Cluster 5, Region Nordthüringen und Harz (Abb. 3.3-1) eingesetzt, wo induzierte Erdbeben und Sprengungen an sich wiederholenden Orten stattfinden. In diesem Gebiet ist eine niedrige Detektionsschwelle wichtig, da die hier stattfindenden induzierten Erdbeben in geringer Tiefe liegen. Die geringe Herdtiefe führt dazu, dass bereits Erdbeben mit kleinen Magnituden spürbare Erschütterungen an der Erdoberfläche erzeugen.

Neben der automatischen Detektion wird innerhalb der Dienstzeiten eine „manuelle“ Auswertung vorgenommen, bei der eine Seismologin oder ein Seismologe die registrierten digitalen Seismogramme mit interaktiven Computerprogrammen analysiert. Hier wird die Open-Source-Software SeismicHandler eingesetzt, die an der BGR entwickelt wurde (STAMMLER 1993). Bei der interaktiven Methode wird die Auswertung in verschiedene Zwischenschritte unterteilt, wobei nach jedem Zwischenschritt eine Überprüfung und gegebenenfalls Korrektur durch einen Menschen erfolgt. Diese interaktiven Methoden sind derzeit den vollständig automatischen Methoden in der Genauigkeit noch weit überlegen. Die nachts oder am Wochenende automatisch erzeugten Detektionen werden so in der Dienstzeit bestätigt oder in seltenen Fällen verworfen sowie in der Genauigkeit der Hypozentrums- und Magnitudenbestimmung verbessert. Darüber hinaus werden auch neue Erdbebedetektionen kleiner Erdbeben erzeugt, die von den automatischen Detektoren nicht gefunden wurden. Die Kombination von schnellen aber etwas ungenaueren automatischen Erdbebenmeldungen mit zeitverzögerten aber hochgenauen interaktiv erstellten Erdbebenmeldungen entspricht dem derzeitigen Stand der Technik, wie er auch bei anderen Erdbebendiensten üblich ist.

Sowohl die vollständig automatisch als auch die interaktiv erstellten Erdbebenmeldungen werden als „Ereignisdaten“ bezeichnet. Im Gegensatz zur gewaltigen Datenmenge der Wellenformdaten bestehen die Ereignisdaten aus einer geringen Datenmenge, die leichter übertragbar und archivierbar ist. Die Ereignisdaten der genauen interaktiven Auswertung werden mit der Universität Leipzig abgestimmt und dauerhaft auf dem Kartendienst „Seismologie in Mitteldeutschland“ des TLUBN archiviert und veröffentlicht (<https://antares.thueringen.de/>

cadenza/). Dort liegen die wichtigsten Ereignisdaten wie z. B. die Herdzeit, die Koordinaten des Hypozentrums und die Magnitude des Erdbebens vor. Weitere Ereignisdaten, die eher für die Fachwelt interessant sind, wären z. B. die Ankunftszeiten spezieller seismischer Phasen an bestimmten Stationen. Solche für wissenschaftliche Fragestellungen wichtigen Anteile der Ereignisdaten werden derzeit an der FSU Jena in Form von „evt-Dateien“ gesichert, wobei es sich um ein proprietäres SeismicHandler-Format handelt.

3.3.3. Neue Messstellen des Thüringer seismologischen Netzes im Zeitraum 2019–2021

Im Berichtszeitraum 01.01.2019–31.12.2021 wurden im TSN neun neue Messstationen eingerichtet, wovon fünf (TH.MENTE, TH.LUHNE, TH.MUEN, TH.MEHR und TH.GLEI) auf den Cluster 5, Region Nordthüringen und Harz (Abb. 3.3-1) entfielen. Hierdurch konnte die seismische Überwachung mittels TSN-Stationen in diesem Gebiet signifikant verbessert

werden. Von den übrigen vier neuen Messstellen (TH.FRAU, TH.MORAS, TH.KAMM, TH.WARTH) wurde jeweils eine neue Station in einer der vier weiteren Regionen aus Abb. 3.3-1 installiert.

3.3.3.1 Neue Messstelle TH.MORAS

Die Station mit dem internationalen TSN-Netzwerk Kürzel „TH“ und dem internationalen Stationskürzel „MORAS“ wurde am 31.05.2019 im Schaubergwerk Morassina aufgebaut (Abb. 3.3-2) und liegt im Ortsteil Schmiedefeld der Kreisstadt Saalfeld/Saale im Landkreis Saalfeld-Rudolstadt. Sie gehört damit zum Cluster 3, Region Thüringer Wald/Schiefergebirge mit nördlichem und südlichem Vorland in Abb. 3.3-1. Die Station befindet sich unter Tage und zeichnet sich aus diesem

Grund durch ein besonders geringes Rauschniveau aus. Beim installierten Seismometer handelt es sich um ein 3-Komponenten-Breitbandseismometer vom Typ Güralp CMG-3ESPC mit einer Eckperiode von 60 s. Zur Messwerterfassung wird ein Datenlogger vom Typ Reftek RT130 S der Firma Reftek Systems Inc. eingesetzt. Hierbei registrieren wir von jeder der drei Komponenten 100 Datenpunkte pro Sekunde.



Abb. 3.3-2: Seismometer unter Tage im Schaubergwerk Morassina (Foto: D. Schönwald).

3.3.3.2 Neue Messstelle TH.MENTE

Die Messstation mit dem internationalen Stationskürzel MENTE (Abb. 3.3-3) wurde am 05.06.2019 in Menteroda aufgebaut. Menteroda ist eine Gemeinde im Unstrut-Hainich-Kreis, womit dieser Standort zum Cluster 5, Region Nordthüringen und Harz gehört (Abb. 3.3-1). Die Datenaufzeichnung erfolgt mit einem 3-Komponenten-Breitbandseismometer

vom Typ Trillium Compact Posthole mit einer Eckfrequenz von 20 s der Firma Nanometrics. Als Datenerfassungssystem wird ein Datenlogger des Typs Centaur ebenfalls von der Firma Nanometrics eingesetzt, wobei wir pro Komponente mit 200 Datenpunkten pro Sekunde aufzeichnen.



Abb. 3.3-3: Blick von oben in die Aluminiumkiste mit der Stationstechnik: Datenlogger und Router an der Station MENTE (Foto: D. Schönwald).

3.3.3.3 Neue Messstelle TH.LUHNE

Die ebenfalls zum Cluster 5, Region Nordthüringen und Harz, gehörende Messstelle LUHNE ist seit 27. 08. 2019 in Betrieb. Sie liegt am Hochwasserrückhaltebecken Luhne-Lengefeld, östlich des Ortsteils Lengefeld der Gemeinde Anrode im Unstrut-Hainich-Kreis. Technisch ist die Messstelle mit einem Seismome-

ter des Typs Trillium Compact Posthole mit einer Eckfrequenz von 20 s und einem Datenlogger des Typs Centaur der Firma Nanometrics ausgestattet. Die Abtastfrequenz liegt an dieser Messstelle ebenfalls bei 200 Datenpunkten pro Sekunde.

3.3.3.4 Neue Messstelle TH.MUEN

Die Messstation MUEN befindet sich in einem Nebengebäude des Klosters Münchenlohra (Abb. 3.3-4), im Ortsteil Münchenlohra der Gemeinde Großlohra. Diese gehört zum Landkreis Nordhausen, so dass diese Messstelle ebenfalls dem Cluster 5, Region Nordthüringen und Harz, aus Abb. 3.3-1 zuzuord-

nen ist. Die Messstelle ist seit dem 19. 02. 2020 in Betrieb und ebenfalls mit einem Seismometer des Typs Trillium Compact Posthole (20 s) und einem Datenlogger des Typs Centaur von Nanometrics ausgestattet, der mit einer Abtastfrequenz von 200 Hz aufzeichnet.



Abb. 3.3-4: Nebengebäude des Klosters Münchenlohra, in dem die Messstelle MUEN untergebracht ist (Foto: D. Schönwald).

3.3.3.5 Neue Messstelle TH.FRAU



Die Messstation FRAU befindet sich in der Gemeinde Fraureuth im sächsischen Landkreis Zwickau. Der Trinkwasserhochbehälter (Abb. 3.3-5) liegt ca. 1200 m von der Thüringischen Grenze entfernt und nahe dem nördlichsten bekannten Schwarm-erdbebengebiet bei Werdau. Die Station FRAU ist damit dem Cluster 2, Region Vogtland/Westböhmen, zuzuordnen. Die Inbetriebnahme erfolgte am 10. 11. 2020. Als Messgeräte werden hier ein Trillium Compact Vault mit einer Eckfrequenz von 120 s und ein Centaur eingesetzt, wobei die Abtastrate 200 Hz beträgt.

Abb. 3.3-5: Trinkwasserhochbehälter nahe Fraureuth, in dem die seismologische Messstelle FRAU installiert ist (Foto: U. Wegler).

3.3.3.6 Neue Messstelle TH.MEHR

Die am 12. 11. 2020 in Betrieb genommene Messstelle MEHR befindet sich ebenfalls als Nebennutzung in einem Hochwasserbehälter. Dieser liegt nördlich von Mehrstedt, einem Ortsteil der Stadt und Landgemeinde Nottetal-Heilingen Höhen im Unstrut-Hainich-Kreis. Die seismologische Messstation MEHR

wurde daher dem Cluster 5, Region Nordthüringen und Harz, aus Abb. 3.3-1 zugeordnet. Als Messinstrumente setzen wir hier ein Trillium-Compact-120-s und einen Centaur mit 200-Hz-Abtastung ein.

3.3.3.7 Neue Messstelle TH.KAMM

Die Messstation KAMM ist in einem Nebengebäude des Forsthauses Kammerfost untergebracht (Abb. 3.3-6). Dieses liegt nahe dem Ortsteil Plottendorf der Gemeinde Treben im Landkreis Altenburger Land (Cluster 1, Region Ostthüringen und Westsachsen in Abb. 3.3-1). Die Station liefert seit dem

02.07.2021 Daten. Technisch ist die Messstelle mit einem Seismometer des Typs Guralp CMG-3ESPC mit einer Eckperiode von 60 s und einem Datenlogger vom Typ Reftek RT130 S ausgestattet, der mit 100 Datenpunkten pro Sekunde digitalisiert.



Abb. 3.3-6: Nebengebäude des Forsthauses Kammerfost, in dem die Messstelle KAMM untergebracht ist (Foto: D. Schönwald).

3.3.3.8 Neue Messstelle TH.WARTH

Seit dem 26. 10. 2021 ist die neue Station WARTH in Betrieb. Dieser Messpunkt liegt östlich des Naturschutzgebietes Alte Warth, in der Gemeinde Bad Liebenstein im Wartburgkreis. Der Standort gehört damit zum Cluster 4, Region Südwestthüringen. In dieser Messstelle setzen wir ein Seismometer des

Typs Trillium Compact 120 s und einen Datenlogger des Typs Centaur ein, der mit 200 Hz betrieben wird. Die Besonderheit an diesem Standort ist, dass hier kein Stromanschluss vorliegt. Die Messstelle wird daher mittels Photovoltaik in Kombination mit einer Brennstoffzelle autark mit Strom versorgt.

3.3.3.9 Neue Messstelle TH.GLEI

Die letzte Station des TSN innerhalb des Berichtszeitraum wurde am 02. 12. 2021 aufgebaut. Diese Messstelle mit dem Stationskürzel GLEI befindet sich in einem Gebäude der Burg Gleichenstein (Abb. 3.3-7) in der Gemeinde Wachstedt im Landkreis Eichsfeld. Diese Station gehört damit zum Cluster 5,

Region Nordthüringen und Harz. Die technische Ausstattung besteht hier ebenfalls aus einem Trillium-Compact-120-s in Kombination mit einem Centaur bei einer Abtastrate von 200 Hz.



Abb. 3.3-7: Burg Gleichenstein. Hier befindet sich die TSN-Messstelle GLEI (Foto: D. Schönwald).

Literatur

HANKA, W.; SAUL, J.; WEBER, B.; BECKER, J.; HARJADI, P.; FAUZI & GITEWS SEISMOLOGY GROUP (2010): Real-time earthquake monitoring for tsunami warning in the Indian Ocean and beyond.— *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10: 2611–2622; <https://doi.org/10.5194/nhess-10-2611-2010>.

STAMMLER, K. (1993), Seismichandler – Programmable multichannel data handler for interactive and automatic processing of seismological analyses.— *Computers & Geosciences*, Vol. 19, Iss. 2: 135–140; ISSN 0098-3004; [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(93\)90110-Q](https://doi.org/10.1016/0098-3004(93)90110-Q).

STAMMLER, K.; BISCHOFF, M.; BRÜSTLE, A.; CERANNA, L.; DONNER, S.; FISCHER, K.; GAEBLER, P.; FRIEDERICH, W.; FUNKE, S.; HARTMANN, G.; HOMUTH, B.; KNAPMEYER-ENDRUN, B.; KORN, M.; MEGIES, T.; PILGER, C.; PLENEFISCH, T.; PUSTAL, I.; RAPPSILBER, I.; SCHMIDT, B.; SONNABEND, L.; STANGE, S.; WASSERMANN, J. & WEGLER, U. (2021): German Seismic and In-

frasound Networks Contributing to the European Integrated Data Archive (EIDA).— *Seismological Research Letters*, 92 (3): 1854–1875; doi: <https://doi.org/10.1785/0220200401>.

VASTERLING, M., WEGLER, U., BECKER, J., BRÜSTLE, A. & BISCHOFF, M. (2017): Real-time envelope cross-correlation detector: application to induced seismicity in the Insheim and Landau deep geothermal reservoirs.— *J. Seismol.*, 21: 193–208; <https://doi.org/10.1007/s10950-016-9597-1>.

4 Seismologische Auswertung in Mitteldeutschland

4.1 Automatische Auswertung von Erdbeben

SIGWARD FUNKE

4.1.1 Automatik-Meldungen

Über die automatische Auswertung von Erdbeben und die schnelle Bereitstellung der Auswertergebnisse wurde bereits in den letzten Dreijahresberichten (SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE 2016, 2019) ausführlich berichtet. Seit Jahren kommt das Softwarepaket SeisComP (HELMHOLTZ-CENTRE GFZ & GEMPA GMBH 2008) zum Einsatz. Stärkere lokale Erdbeben ab Lokalmagnitude $M_L \geq 2,5$ werden weiterhin binnen weniger Minuten auf der gemeinsamen Internetseite der Mitteldeutschen Erdbebenbeobachtung

<http://antares.thuringen.de/cadenza/seismo>

veröffentlicht und per E-Mail an Abonnenten verteilt. Auf der Internetseite sind die Automatikmeldungen nur wenige Stunden bis Tage zu sehen; sobald für die betreffenden Ereignisse und Tage die manuelle Auswertung vorliegt, werden die Automatikmeldungen überschrieben.

In den drei Jahren 2019–2021 betraf das insgesamt 64 Meldungen, die sich auf mehrere Herdgebiete verteilen:

- ◆ Am häufigsten bebte es innerhalb der verschiedenen Schwärme um Luby und Nový Kostel in Nordwest-Böhmen wenige Kilometer jenseits der sächsischen Grenze. Allein in den 4 Tagen vom 10. bis zum 13. April 2021

wurden 21 Beben im Magnitudenbereich $M_L = 2,5 \dots 2,9$ erfasst und gemeldet.

- ◆ 3 Bergschläge aus dem Kyffhäuserkreis.
- ◆ 1 Steinbruchsprengung aus dem Kreis Burgenland.
- ◆ 3 Bergschläge aus Westpolen im Magnitudenbereich $M_L = 4,0 \dots 4,3$.

Im Abgleich zur routinemäßigen manuellen Auswertung ergeben sich mehrere Details:

- ◆ Von den genannten Schwarmbeben hat die Automatik nur 3 Beben nicht gefunden. Das betrifft den anspruchsvollen Fall, dass Beben innerhalb des Schwarms enger als 20 Sekunden aufeinander folgen; dann ist die Automatik derzeit „blind“ für das Erkennen separater Ereignisse.
- ◆ Die automatisch bestimmten Magnituden fallen meist etwas größer aus, besonders bei den kleineren Ereignissen.
- ◆ Es gab keine Fehllarmer und keine nennenswerten Fehlurteilungen.

4.1.2 Automatische Auswertung des Bebens bei Chemnitz vom 9. Mai 2020 mit $M_L = 1,8$

Das in Kap. 5.2 detailliert beschriebene Beben bei Chemnitz am 9. Mai 2020 zeigt, dass die automatischen Meldungen auch an der Spürbarkeitsgrenze und außerhalb des Schwarmbebengebietes zuverlässige Ergebnisse liefern. Die erste E-Mail wurde bereits 3 min nach dem Beben mit drei Grafiken verschickt. Mit einer Magnitude von 2,1 wurde das Beben zunächst etwas überschätzt, die manuelle Auswertung ergab später $M_L = 1,8$.

Abb. 4.1-1 zeigt das Epizentrum nordwestlich von Chemnitz und die 51 Stationen, die mit automatisch bestimmten Ein-

sätzen der Erdbebenwellen zu dieser automatischen Ortung beitrugen. Im linken Teil der Abb. 4.1-1 ist die automatisch generierte Epizentrenkarte zu sehen, wie sie als eine der drei Grafiken mit dem automatischen E-Mail-Versand verschickt wird. Die große Karte der Abb. 4.1-1 zeigt dieselbe Situation nachträglich kartografisch aufbereitet. Die herdnächste Station Meinersdorf MEINS ist knapp 20 km entfernt; der Abstand zu den fernsten Stationen Hohe Rhön HROE, Vitzeroda VITZ, Flechtingen FLT1, Kašperské Hory KHC und Clausthal-Zellerfeld CLZ beträgt etwa 200 km.

Abb. 4.1-2 zeigt die 7 herdnächsten Seismogramme mit den automatisch bestimmten Einsätzen der P-Welle (roter Punkt) bzw. der S-Welle (blauer Punkt). Diese Seismogrammmontage erlaubt eine erste Qualitätskontrolle und zeigt, dass die Einsätze glaubwürdig bestimmt wurden. Dass die Seismogramme knapp 3 min nach den ersten Einsätzen abbrechen, ist beim E-Mail-Versand bereits etwa 3 min nach Herdzeit zwangsläufig und eher ein Gütezeichen als ein Nachteil. In den gewählten Darstellungsmaßstäben (die Maxima der einzelnen Seismogramme füllen jeweils den für ein Seismogramm reservierten Streifen) fallen die Seismogramme vor den ersten Einsätzen als sehr dünne Linie aus. Das illustriert das sehr gute Signal-Rausch-Verhältnis aller dargestellten Stationen: Die Amplituden der einzelnen Einsätze heben sich um ein Vielfaches aus dem Rauschen heraus; damit steigen die Chancen auf korrekte automatische Auswertungen.

dass es sich um ein tektonisches Erdbeben handelt. Bei Steinbruchsprengungen oder anderweitig induzierten Ereignissen wäre das Maximum im spektralen Gehalt eher um $1\text{ s} = 1\text{ Hz}$ zu erwarten. Derartige Spektren werden automatisch bestimmt und versendet um den Signalgehalt der Seismogramme zu illustrieren. Dargestellt sind quadrierte Amplituden der Schwingbeschleunigung in Abhängigkeit von der Frequenz der Schwingungen. Die etwas gewöhnungsbedürftige Darstellung der „quadrierten Amplituden“ bietet den Vorteil, dass zwischen negativen und positiven Ausschlägen des Seismogramms nicht mehr unterschieden wird. Um die große Spanne der darzustellen Werte zu berücksichtigen werden beide Skalen logarithmisch dargestellt: zwischen jedem beschrifteten Skalenwert (Dekade) liegt der Faktor 10, die Unterteilungen der einzelnen Dekaden weisen dann sehr unterschiedliche Abstände auf.

Abb. 4.1-3 zeigt das Spektrum des vertikalen Seismogramms der herdnächsten Station Meinersdorf MEINS und bestätigt,

Im dargestellten Spektrum liegen die kleinsten Amplituden etwa bei Frequenzen zwischen 0,2 und 1 Hz; von 1 bis etwa

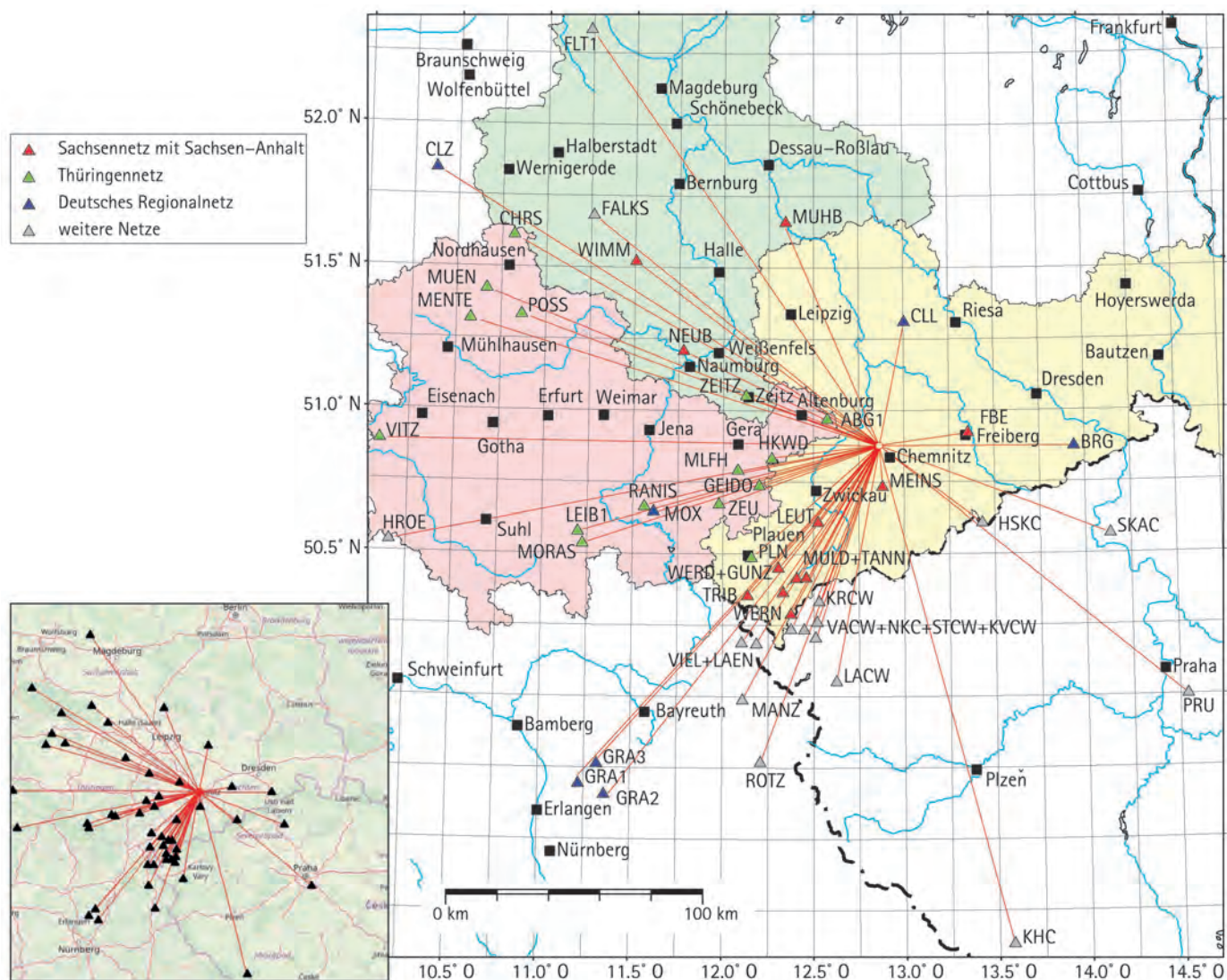


Abb. 4.1-1: Links: Automatisch generierte Epizentrenkarte des Bebens bei Chemnitz am 9. Mai 2020 (roter Kreis: Epizentrum; schwarze Dreiecke: 51 Erdbebenstationen, die zum automatischen Ortungsergebnis beitrugen; rote Linien: Laufwege der Erdbebenwellen zu den beteiligten Stationen entsprechend dem Ortungsergebnis). Diese Grafik wurde 3 min nach dem Beben als automatisches Ortungsergebnis per E-Mail verschickt. Rechts: Kartographisch aufbereitete Version zur besseren Orientierung.

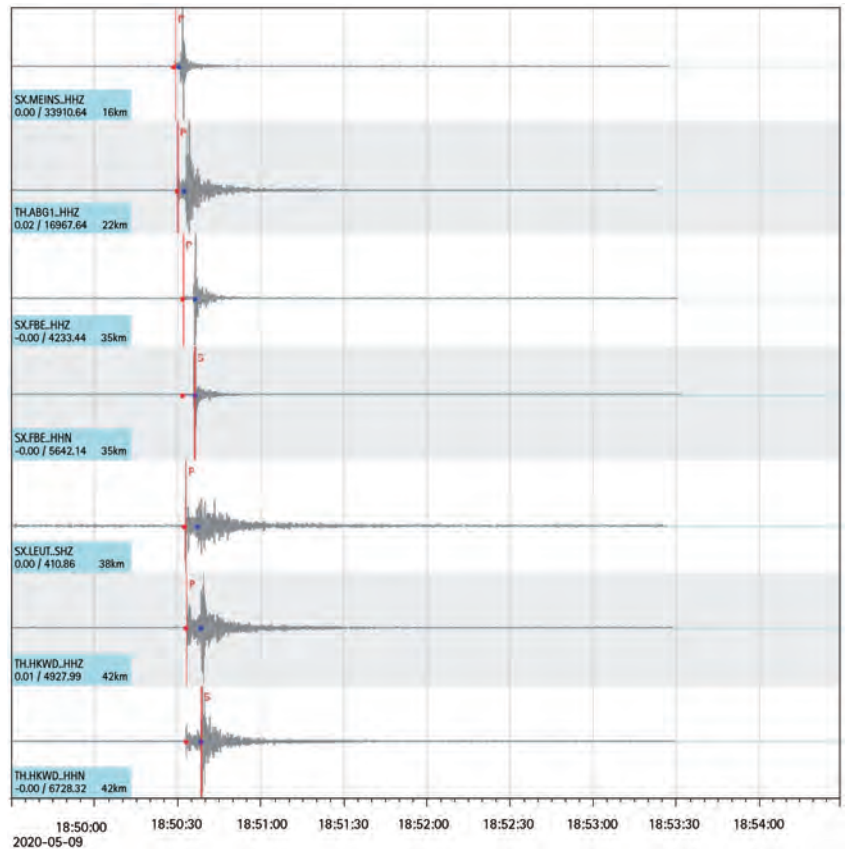


Abb. 4.1-2: Automatisch generierte Seismogramme der 7 herdnächsten Stationen, die nach dem Beben bei Chemnitz ebenfalls per E-Mail versandt wurden: Länge der Zeitskala: 5 min; automatisch bestimmte Einsatzzeit: senkrechter roter Strich; automatisch bestimmter Wellentyp: P- bzw. S-Welle, rote Beschriftung oben links an den Einsatzmarken, farbiger Punkt auf der Mittellinie der Seismogramme (P-Einsatz: rot; S-Einsatz: blau).

7 Hz nehmen die Amplituden um fast 2 Dekaden zu; von 7 bis 40 Hz bilden die Amplituden ein Plateau. Dieses Plateau bei hohen Frequenzen ist ein deutlicher Hinweis darauf, dass es sich um ein tektonisches Beben handelt. Steinbruchsprennungen oder andere induzierte Ereignisse bieten meistens ein deutliches Frequenzmaximum im Bereich zwischen 1 und 10 Hz; im Bereich zwischen 10 und 40 Hz sind dann deutlich geringere Amplituden zu erwarten.

Der markante Abfall oberhalb von 40 Hz ist hingegen messtechnisch bedingt: Dieses Seismogramm wird (wie die meisten im Sachsenetz) mit einer Abtastrate von 100 Hz aufgezeichnet (100 Messwerte je Sekunde). Daraus folgt, dass Signale nur bis knapp unter 50 Hz korrekt wiedergegeben werden können.

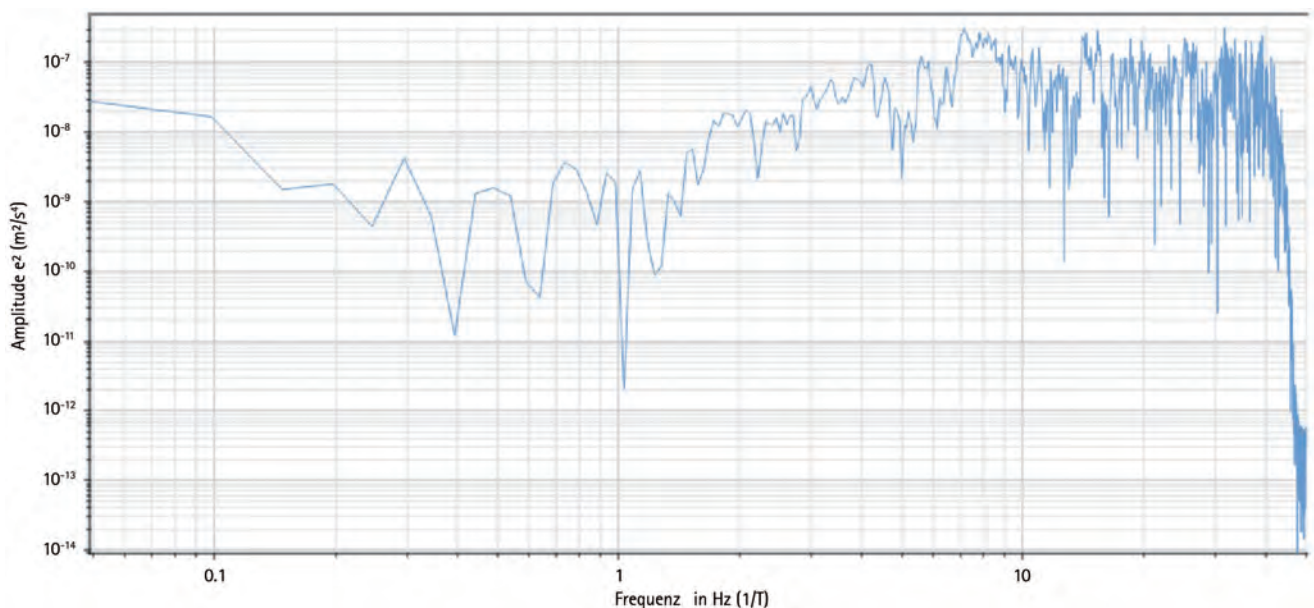


Abb. 4.1-3: Spektrum des vertikalen Seismogramms (Datenstrom HHZ) der herdnächsten Station Meinersdorf MEINS. Details zur doppeltlogarithmischen Darstellung im Text. Das betrachtete Seismogrammfenster beginnt ca. 1,5 s nach der Herdzeit und ist 15 s lang. Die Maßeinheit der quadrierten Amplitude beträgt $(\text{m/s}^2) \cdot (\text{m/s}^2) = (\text{m}^2/\text{s}^4)$. Die Frequenzskala reicht von 0,05 Hz bis 50 Hz, also genau über 3 Dekaden. Die Angabe „1/T“ weist darauf hin, dass die Periode T in Sekunden den Kehrwert der Frequenz darstellt. Es ergibt sich folgende Gegenüberstellung: 0,05 Hz = 20 s; 0,1 Hz = 10 s; 1 Hz = 1 s; 10 Hz = 0,1 s; 50 Hz = 0,2 s.

4.1.2 Qualitätseinschätzung der automatischen Auswertung

Die Magnitudenbestimmung ist eines der denkbaren Kriterien um die Qualität der automatischen Ortungen mit den manuellen zu vergleichen, weil die Magnitude als wichtige Schwelle für automatische Meldungen dient; grobe Magnitudenfehler würden grobe Fehlalarme verursachen.

Im Berichtszeitraum 2019 bis 2021 fiel die Seismizität spürbar geringer aus als im vorhergehenden Abschnitt 2016 bis 2018 (SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE 2019). Der dort entwickelte Vergleich der Magnituden der SeisComP3-Automatik mit denen der manuellen „Collm“-Auswertung wird auf mehrere kleinere Schwärme der Jahre 2020 und 2021 angewendet. Abb. 4.1-4 greift zunächst auf die Abb. 3.3-3 von 2016 bis 2018 (SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE 2019) zurück. Die damaligen Daten decken Collm-Magnituden M_{CLL} von 2,0 bis 3,8 von 207 Schwarmbeben ab (hellgraue Kreise). Aktuell ist die Datenlage deutlich schmäler; ab einer Collm-Magnituden M_{CLL} von 1,5 finden sich nur 57 Beben, die auf mehrere kleinere Schwärme um Luby und Nový Kostel in Nordwest-Böhmen wenige Kilometer jenseits der sächsischen Grenze von Dezember 2020 bis April 2021 verteilt sind. Das stärkste Beben erreichte eine Magnitude von 3,1. Diesen 57 größten Schwarmbeben der Jahre 2019 bis 2021 werden die vom SeisComP3-System automatisch bestimmten Magnituden gegenübergestellt und als grüne Kreise ins Diagramm eingetragen. Am unteren Bildrand sind Beben markiert, für die die SeisComP3-Magnituden aus dem Rahmen des Diagramms fallen (graue Dreiecke für den Abschnitt 2016 bis 2018) oder nicht vorhanden sind (rotes Dreieck für den Abschnitt 2019 bis 2021). Das Ergebnis zeigt, dass sich die zuletzt berichtete Zuverlässigkeit der Automatik-Meldungen fortgesetzt hat und weiter verbessert werden konnte:

- ◆ Trotz der deutlich kleineren Magnituden streuen die SC3-Magnituden der Schwärme 2020/21 (grün) etwas geringer um die Diagonale des Diagramms als die Magnituden von 2018 (grau).
- ◆ Der Anteil der Ausreißer-Magnituden (Dreiecke am unteren Diagrammrand) nimmt ab.
- ◆ Bei dem einen roten Dreieck handelt es sich um den leider absehbaren Fall, dass innerhalb eines Schwarmes Beben mit geringerem zeitlichen Abstand als 20 Sekunden

aufeinander folgen; in dieser Situation ist die Automatik gewissermaßen „blind“ für das spätere Beben.

- ◆ Weitere Fehlalarme wurden nicht beobachtet.

Diese Verbesserungen sind auf mehrere Ursachen zurückzuführen:

- ◆ Die Anzahl der auswertbaren Stationen hat über die Jahre weiter zugenommen.
- ◆ Dank der Zunahme an Stationen konnte die Mindestzahl an Stationen erhöht werden, die erforderlich ist um eine automatische Ortung zu veröffentlichen. Das wirkt sich direkt auf die Stabilität und Zuverlässigkeit der automatischen Ortungen aus, selbst wenn die hinzugekommenen Stationen eher entfernt vom Schwarmbebengebiet liegen.

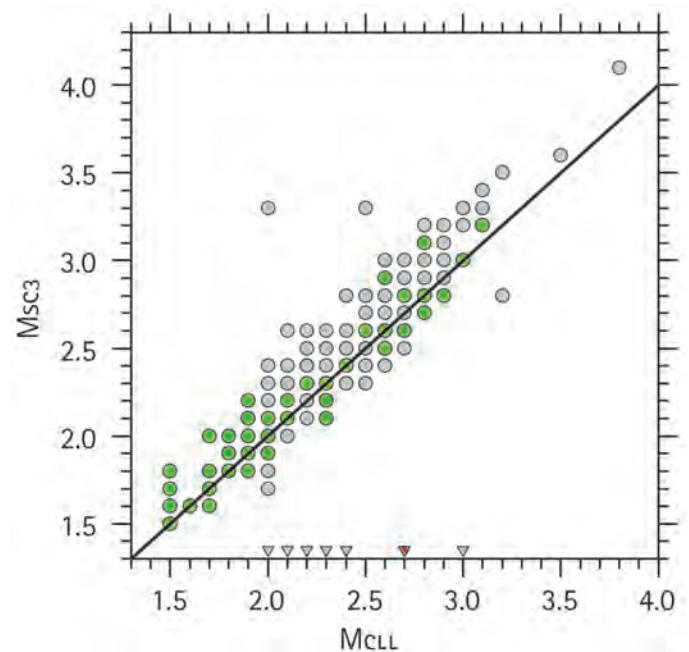


Abb. 4.1-4: Vergleich der manuell und automatisch bestimmten Lokalmagnituden: Erdbebenschwärme Dezember 2020 bis April 2021 (grüne Kreise), 57 Beben $1,5 \leq M_L \leq 3,1$; Erdbebenschwarm Mai/Juni 2018 (graue Kreise), 207 Beben $2,0 \leq M_L \leq 3,8$; automatisch (M_{SC3}) und manuell bestimmte (M_{CLL}) Magnitude; Dreiecke am unteren Bildrand: Verweis auf einzelne Beben mit zu kleiner oder fehlender automatisch bestimmter Magnitude (rot: 2020/21, grau: 2018); schwarze Diagonale: $M_{SC3} = M_{CLL}$.

Literatur

HELMHOLTZ-CENTRE POTSDAM – GFZ GERMAN RESEARCH CENTRE FOR GEOSCIENCES AND GEMPA GMBH (2008): The SeisComP seismological software package.— GFZ Data Services; doi: 10.5880/GFZ.2.4.2020.003.

SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE [HRSG.] (2016): Erdbebenbeobachtung in Mitteldeutschland. Dreijahresbericht 2013–2015.— 54 S.; Dresden.

SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE [HRSG.] (2019): Erdbebenbeobachtung in Mitteldeutschland. Dreijahresbericht 2016–2018.— 66 S.; Dresden.

4.2 Vergleich der automatischen und der manuellen Auswertung für lokale Erdbeben mit dem Thüringer Seismologischen Netz (TSN) im Jahr 2021

THOMAS BURGHARDT

4.2.1 Eigenschaften der automatischen Ortung mit einem Stationsnetz

Die automatisch erfassten Ereignisse werden nur durch ihre Amplitudengröße erkannt. Je dichter eine Erdbebenstation am Ursprungsort des seismischen Ereignisses ist, desto größer ist die Amplitude bei einer gegebenen Magnitude. Zeichnen mehrere Stationen dasselbe seismische Ereignis auf, so kann aufgrund der bekannten Ausbreitungsgeschwindigkeit seismischer Wellen auf den Herkunftsort der Wellen geschlossen werden. Diese Ortung wird mit einem Algorithmus rechnerisch durchgeführt. Das Thüringer Seismologische Netz (TSN) ortet aber nicht nur **lokale tektonische Erdbeben**, sondern auch ungewollt viele andere seismische Ereignisse. Dazu zählen **Steinbruchsprengungen** in Thüringen, Sachsen, Sachsen-Anhalt und in den angrenzenden anderen Bundesländern, wenn sie eine gewisse Größe der Magnitude besitzen. Daher ist es sinnvoll, nicht nur die Stationen in Mitteldeutschland zu verwenden, sondern auch mit Stationen in Hessen und Bayern zu ergänzen. So ist eine bessere Ortung auch für große entfernte Sprengungen möglich, die sonst zu nicht bestimmbar Ereignissen führen würden. In Polen gibt es ein großes Abbaugebiet von Kupfererz, in dem sehr große seismische Ereignisse bis zur Magnitude $M_L=4,5$ entstehen können. Im Balkangebiet, Griechenland, Italien und der Türkei gibt es häufig starke Erdbeben, die durch unsere mitteldeutschen Stationen gut erfasst werden. Auch hier ist es für deren ungefähre Ortung wichtig, dass wir auch die Aufzeichnungen von dortigen Stationen mit verwenden, um sie dort auch lokalisieren zu können.

4.2.2 Auswahl der Ereignisse für den Vergleich

Glücklicherweise sind die Gebiete der tektonischen Erdbeben in Mitteldeutschland ungefähr bekannt. Sie ziehen sich entlang eines Gebietes von Regensburg nach Leipzig, welches durch verschiedene nordwestlich verlaufende Störungen zusätzlich unterbrochen ist (SONNABEND 2019). Besonders häufig sind die Erdbebenschwärme in der Umgebung von Luby, Novy Kostel und Plauen, wo hunderte Erdbeben, hervorgerufen durch den Aufstieg von Gasen und Flüssigkeiten, über mehrere Tage auftreten können. In diesem Gebiet treten sonst auch ständig kleine Erdbeben auf. Unsere Überwachung in Thüringen ist außerdem auf den Kalibergbau im Südharz-Gebiet bei Sondershausen, Bleicherode und auf das Kali-Werra-Gebiet bei Unterbreizbach konzentriert. Dort kommt es infolge des Kalisalzabbaus zur sogenannten induzierten Seismizität, die unter Umständen auch von der Bevölkerung verspürt wird und deshalb auch beobachtet werden muss.

Anderenfalls passieren leicht Fehlortungen, die unter Umständen diese Ereignisse in unsere Nähe verlegen könnten.

Aber noch ein anderer Umstand ist bei der automatischen Erfassung von seismischen Ereignissen wichtig. Ein seismisches Ereignis besteht aus zwei Welleneinsätzen, dem P- und dem S-Welleneinsatz, die aufeinander folgen. Ein menschlicher Auswerter kann diese Einsätze unabhängig voneinander genau erkennen und er ordnet jedem Einsatz den richtigen Wellentyp zu. Automatisch klappt dies nur bedingt, zum einen sind die Einsätze manchmal nicht so genau bestimmbar und zum anderen wird bei fehlendem ersten Einsatz der nachfolgende zweite als erster Einsatz gewertet, was einen großen Fehler bei der automatischen Ortung zur Folge hat. Hinzu kommt, dass die Einsatzzeitfestlegung an den verschiedenen entfernten Stationen ein zeitlich verzögerter Prozess ist. Die Ortung baut deshalb zumeist auf vorhergehende auf, die mitunter falsch sind und selbständig korrigiert werden müssen. Auch können Störungen als seismische Welleneinsätze gedeutet werden und der automatischen Ortung einen weiteren zufälligen Aspekt verleihen. Diese Erscheinung ist nicht häufig; sie kann aber zu beträchtlichen Unwägbarkeiten führen. Diese mitunter sporadischen Eigenschaften der automatischen Ortung besonders bei einer schnellen Erdbebenfolge, muss man mit berücksichtigen, um deren Ergebnisse richtig deuten zu können (BURGHARDT 2021).

In Abb. 4.2-1 sind die braun gekennzeichneten, automatisch gefundenen Ereignisse (a.Ereig) den manuell ermittelten Erdbeben in roter Farbe (m.Ereig) für den Juli 2021 gegenüber gestellt. Betrachtet werden nur die Ereignisse in den geografischen Gebieten, die als schwarze Rechtecke eingetragen sind. Das Gebiet „**Ostthüringen**“ als östliches großes schwarzes Rechteck entspricht etwa dem Teil des Leipzig-Regensburg-Störungssystems. Im dort eingeschlossenen kleinen beige eingefärbten Rechteck „**Vogtland**“, traten allein 58 der 59 lokalen Erdbeben von Ostthüringen im Juli 2021 auf. Im „**Südharzgebiet**“ (oberes nordwestliches Rechteck) gibt es die zurzeit häufigsten vom Kalibergbau induzierten Erdbeben. Das westliche Rechteck ist das „**Kali-Werra-Gebiet**“, wo auch induzierte Erdbeben auftreten können. Das südlichste dieser drei westlichen Rechtecke ist das Gebiet von „**Mellrichstadt**“; dort ereignen sich gelegentlich tektonische Erdbeben.

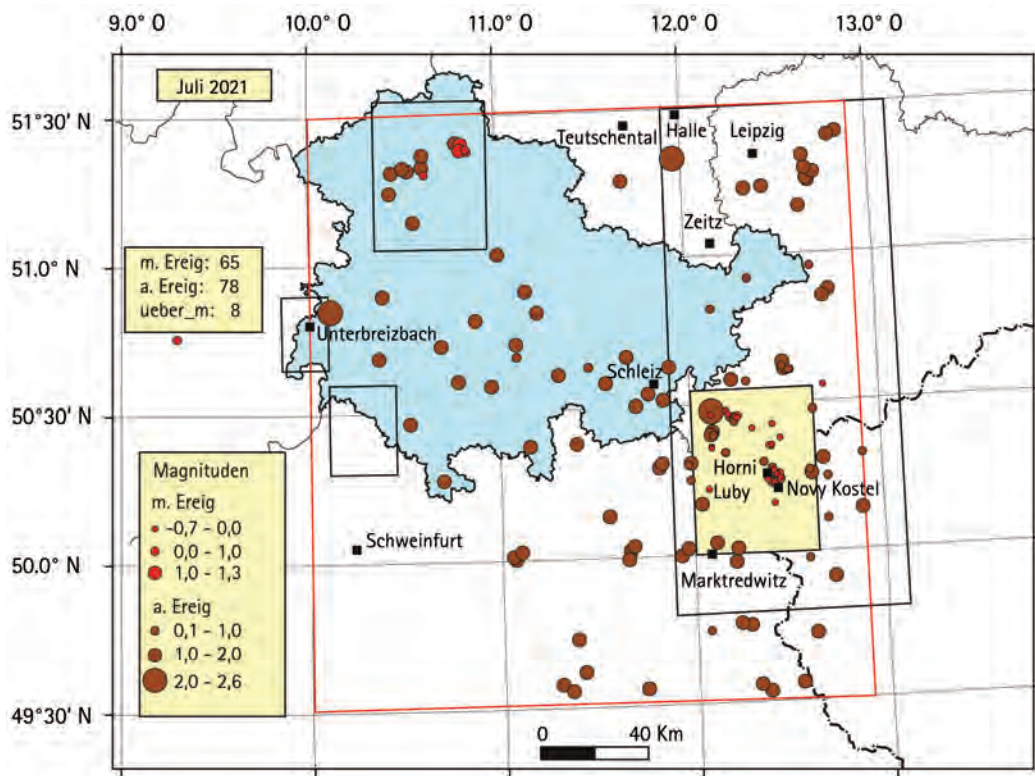


Abb. 4.2-1: Die schwarzen Rechtecke als „geografische Gebiete“ kennzeichnen die Herkunftsgebiete von tektonischen und induzierten Erdbeben (vgl. Text). Abkürzungen: m.Ereignis sind manuell gefundene Erdbeben, a.Ereignis sind automatisch detektierte Ereignisse, ueber_m: manuell und automatisch gefundene übereinstimmende Erdbeben. Der rote Rahmen grenzt das Arbeitsgebiet ab.

4.2.3 Welche Erscheinungen treten bei der automatischen Beobachtung auf?

Klassifiziert man die Anzahl der manuell ausgewerteten Beben bei Luby, Novy Kostel, Plauen und in den übrigen Bereichen des Leipzig–Regensburg–Störungssystems, so treten in Abhängigkeit von der Stärke der Erdbeben unterschiedliche Verhältnisse von manuell und automatisch erfassten Ereignissen auf. Das automatische System kann in der Regel nur die größeren Erdbeben ab Magnitude $> 0,0$ erfassen. Die überwiegende Mehrzahl der manuell gefundenen Erdbeben besitzt Magnituden $< 1,0$; größere sind außerhalb von Schwärmen nicht häufig. So sind die automatisch erfassten Ereignisse meist Sprengungen oder selten größere Erdbeben. Mit der Zunahme der Anzahl der Erdbeben in einem Zeitabschnitt gibt es auch mehr stärkere Erdbeben, die vom automatischen System zunehmend erfasst werden können.

Das Jahr 2021 war im ersten Halbjahr gekennzeichnet durch eine stärkere Seismizität, also durch das Auftreten von überdurchschnittlich vielen Erdbeben mit einem Höhepunkt als Schwarm vom 10. bis 16. April. Im zweiten Halbjahr traten weniger Erdbeben auf. Eine mögliche quantitative Beschreibung der Automatik wäre das Verhältnis von automatisch erfassten Ereignissen zu manuell ausgewerteten Erdbeben pro Monat. Man kann davon ausgehen, dass die Anzahl der Sprengungen pro Monat in den Rechteckgebieten im Mittel etwa bei 70 liegt. Etwa 10 % der automatisch erfassten Ereignisse sind stärkere Erdbeben, diese sind in den folgenden Abbildungen und in der Tabelle mit ‚ueber_m‘ bezeichnet. Das ‚m‘ soll auf die verwendete Einheit in manueller Magnitude hindeuten.

Das Verhältnis automatisch zu manuell registrierten Ereignissen definiert unterschiedliche Gruppen der auftretenden Seismizität. Im zweiten Halbjahr 2021 lag es in jedem Monat bei etwa 1, wobei die manuell erfassten Ereignisse weniger als 100 waren. Diese Ereignisse bilden eine **erste Gruppe**.

In den Monaten März und Juni 2021 sind es mehr als 100 und weniger als 150 manuell erfasste Erdbeben. Bei diesen beiden Monaten tritt ein Verhältnis automatisch zu manuell von etwa 0,7 auf. Das bedeutet, die Zahl der ausgewerteten Erdbeben wächst noch schneller als die Automatik sie erfassen kann. Diese Einteilung bestimmt die **zweite Gruppe**.

In den Monaten Januar, Februar und Mai gab es mehr als 150 und bis zu 300 manuell ausgewertete Erdbeben pro Monat; das Verhältnis sinkt auf etwa 0,5, d.h. die Anzahl der von der Automatik erfassten Erdbeben im Vergleich zur manuellen Auswertung sinkt weiter. Diese Monate gehören zur **dritten Gruppe**. Aber die Anzahl der automatisch erfassten Erdbeben wächst auf 27% aller Erdbeben an. Wenn es eine größere Zahl kleinerer Erdbeben ab Magnitude $\geq 0,5$ gibt, so gelingt es auch, einige mehr von ihnen automatisch zu erfassen.

Im Monat April 2021 trat vom 10.–16. ein Schwarm mit sehr vielen Ereignissen auf. Weder der menschliche Auswerter noch die Automatik konnten sie vollständig erfassen. Die Verhältnisberechnung wird sinnlos, da die zugrunde liegenden Zahlen weder manuell noch automatisch vollständig sind. Die manu-

elle Auswertung konzentriert sich auf die stärkeren Erdbeben, die Automatik sammelt auch viele der kleineren Erdbeben bis zur Magnitude 1,5 mit auf, natürlich nicht vollständig. Dass bei der automatischen Auswertung auch Magnituden $\geq 3,0$ im Unterschied zur manuellen auftreten, liegt an der Überschätzung der automatischen Magnitude wie in Abb. 4.2-8 gezeigt ist.

4.2.4 Beispiel für die erste Gruppe Juli: Lokale Erdbeben ≤ 100 pro Monat, Verhältnis ≈ 1

In dieser ersten Gruppe tritt im Histogramm der manuellen und automatisch erkannten Ereignisse eine deutliche Zweiteilung auf: Die vorwiegend in geringer Stärke auftretenden lokalen Erdbeben, die nur manuell ausgewertet werden können und die mit größeren Magnituden verbundenen Steinbruch-

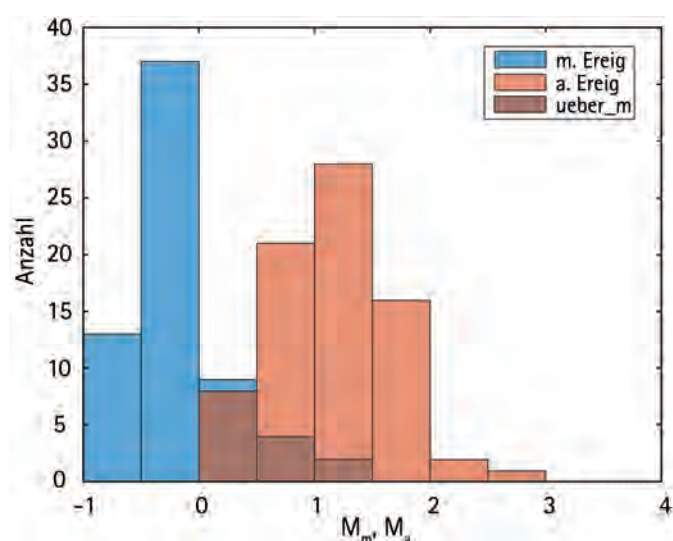


Abb. 4.2-2: Manuell ausgewertete Erdbeben (m.Ereig) und automatisch erfasste Ereignisse (a.Ereig) im Juli 2021. Der Überlappungsbereich (ueber_m) ist durch die dunklen Bereiche gekennzeichnet.

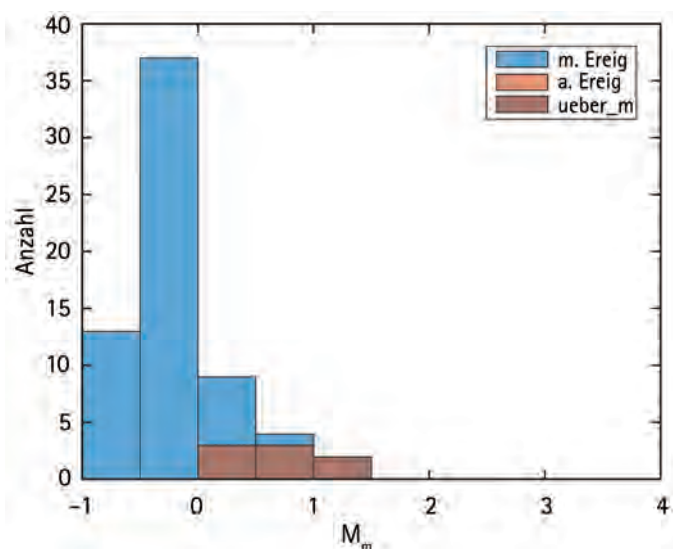


Abb. 4.2-3: Manuell gefundene Ereignisse (m.Ereig) und die durch die Automatik erkannten Ereignisse (ueber_m) im Monat Juli 2021.

Die geringe Anzahl der induzierten Erdbeben im Südharz und im Kali-Werra-Gebiet spielt in dieser Gruppeneinteilung keine Rolle.

sprengungen, die die Automatik erfassen kann. Es gibt einen Überlappungsbereich beider Auswerteverfahren, in dem sich auch automatisch erfasste stärkere lokale Erdbeben befinden können. Die Bestimmung der Magnitude als Maß für die Ereignisstärke unterscheidet sich allerdings um 0,1–0,2 Einheiten zwischen beiden Auswerteverfahren, wobei M_a meist größer als M_m ist.

Im Juli 2021 gab es, wie häufig bei geringer Seismizität, wenige größere Erdbeben. Die größeren seismischen Ereignisse waren Steinbruchsprengungen in den gekennzeichneten schwarzen Gebieten von Abb. 4.2-1. Wie viele der manuell gefundenen Erdbeben wurden nun auch automatisch gefunden? Für den Monat Juli 2021 wurden von 59 lokalen 6 und von 6 induzierten Erdbeben 2 automatisch gefunden. Im Juli 2021 traten 6 induzierte Erdbeben auf; das sind mehr als im Durchschnitt. In der Abb. 4.2-3 sind die automatisch gefundenen Ereignisse, die mit der manuellen Auswertung übereinstimmen, über der manuell ermittelten Magnitude M_m dargestellt. Dieser geringe Anteil von 8 ist für die Erdbebenanzahl von weniger als 100 im Monat typisch.

Die dunklen Bereiche im Histogramm Abb. 4.2-3 sind die automatisch gefundenen Erdbeben, die den manuell ermittelten entsprechen. Da die manuell ermittelten Ereignisse ausschließlich lokale und induzierte Erdbeben sind, müssen die entsprechenden übereinstimmenden Ereignisse der automatischen Erfassung auch aus dieser Ereignisklasse stammen und dürften keine Sprengungen sein. Da aber die Erdbebenparameter wie die Herd-Koordinaten an der Oberfläche, die Entstehungs-Herdzeit des Erdbebens und die Magnitude sich bei beiden Auswerteverfahren unterscheiden, muss man einen Parameter verwenden, der innerhalb der Erdbebenklasse die geringsten Unterschiede aufweist. Die ad hoc gewählte Festlegung war: Wenn sich die Herdzeit eines Ereignisses bei beiden Verfahren um weniger als 6 Sekunden unterscheidet, dann soll es sich um dasselbe Ereignis für die unterschiedlichen Auswerteverfahren handeln. Im Normalfall ist dieses Kriterium geeignet, allerdings können besonders bei Schwarmbeben und selten auch sonst innerhalb von 6 Sekunden durchaus zwei Erdbeben auftreten. Die automatische Auswertung hat außerdem die festgelegte Beschränkung, dass erst 60 Sekunden nach einem ersten Erdbeben ein zweites auftreten darf. Diese Einschränkung gibt es in der Natur jedoch nicht. Bei unserem Vergleich müssen deshalb mehrere Beben innerhalb einer Minute unberücksichtigt bleiben.

4.2.5 Beispiel für die dritte Gruppe Februar: Lokale Erdbeben ≈ 300 pro Monat, Verhältnis $\approx 0,5$

Die Zweiteilung der ausgewerteten Ereignisse ist aufgrund der deutlichen Zunahme der kleineren Erdbeben nicht mehr vorhanden (Abb. 4.2-4). Die Erdbeben dominieren mit Magnituden ≤ 0 deutlich.

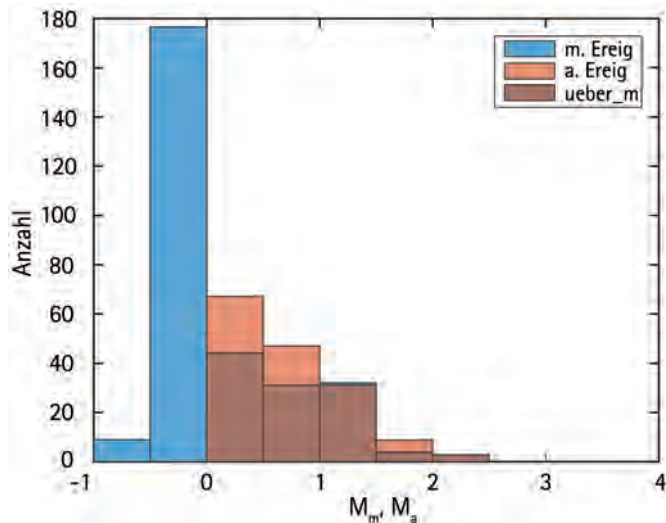


Abb. 4.2-4: Die Anzahl der lokalen Erdbeben im Erdbebengebiet um Luby hatte sich auf ungefähr 300 im Februar 2021 erhöht. Sie übertrifft die der Sprengungen um ein Vielfaches.

Gibt es in den $-0,5 \leq$ Magnitudenklassen $< 1,0$ mehr Erdbeben, so werden durch die Automatik in dieser größeren Stichprobe auch mehrere erkannt. Bei den Magnituden $\geq 0,5$ wurden im Februar einige der manuell gefundenen Beben auch automatisch erfasst (Abb. 4.2-5).

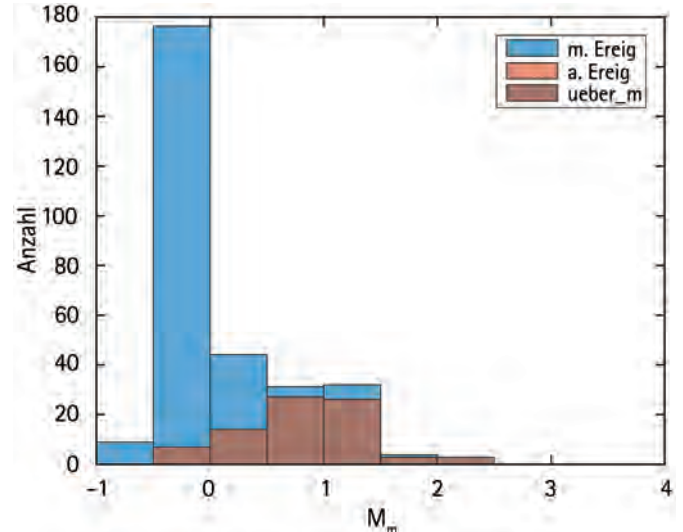


Abb. 4.2-5: Die Anzahl der Erdbeben mit kleinerer Magnitude im Monat Februar 2021 hat zugenommen, die die automatische Auswertung erfasst hat.

4.2.6 Wie werden Ereignisse als gleich definiert?

Es wurde, wie bereits beschrieben, festgelegt, dass ein Ereignis, welches sich bei beiden Auswerteverfahren um weniger als 6 Sekunden in der Herzzeit unterscheidet, ein identisches, also dasselbe Ereignis sein soll. Die Herzzeit ist der Zeitpunkt, zu welchem das Ereignis entstanden ist. Ist diese Annahme richtig?

Das Histogramm (Abb. 4.2-6) ist nicht ganz symmetrisch, die Differenzen der Herzzeiten liegen zwischen $-0,6$ s und $1,8$ s. Die beiden Ausreißer bei $-1,5$ s und $2,5$ s sind wahrscheinlich schlechte Assoziationsergebnisse, möglicherweise unter Verwendung falscher Welleneinsätze.

Unter einer Assoziation versteht man den Versuch, Einsätze von unterschiedlichen Stationen als von einem Ereignis stammend zusammenzuführen. Ist diese Zusammenstellung richtig, dann führt eine Ortung aufgrund der Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten in diesem Gebiet zu den Koordinaten und zu der Entstehungszeit des Ereignisses. Wenn sie falsch oder nicht richtig ist, dann erhält man kein oder ein falsches Ergebnis. Die Assoziation bei der automatischen Auswertung besitzt durch nicht eindeutige automatische Zusammenstellung oder auftretende Störungen auch zufällige Eigenschaften.

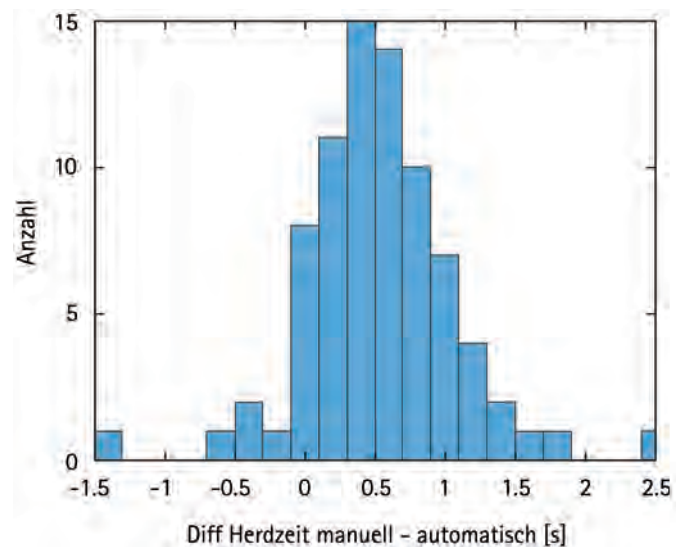


Abb. 4.2-6: Differenzen der Herzzeit der als übereinstimmend angesehenen Ereignisse vom Februar 2021. Die Intervallbreite beträgt $0,2$ s.

Bei einem dritten, im Histogramm nicht dargestellten Ausreißer mit einer Herzzeitdifferenz von 5,4 s handelt es sich wahrscheinlich um zwei unterschiedliche Ereignisse. Es ist aber klar, dass eine Differenz von 5 s entschieden zu groß gewesen ist, 2,5 s sollten es im absoluten Betrag maximal sein.

Eine andere naheliegende Überlegung um die Gleichheit von Ereignissen festzulegen wäre, eine möglichst geringe Abweichung der ermittelten Herdkoordinaten an der Oberfläche, der Epizentren, mit beiden Auswertesystemen zu fordern. In Abb. 4.2-7 sind die Abweichungen der als gleich angenommenen Ereignisse in einem Histogramm dargestellt. Es gibt wieder 3 Ausreißer über einer festlegbaren Grenze von 7 km.

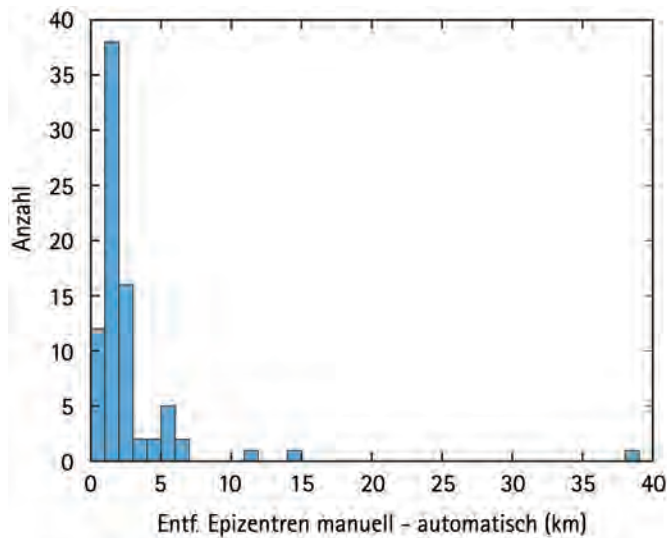


Abb. 4.2-7: Entfernung der mit dem manuellen und dem automatischen Auswerteverfahren ermittelten Epizentren im Februar 2021.

Die große Entfernung von 38,4 km entspricht dem Ereignis, welches auch eine Herzzeitdifferenz von 5,4 s hatte. Das deutet auch aus dieser Sicht auf zwei verschiedene Ereignisse hin oder eine völlig falsche automatische Ortung. Die anderen beiden Ausreißer haben zum einen mit 14,5 km eine Herzzeitdifferenz von 0,7 s und zum anderen mit 11,3 km eine Differenz der Herzzeit von -0,5 s zugeordnet. Diese Unterschiede der

4.2.7 Die Detektionsschwelle der automatischen Ereignisse, Zufälligkeiten der Assoziation

Eine andere interessante Frage ist, ab etwa welcher Magnitude kann die automatische Auswertung alle Ereignisse der manuellen finden? Diese Fragestellung setzt voraus, dass das Bestimmen des Ereignisses aus den automatisch bestimmten Einsätzen an den Stationen ohne Einfluss von zufälligen Bedingungen ist. Das ist jedoch nicht der Fall: Die ungenaue Bestimmung des Welleneinsatzes, die Verwechslung der Wellenarten, das unbestimmte Auftreten von Störungen, die als Welleneinsätze gedeutet werden und das unbestimmte Eintreffen der Einsätze während des Assoziationsprozesses verleihen der automatischen Auswertung einen zusätzlichen, wenn auch

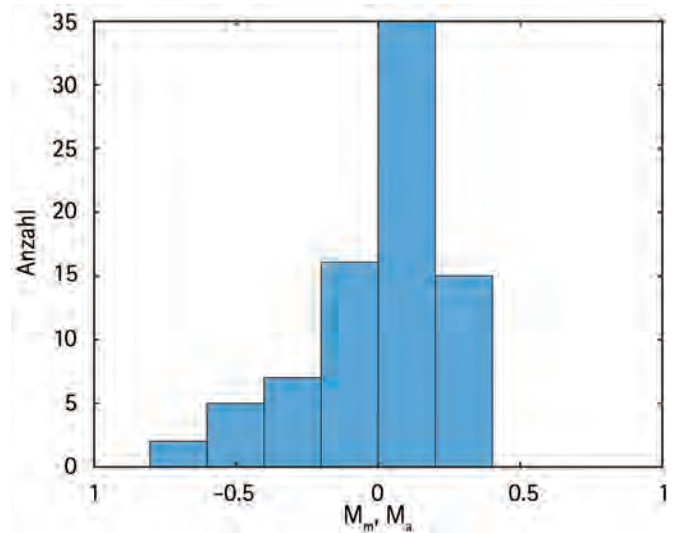


Abb. 4.2-8: Differenz der manuell ermittelten Magnitude (M_m) minus der automatisch ermittelten Magnitude (M_a) für Ereignisse im Februar 2021.

Herzzeit sind nicht außergewöhnlich. Möglicherweise sind automatische Assoziationsfehler dafür verantwortlich. Die manuelle Auswertung wird im Gegensatz zur automatischen immer als hinreichend fehlerfrei angenommen. Die Größe der Ausreißer erscheint bei der Entfernung größer als bei der Herzzeitdifferenz zu sein, deshalb ist letztere besser als Gleichheitskriterium geeignet.

Im Februar 2021 herrschte eine hohe Seismizität von 299 manuell ausgewerteten Erdbeben. Dies ermöglichte auch eine gesicherte Statistik. Eine sehr interessante Frage ist noch: Wie verhalten sich die manuell und die automatisch berechnete Magnitude zueinander? In Abb. 4.2-8 wurde von der manuell ermittelten Magnitude die automatisch berechnete abgezogen.

Das Histogramm ist zu negativen Werten hin verschoben. Das bedeutet, die automatische Magnitude hat teilweise größere Werte. Erklärbar ist dies, da bei kleinen Ereignissen zur automatischen Bestimmung öfters fälschlicherweise auch größere Unruheamplituden verwendet werden. Aber auch bei großen Erdbeben wird die automatische Magnitude oft überschätzt.

kleinen, zufälligen Charakter, der diese Assoziation der Welleneinsätze gegebenenfalls auch misslingen lässt. Trotzdem ist diese Frage von seismologischer Bedeutung: Wie genau kann die automatische Auswertung in der Regel sein?

Um einen möglichst homogenen Datensatz ohne eine erhöhte Erdbebenfolge zu haben, wurden alle sechs Monate des zweiten ruhigen Halbjahrs von 2021 zusammengefasst.

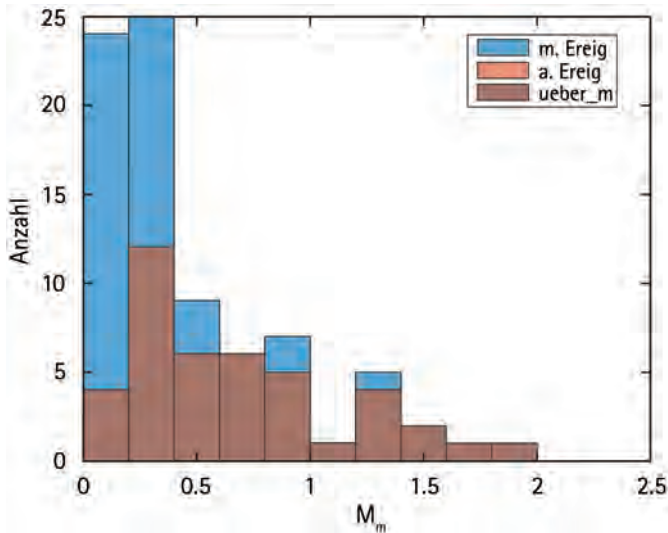


Abb. 4.2-9: Die im zweiten Halbjahr 2021 manuell (blau) ausgewerteten werden zusammen mit den von der Automatik gefundenen Erdbeben dargestellt. Ab der manuell bestimmten Magnitude von 1,4 ($M_L \geq 1,4$) gibt es eine vollständige Überdeckung.

Von den 369 manuell und 430 automatisch ausgewerteten Ereignissen (Verhältnis = 1,16) wurde eine Detektionsschranke von Magnitude $\geq 1,4$ für das zweite Halbjahr 2021 ermittelt (Abb. 4.2-9). Es gibt darüber hinaus ein einziges größeres Ereignis mit der Magnitude $2,5 < M_L \leq 3,0$, welches auch automatisch gefunden wurde. Diese Detektionsschranke ist aber nur für diesen speziellen Datensatz gültig.

Verwendet man den Datensatz für Februar 2021 mit 299 manuell und 157 automatisch ausgewerteten Ereignissen, so ist Magnitude $\geq 1,4$ kein Schwellwert mehr. In Abb. 4.2-10 sieht man den Detektionsschwellwert im Februar mit Sicherheit erst bei Magnitude $\geq 1,8$. Für alle anderen Monate 2021, außer

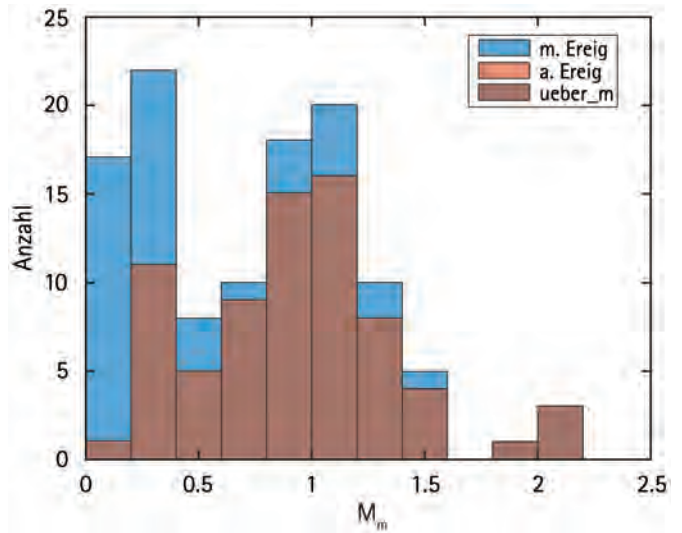


Abb. 4.2-10: Detektionsschwellwert der Automatik im Februar 2021: Magnitude $\geq 1,8$.

April, schwankte der Schwellwert zwischen 0,5 und 2,0 bei einer Histogrammbreite von $M_L = 0,5$. Diese große Variabilität liegt wohl an der zufälligen Komponente des Assoziationsprozesses. Speziell für den Februar mit 299 Ereignissen könnte außerdem eine Rolle gespielt haben, dass dicht aufeinander folgende Erdbeben vom automatischen System nicht vollständig erfasst werden können.

Die absolute Zahl der automatisch detektierten Erdbeben auch im unteren Magnitudenbereich nimmt bei vergrößerter Bebenanzahl zu (Tab. 4.2-1 und Tab. 4.2-2).

4.2.8 Der Erdbebenschwarm vom 10.–16. April 2021

Es kommt in Abständen einiger Jahre vor, dass nahezu explosionsartig ein heftiges Aufsteigen von Volatilen innerhalb weniger Tage hunderte bis tausend Erdbeben bei Luby, Novy Kostel oder auch Plauen entstehen lässt. Gemäß der lokalen Magnituden-Häufigkeitsregel sind das neben einer sehr großen Anzahl von kleinen Erdbeben auch viele stärkere, die über der Magnitude aufgetragen einen linearen Abfall bilden. Im Vogtlandgebiet treten zu diesen Zeiten mitunter auch Erdbeben in der Nähe der Magnitude 4 auf, welche auch in weiten Teilen Sachsens, Thüringens und Bayerns gespürt werden. Es ist deshalb sehr wichtig, die Bevölkerung zu informieren. Das Problem dieser großen Anzahl von Erdbeben ist ihre schnelle Erfassung. Während wir bisher die manuelle Auswertung als nahezu vollständige Erfassung der Erdbeben angesehen haben, ist das jetzt nicht mehr der Fall. Die manuellen Auswerter konzentrieren sich hauptsächlich auf die stärkeren Ereignisse, je nach der Größe des Schwarms. Die kleineren Erdbeben bleiben wegen fehlender Auswertzeit unberücksichtigt.

Die Automatik hat durch die Vielzahl der Ereignisse ebenfalls Schwierigkeiten. Erinnern wir uns an die Einstellung: Es kann nur ein Erdbeben pro Minute detektiert werden. Große Erdbeben werden dadurch aber kaum übersehen, da zur Magnitudenberechnung immer die große zeitliche Ausdehnung von 60–120 s der folgenden Wellenzüge (Coda) verwendet wird, seien es auch diejenigen eines weiteren Erdbebens. Sehr viele Erdbeben erzeugen viele Welleneinsätze, die assoziiert werden müssen, um gemäß den aus den Geschwindigkeiten resultierenden Laufzeiten einem eigenständigen Erdbeben zugeordnet werden zu können. Diese Anpassung an die zeitliche Zuordnung der Welleneinsätze für jede Station besitzt aber eine notwendige Toleranz, da die automatische Einsatzbestimmung zeitlich nicht immer genau ist. So können von zeitlich dicht aufeinanderfolgenden Erdbeben deren Einsätze gemischt werden. Schlimmer ist es jedoch, wenn nicht dazugehörige Einsätze oder Störimpulse von fernen Stationen irgendwie mit auf die Laufzeitkurven gelegt werden. Das ergibt in manchen Fällen

Vergleich der detektierten automatischen mit den manuell ermittelten Ereignissen nach Monaten im Jahr 2021. Da sich das zweite Halbjahr in seiner Seismizität grundlegend vom ersten Halbjahr unterscheidet, werden die beiden Halbjahre in zwei verschiedenen Tabellen dargestellt. Im zweiten Halbjahr werden außerdem alle Monate noch einmal zusammengefasst.

Tab. 4.2-1: 1. Halbjahr 2021, Häufigkeiten in den Magnitudenklassen, Linke Grenze des Intervalls: \geq ; rechte Grenze: $<$.

Erläuterungen: m.Ereig: manuell ausgewertete Ereignisse mit manuell bestimmter Magnitude M_m , a.Ereig: automatisch ausgewertete Ereignisse mit automatisch bestimmter Magnitude M_a , ueber_m: Übereinstimmende Ereignisse beider Auswertemethoden mit manuell bestimmter Magnitude, $V1 = ueber_m/m.Ereig$; $V2 = a.Ereig/m.Ereig$; $V3 = ueber_m/a.Ereig$, rot markierte Zahlen von m.Ereig, ueber_m: ab dieser Magnitudenklasse stimmt die automatische Auswertung mit der manuellen überein.

Magnitudenklasse	-1,0	-0,5	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	Summe	Verhältnis
Januar 2021												
m.Ereig	5	118	54	23	5	2	2	0	0	0	209	V1: 0,30
ueber_m	0	2	31	21	5	2	2	0	0	0	63	V2: 0,52
a.Ereig	0	10	42	18	25	11	2	1	0	0	109	V3: 0,58
Februar 2021												
m.Ereig	9	176	44	31	32	4	3	0	0	0	299	V1: 0,27
ueber_m	0	7	14	27	26	3	3	0	0	0	80	V2: 0,53
a.Ereig	0	0	67	47	31	9	3	0	0	0	157	V3: 0,51
März 2021												
m.Ereig	15	77	11	3	1	0	0	0	0	0	107	V1: 0,09
ueber_m	0	4	4	1	1	0	0	0	0	0	10	V2: 0,70
a.Ereig	0	1	11	13	40	10	0	0	0	0	75	V3: 0,13
April 2021												
m.Ereig	13	128	55	41	46	55	27	8	0	0	373	V1: 0,46
ueber_m	0	4	25	31	36	47	24	4	0	0	171	V2: 1,87
a.Ereig	0	32	259	190	116	63	28	7	2	0	697	V3: 0,25
Mai 2021												
m.Ereig	28	116	30	9	2	1	0	0	0	0	186	V1: 0,18
ueber_m	0	3	20	7	2	1	0	0	0	0	33	V2: 0,52
a.Ereig	0	1	22	25	29	18	1	0	0	0	96	V3: 0,34
Juni 2021												
m.Ereig	21	88	14	4	2	0	0	0	0	0	129	V1: 0,09
ueber_m	0	0	6	4	2	0	0	0	0	0	12	V2: 0,72
a.Ereig	0	1	8	33	32	18	1	0	0	0	93	V3: 0,13

Tab. 4.2-2: 2. Halbjahr 2021, die Seismizität ist insgesamt schwach. Erläuterungen: s. Tab. 4.2-1.

Magnitudenklasse	-1,0	-0,5	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	Summe	Verhältnis
Juli 2021												
m.Ereig	13	37	9	4	2	0	0	0	0	0	65	V1: 0,12
ueber_m	0	0	3	3	2	0	0	0	0	0	8	V2: 1,17
a.Ereig	0	0	8	21	28	16	2	1	0	0	76	V3: 0,11
Aug 21												
m.Ereig	20	57	9	4	1	1	0	1	0	0	93	V1: 0,16
ueber_m	0	3	5	4	1	1	0	1	0	0	15	V2: 1,04
a.Ereig	0	2	7	27	36	23	1	1	0	0	97	V3: 0,15
Sep 21												
m.Ereig	5	33	9	1	2	0	0	0	0	0	50	V1: 0,10
ueber_m	0	0	4	0	1	0	0	0	0	0	5	V2: 1,30
a.Ereig	0	1	6	13	24	20	1	0	0	0	65	V3: 0,08
Okt 21												
m.Ereig	11	30	12	1	0	0	0	0	0	0	54	V1: 0,07
ueber_m	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	4	V2: 1,02
a.Ereig	0	0	6	15	17	17	0	0	0	0	55	V3: 0,07
Nov 21												
m.Ereig	11	39	10	3	1	0	0	0	0	0	64	V1: 0,08
ueber_m	0	1	1	2	1	0	0	0	0	0	5	V2: 1,09
a.Ereig	0	0	5	22	24	19	0	0	0	0	70	V3: 0,07
Dez 21												
m.Ereig	3	28	4	5	1	2	0	0	0	0	43	V1: 0,26
ueber_m	0	1	3	4	1	2	0	0	0	0	11	V2: 1,56
a.Ereig	0	0	5	15	20	24	3	0	0	0	67	V3: 0,11
Ges 2. Halbj												
m.Ereig	63	224	53	18	7	3	0	1	0	0	369	V1: 0,13
ueber_m	0	5	19	14	6	3	0	1	0	0	48	V2: 1,16
a.Ereig	0	3	37	113	149	119	7	2	0	0	430	V3: 0,11

eine gänzlich falsche Ortung. Fällt dadurch der Herd aus der Erdbebenregion heraus, so wird er auch nicht mehr über SMS oder E-Mail gemeldet und kann übersehen werden. Da diese Prozesse zufällig durch unterschiedliche Algorithmenabläufe oder Datenübertragungen auf jedem Rechner gesondert auftreten, ist es sinnvoll, einen zweiten Rechner parallel arbeiten zu lassen, um solche Erscheinungen kontrollieren zu können (BURGHARDT 2021).

Obwohl die ausgewerteten Ereignisse bei Schwärmen sowohl in manueller als auch automatischer Weise unvollständig sind, bietet die Automatik doch ein wertvolles Instrument, um schnell im Überblick den Verlauf des Schwarms einsehen zu können. Auch für einen Schwarm gilt: Große Erdbeben möglichst zeitnah zu melden. Durch die folgende manuelle Auswertung kann für die betreffende Herdzeit die Meldung präzisiert werden. Bei der großen Anzahl der Erdbeben werden meist die großen, wenn auch vielleicht mit geringer falscher Herdzeitzuordnung, automatisch gefunden. Ineinander verlaufende Erdbeben werden allerdings nur als eines erkannt, da nach jedem Erdbeben dessen Wellenzüge wieder in den Unruhebereich abgesunken sein müssen. Es kommt aber vor, dass der P-Einsatz eines folgenden großen Erdbebens als S-Einsatz des ersteren Erdbebens gedeutet wird.

Aus Abb. 4.2-11 ist zu ersehen, dass die automatisch detektierten Erdbeben im Magnitudenbereich 0,0–2,0 die manuell ausgewerteten deutlich übersteigen. Die manuelle Auswertung hat sich auf die größeren Erdbeben während des Schwarms konzentriert. Das große Angebot von Erdbeben in diesem Be-

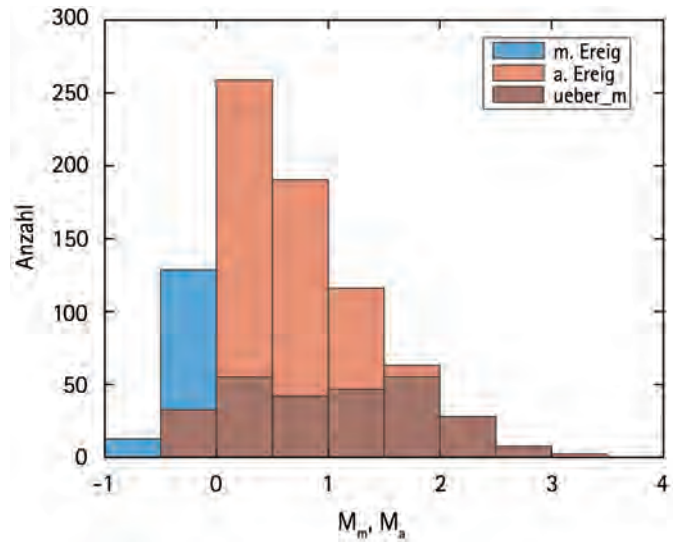


Abb. 4.2-11: Gegenüberstellung der manuell (m.Ereig) und automatisch detektierten Ereignisse (a.Ereig) im April 2021. Der weitest größte Teil der Ereignisse stammt vom Schwarm 10.–16. April 2021. Gleich gefundene Ereignisse sind braun gekennzeichnet (ueber.m).

reich hat auch dazu geführt, dass mehr als sonst automatisch detektiert worden sind. An den restlichen Tagen des Aprils, außerhalb des Schwarms, gab es wieder die natürliche manuelle Routineauswertung mit kleineren Erdbeben. Deshalb ist auch der Magnitudenbereich $-1,0 - 0,0$ vertreten. Da die Datensätze unvollständig sind, lohnt auch kein quantitativer Vergleich zwischen manueller und automatischer Auswertung.

4.2.9 Schlussfolgerungen

- ◆ Die für eine wissenschaftliche Auswertung der Erdbeben erforderliche Anzahl und Genauigkeit wird durch die automatische Auswertung nicht erreicht.
- ◆ Größere meldepflichtige, einzeln auftretende Erdbeben ab Magnitude 1,5 werden jedoch meist von der Automatik erfasst und sind augenblicklich meldefähig.
- ◆ Bei großen Erdbebenschwämen bietet die Automatik ein wichtiges Hilfsmittel, größere Erdbeben und auch viele kleinere schnell zu finden. Die schnelle zeitliche Folge der aufeinander folgenden Ereignisse führt auch zum Übersehen von vielen kleineren Erdbeben. Die automatische Detektion liefert aber trotzdem einen guten Überblick über den Schwarmverlauf und gibt den Auswertern Hinweise auf interessierende Ereignisse. Die gemeldeten Erdbeben sind aber für eine sichere Einschätzung unvollständig.
- ◆ Bei normaler Seismizität mit weniger als 100 Erdbeben pro Monat werden etwa 10% davon auch automatisch erfasst. Die größten Abweichungen zwischen der manuellen und der automatischen Auswertung betreffen die Magnitude.
- ◆ Um störende Zufälligkeiten bei der Automatik zu verringern ist es sinnvoll, einen zweiten Rechner zeitgleich parallel arbeiten zu lassen.
- ◆ Diese Aussagen gelten für das Erdbebengebiet der Leipzig-Regensburg-Zone. Wegen der geringen Datenfülle müssen das Südharzgebiet und das Kali-Werra-Gebiet über einen längeren Zeitraum untersucht werden.

4.4 Literatur

BURGHARDT, T. (2021): Assoziierung von Ereignissen untersucht bei Schwarmbeben. – Werkbericht; Jena; unveröff.

SONNABEND, L. (2019): Leipzig-Regensburg-Zone. – In: SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE [Hrsg.] 2019: Erdbebenbeobachtung in Mitteldeutschland. Dreijahresbericht 2016–2018: 55–59; Dresden.

5 Seismologische Arbeiten in Mitteldeutschland

5.1 Spektren zur Identifikation von lokalen und induzierten Erdbeben

THOMAS BIRGHARDT

5.1.1 Anzeige von Frequenzeigenschaften in SeisComP

Bei der automatischen Überwachung werden nicht nur die interessierenden lokalen Erdbeben und die durch den Kali-bergbau erzeugten induzierten Erdbeben registriert, sondern die registrierten Ereignisse bestehen zu über 90 Prozent aus Steinbruchsprengungen und vereinzelt ferneren Erdbeben.

Da Sprengungen, lokale und induzierte Erdbeben unterschiedliche Frequenzeigenschaften besitzen, sind die Spektren, neben den Seismogrammen, eine zusätzliche Hilfe, die

Ereignisse zu klassifizieren. Ein erfahrener Auswerter kann allein mit Hilfe der Seismogramme die Ereignisart erkennen. Es gibt aber bei kleinen Ereignissen, die mitunter auch falsch automatisch geortet werden, keine eindeutige Zuordnung. An Werktagen werden etwa 10 Ereignisse automatisch detektiert. Es ist praktisch, dass die Meldungen nicht nur am Bildschirm, sondern auch über E-Mail bekannt gemacht werden. Es werden die Herdparameter eines Ereignisses und Abbildungen der Seismogramme, der Spektren und der geografischen Lage mit

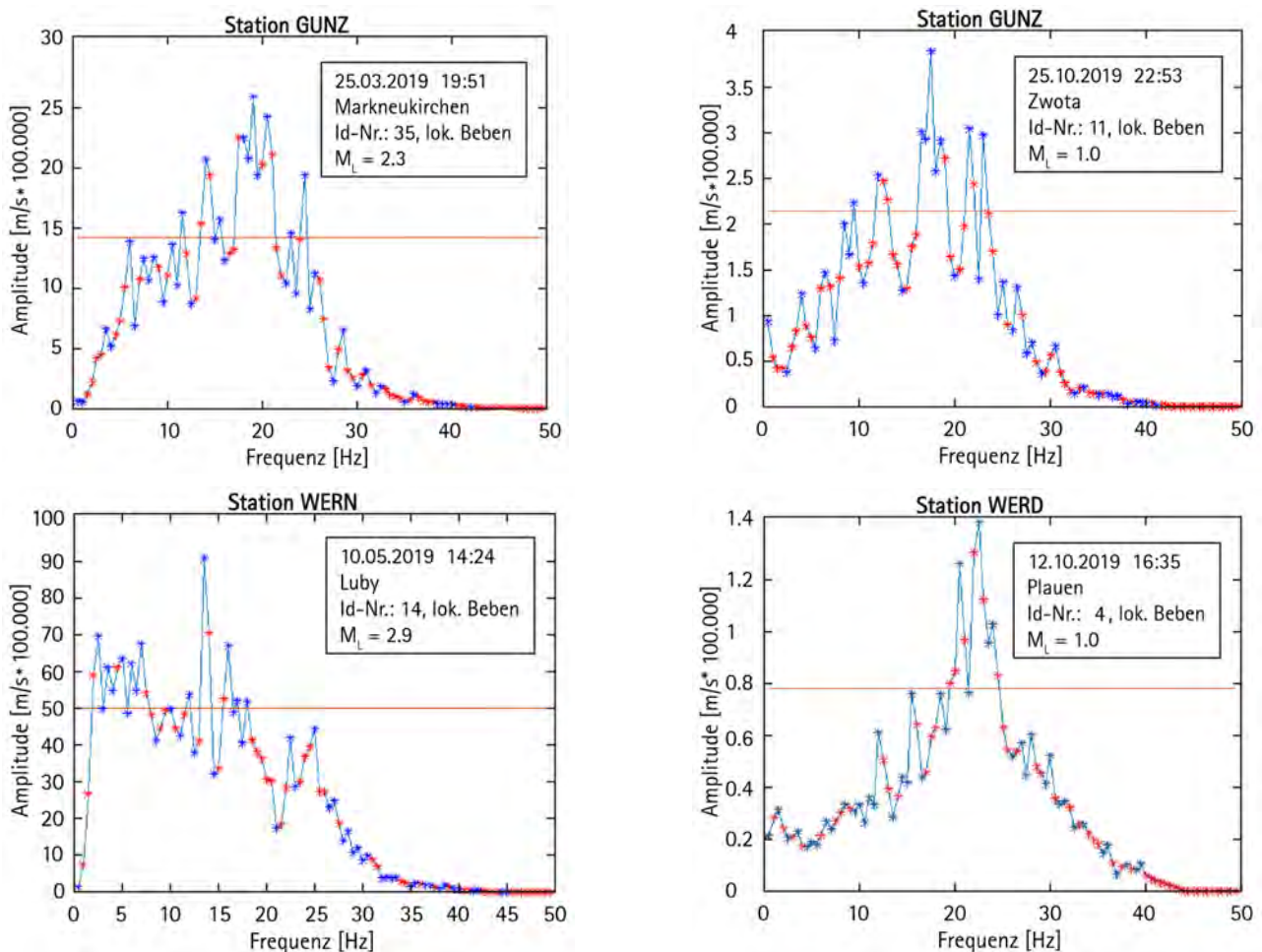


Abb. 5.1-1: Amplitudenspektren von lokalen Erdbeben.

versendet. Das Spektrum wird immer von der Vertikalkomponente der herdnächsten Station berechnet.

In den hier gezeigten Abbildungen sind die Amplitudenspektren mit dem Programmsystem MATLAB berechnet und dargestellt.

Das Seismogramm wurde vor der Spektralschätzung mit einem Butterworth-Bandpassfilter 4. Ordnung mit 1–25 Hz gefiltert. In den dargestellten Abbildungen ist als waagerechte Linie ein berechneter Schwellwert von $0,55 \cdot \text{Maximum des Spektrums}$ eingezeichnet. Die blauen Sterne sind die Extremwerte der gemittelten Spektralwerte über einen Frequenzbereich von jeweils 0,5 Hz. Die roten Sterne sind die gemittelten Spektralwerte an den übrigen Stützstellen. Alle gemittelten Spektralwerte wurden zusätzlich zu einem Fünftel rekursiv geglättet. Die X-Werte sind die Frequenzen von 0...50 Hz, die Y-Werte das Amplitudenspektrum $\times 100\,000$ in m/s. Die Größe dieser

Zahlenwerte hängt von der Nähe der Station zum Herd und von der Stärke des seismischen Ereignisses ab.

Die Id-Nr. der Ereignisse entspricht der in den Tabellen angegebenen. In Abb. 5.1–4 ist auch die Lage dieser Erdbeben eingezeichnet. Man sieht in den Spektren deutlich, dass es im Wesentlichen ein Maximum der Spektren um 20 Hz oder darunter gibt. Auf den Seismogrammen sieht man zusätzlich sehr steile scharfe P- und S-Einsätze für lokale Erdbeben.

Die Steinbruchsprengungen unterteilen sich etwa zur Hälfte grob in zwei Kategorien: Die erste weist nur einen Anteil mit niedrigen Frequenzen zwischen 0–5 Hz auf. Hierbei spiegeln sich die typischen Oberflächenwellen wider. Das ist der Sprengungstyp Spr1. Die andere Gruppe besitzt ein komplizierteres Spektrum. Meist sind zwei oder mehrere Maxima-Häufungen zu erkennen. Diese Spektren zählen zu dem Sprengungstyp Spr2.

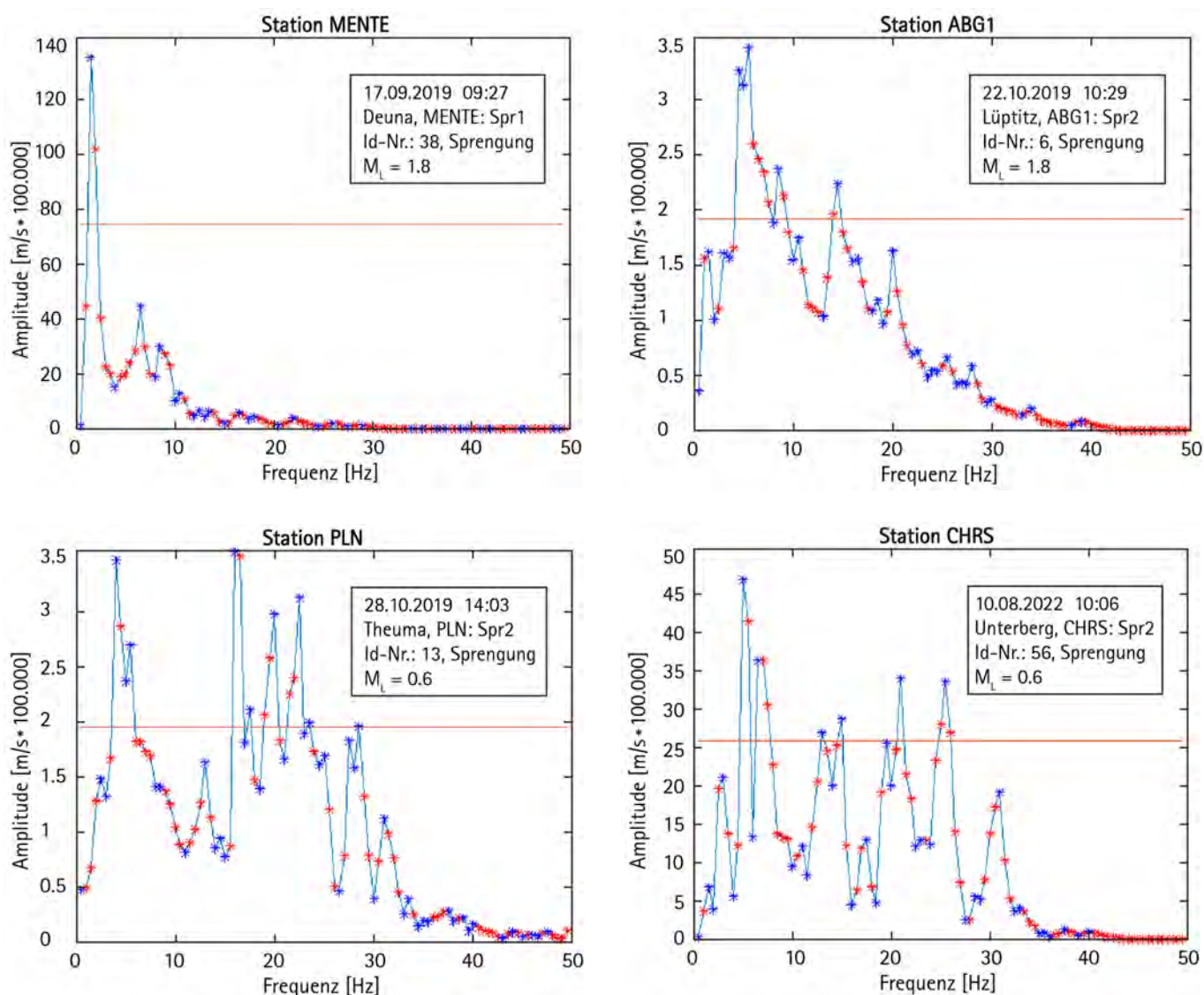


Abb. 5.1-2: Amplitudenspektren von Sprengungen.

In den Spektren-Abbildungen sind die Sprengorte, die Id-Nr. aus den Tabellen sowie die nächste Station, die die Sprengung aufgezeichnet hat, und von der das Spektrum berechnet worden ist, aufgeführt. Man könnte vermuten, dass bei Hartgesteinen nur Sprengungen vom Typ Spr2 auftreten. Das ist aber nicht immer der Fall. Auf dem Dietrichsberg mit Hartgestein, Id-Nr. 37, gibt es den Sprengungstyp Spr1. In diesem Fall ist das sehr nützlich, denn die induzierten Ereignisse im Kali-Werra-Gebiet sind dadurch besser erkennbar.

Die letzte und komplizierteste Gruppe bezüglich markanter Spektren stellen die induzierten Erdbeben dar.

Diese Spektren ähneln teilweise lokalen Erdbeben wie das von Unterbreizbach oder Menteroda. Oder sie haben ihr Maximum im niedrigen unteren Frequenzbereich wie Sondershausen oder Bleicherode, aber anders als der Sprengungstyp Spr1. Die Spektren aller Ereignisse können sich aber durch abnehmende

Ereignisstärke oder ihrer Entfernung zum Herd in der Ausprägung der Maxima ändern.

Während die Unterscheidung von lokalen Erdbeben und Sprengungen für Erdbeben $M_L > 0,5$ gut gelingt, ist es bei induzierten Ereignissen nicht so einfach. Aber da hilft eine räumliche Betrachtung zu den störenden Sprengorten. Auch kam es zu keiner Überlagerung der Herdgebiete lokaler und induzierter Erdbeben.

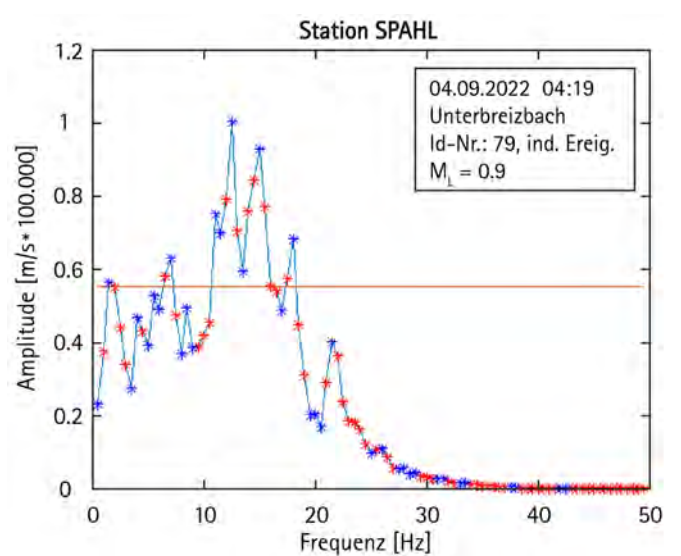
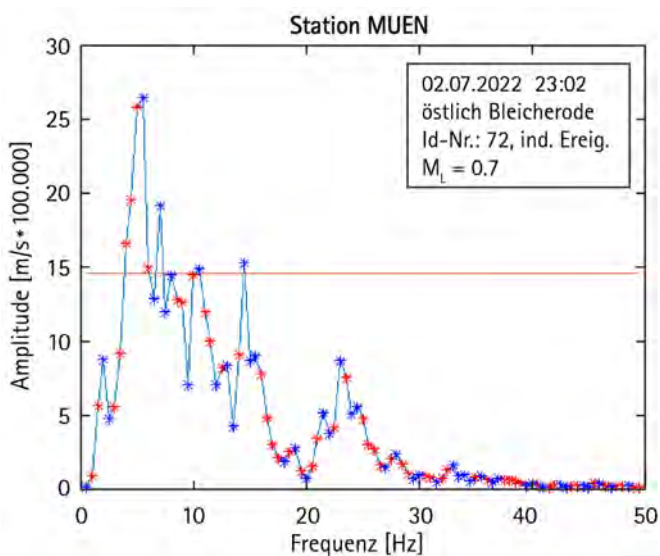
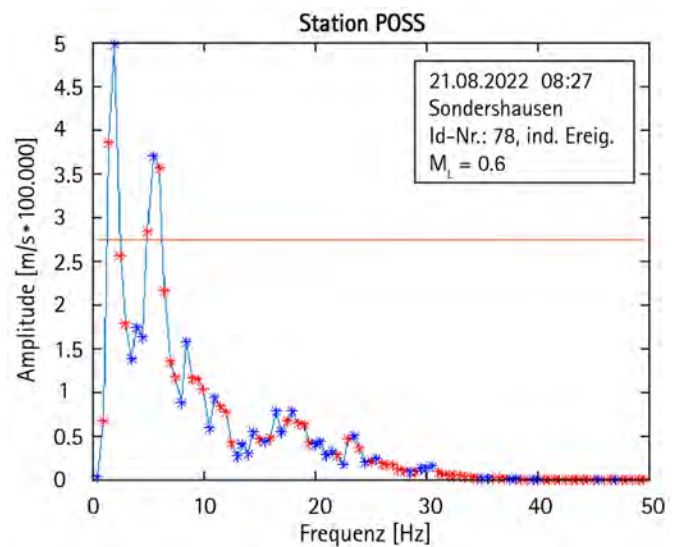
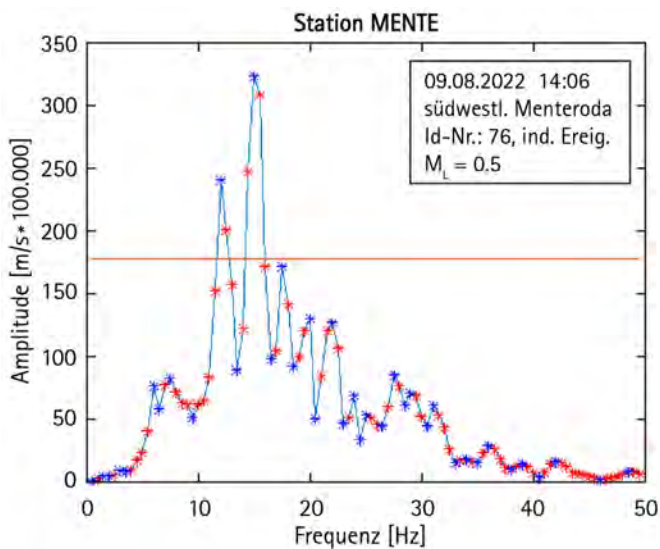


Abb. 5.1-3: Amplitudenspektren von induzierten Erdbeben.

5.1.2 Räumliche Zuordnung der Ereignisse

In Abb. 5.1–4 sind die Ereignisse aus der Tab. 5.1–1 aus den Jahren 2018/19 und ergänzend ein induziertes Erdbeben aus dem Jahr 2022 eingezeichnet. Fast unterhalb des Steinbruchs Dietrichsberg liegt ein Schacht des Kalibergwerkes K&S, Unterbreizbach. Das Spektrum der Sprengung mit Id-Nr. 37 vom Typ Spr1 ist klar unterscheidbar vom Spektrum des induzierten Erdbebens Id-Nr. 79 (siehe dieses Spektrum in Abb. 5.1–3). Da ständig sehr viele Sprengungen detektiert werden, ist es wichtig, die infrage kommenden Ereignisse weiter einzukreisen. Erfahrungsgemäß kommen die uns interessierenden lokalen Erdbeben im Bereich der Leipzig–Regensburg–Zone vor. Dieser Bereich ist durch das rechte große Rechteck gekennzeichnet. Die anderen Rechtecke sind die Gebiete für induzierte Erdbe-

ben: Südharzgebiet mit dem eingezeichneten Sprengort Deuna und das Kali-Werra-Gebiet mit dem Sprengort Dietrichsberg. Auch gibt es noch vereinzelte Erdbeben im Gebiet um Mellrichstadt im untersten Rechteck. Durch die geografische Eingrenzung werden etwa zwei Drittel aller detektierten Ereignisse ausgeschlossen, denn es gibt noch weitere Ereignisse auch außerhalb des Gebiets von Abb. 5.1–4. Da sich lokale Erdbeben durch die Spektren in Abb. 5.1–1 und zusätzlich durch markante scharfe P- und S-Einsätze auszeichnen, sind sie auch deshalb relativ leicht von den Sprengungen vom Typ Spr2 unterscheidbar. Zwei mit lokalen Erdbeben eventuell zu verwechselnde Steinbrüche Lüptitz und Theuma vom Typ Spr2 sind exemplarisch in Abb. 5.1–4 eingezeichnet.

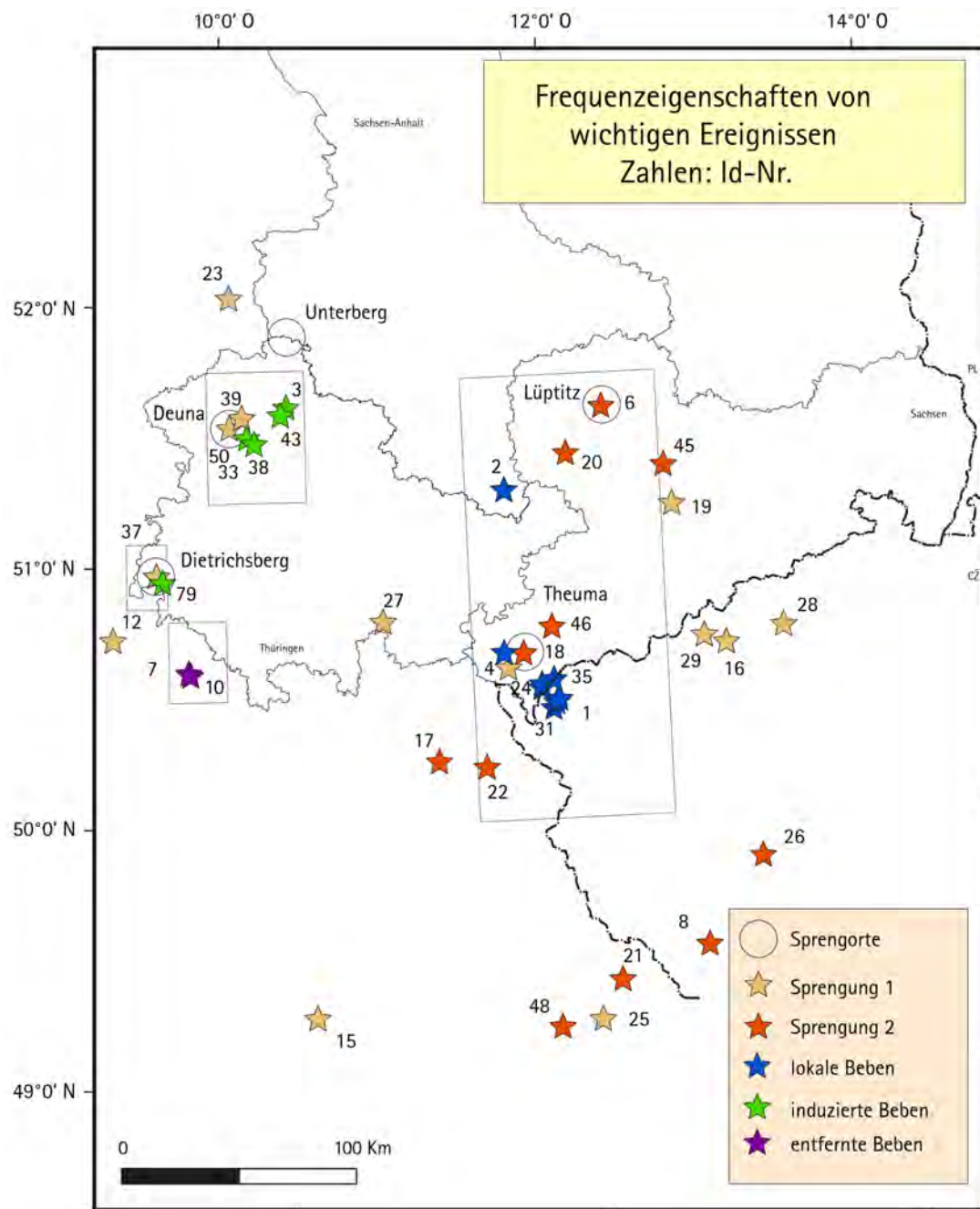


Abb. 5.1–4: Ereignisse aus Tab. 5.1–1 und das aus dem Jahr 2022 hinzugekommene induzierte Ereignis mit der Id-Nr. 79 am Dietrichsberg bei Unterbreizbach aus Tab. 5.1–2.

In dieser Abb. 5.1-5 mit eingezeichnetem Rechteck Südharz sind Sprengungen und induzierte Erdbeben dargestellt. Diese Ereignisse sind wesentlich ergänzt worden durch Ereignisse aus dem Jahr 2022 in der Tab. 5.1-2. Die induzierten Erdbeben in der Nähe Menteroda befinden sich in der Nähe der Sprengorte Deuna und Kallmerode. Beide Sprengorte sind vom Typ Spr1, also klar unterscheidbar. Die Ortung ist in dem Gebiet um Menteroda jedoch relativ schwierig. Die induzierten Erdbeben von Sondershausen werden durch die gute Station POSS relativ genau geortet und eine Verwech-

lung mit den Sprengorten von Nordhausen ist kaum eingetreten. Obwohl alle Ereignisse noch einmal manuell nachgeortet worden sind, liegen zwei Sprengungen entfernt zu Deuna. Überhaupt ist die Aufzeichnungsqualität im Gebiet der induzierten Erdbeben besonders südlich von Deuna nicht gut. Vier der induzierten Ereignisse bei Menteroda und Sondershausen mit $M_L < 1$ wurden zunächst nur manuell gefunden. Das könnte durch den geologischen Untergrund als auch durch das ehemalige Schachtgebiet begründet sein.

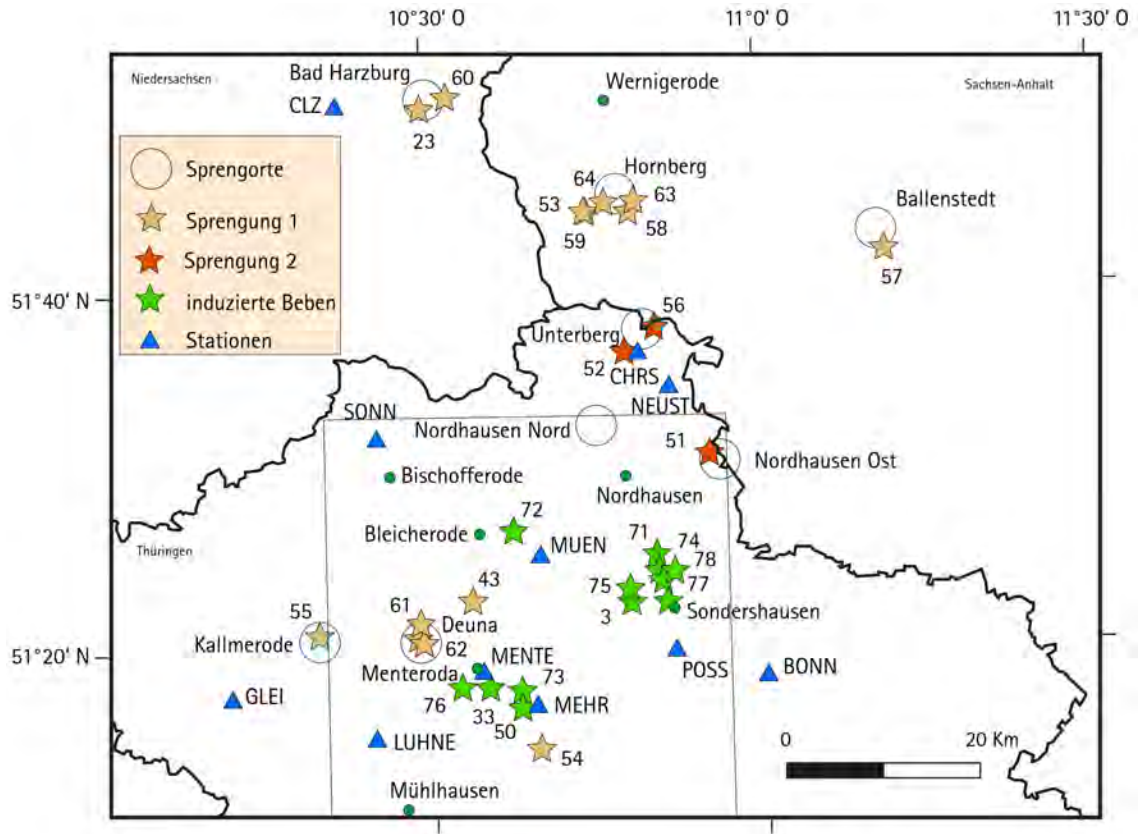


Abb. 5.1-5: Südharz mit Sprengungen und induzierten Ereignissen.

5.1.3 Fehlerquellen

Obwohl die Unterschiedlichkeit der Spektren unter zusätzlicher Beachtung der Region und der Form des Seismogramms einleuchtend ist, gibt es bei der automatischen Überwachung doch einige Unwägbarkeiten, die eine klare Entscheidung manchmal erschweren.

Zunächst wurde vorausgesetzt, dass das geortete induzierte Erdbeben sich relativ nah an seiner Quelle befindet. Bei einem kleinen Ereignis können aber große Ortungsfehler durch falsche Einsätze von anderen Stationen auftreten, so dass das Ereignis nicht mehr an seinem Ursprung erscheint und eine falsche nächste Station auftritt. Auch werden vereinzelt fälschlicherweise entfernte Sprengungen durch die automatische Auswertung nahe an das Gebiet dieser induzierten Erdbeben gelegt. Ein wichtiger Hinweis für induzierte Erdbeben ist das Beibehalten der bekannten nahen Stationen.

Auch verändern sich die spektralen Eigenschaften von kleinen induzierten und lokalen Erdbeben, weil mehr Unruheanteile das Spektrum beeinflussen können.

Manchmal gibt es auch Störungen, die häufig höhere Frequenzanteile in ihrem Spektrum besitzen. Sie verbinden sich mit wenigen zufälligen anderen Einsätzen und erzeugen so ein ‚interessierendes lokales oder induziertes Erdbeben‘.

Deshalb ist es sinnvoll, nur bei größeren induzierten Erdbeben ab der Magnitude $M_L > 1$ und mit mehr als 10 dem Ereignis zugrunde liegenden Einsätzen der Aussagekraft des Spektrums zu vertrauen. Sonst muss auf jeden Fall eine manuelle Kontrolle erfolgen.

Tab. 5.1-1: Ereignisse der Jahre 2018/19 aus dem gesamten Untersuchungsgebiet. Abkürzungen siehe Tab. 5.1-2.

Datum	Herdzeit (UTC) [hh:mm:ss]	Id-Nr.	M _L SC3	Koordinate [°N]	Koordinate [°E]	Herdgebiet	Art	maxx 1E-05
10.05.2018	12:46:22	1	1,2	50,260	12,410	Luby	Bb	3,861
10.05.2018	14:24:50	14	2,9	50,260	12,410	Luby	Bb	54,399
25.03.2019	19:51:43	35	2,3	50,315	12,330	Markneukirchen	Bb	20,679
23.05.2019	09:13:10	39	1,9	51,343	10,489	Deuna	Spr1	11,408
19.06.2019	11:47:39	34	2,8	51,420	10,840	Sondershausen	Ind	7,270
17.09.2019	09:27:27	38	1,8	51,343	10,489	Deuna	Spr1	42,270
29.09.2019	10:32:53	33	1,5	51,300	10,590	Menteroda	Ind	495,234
02.10.2019	01:46:35	32	2,0	50,260	12,410	Luby	Bb	21,173
04.10.2019	01:08:41	2	0,9	51,080	12,150	Zeitz	Bb	1,484
11.10.2019	15:36:00	3	0,9	51,390	10,800	Sondershausen	Ind	3,706
12.10.2019	09:07:27	31	0,9	50,240	12,390	Luby	Bb	3,248
12.10.2019	16:35:03	4	1,0	50,460	12,110	Plauen	Bb	0,992
20.10.2019	19:43:49	5	0,3	50,270	12,430	Luby	Bb	0,631
22.10.2019	10:29:28	6	1,8	51,384	12,761	Lüptitz	Spr2	2,548
25.10.2019	15:46:23	9	1,9	50,440	13,620	Chomutov		
25.10.2019	19:19:19	7	1,7	50,410	10,220	Mellrichstadt		
25.10.2019	20:06:37	8	2,2	49,310	13,240	Opalka	Spr2	1,295
25.10.2019	22:53:05	11	1,0	50,350	12,400	Zwota	Bb	2,372
25.10.2019	23:08:09	10	2,6	50,400	10,230	Mellrichstadt	eBb	3,553
28.10.2019	14:03:05	13	0,6	50,452	12,225	Theuma	Spr2	2,054
28.10.2019	14:56:25	12	1,4	50,540	9,430	Großenlöder	Spr1	8,193
29.10.2019	08:00:18	15	2,1	49,080	10,940	Dietfurt	Spr1	0,419
29.10.2019	10:31:45	16	1,7	50,460	13,440	Chomutov	Spr1	0,65
29.10.2019	11:01:12	17	1,6	50,050	11,700	Bad Berneck	Spr2	1,531
29.10.2019	11:20:03	18	1,1	50,400	12,130	Bösenbrunn	Spr1	6,105
29.10.2019	12:19:16	19	1,8	51,000	13,160	Berbersdorf	Spr1	5,286
29.10.2019	13:02:32	20	1,6	51,210	12,530	Schleenhain	Spr2	1,094
29.10.2019	13:10:54	21	1,8	49,190	12,720	Beilngries	Spr2	0,735
29.10.2019	13:36:52	22	1,5	50,020	11,980	Tröstau	Spr2	2,551
29.10.2019	13:40:21	23	1,7	51,840	10,500	Huneberg	Spr1	4,682
30.10.2019	23:50:38	24	0,5	50,330	12,330	nördlich Markneukirchen	Bb	0,379
31.10.2019	15:27:34	25	1,3	49,045	12,596	Burgenlengenfeld	Spr1	2,191
01.11.2019	09:51:13	26	1,3	49,638	13,581	Horni Briza	Spr2	0,370
01.11.2019	09:54:07	27	0,9	50,590	11,390	Unterloquitz	Spr1	1,316
01.11.2019	10:07:43	28	1,8	50,510	13,790	Hammer-Unteresenthal	Spr1	0,620
01.11.2019	10:20:26	29	1,4	50,490	13,310	Chomutov	Spr1	0,403
02.11.2019	14:12:07	30	4,1	44,320	17,610	Bosnien	eBb	118,337
04.11.2019	01:00:05	36	3,4	48,200	9,010	Ebingen (B-Württemberg)	eBb	17,375
07.11.2019	13:11:08	37	2,2	50,783	10,032	Dietrichsberg	Spr1	43,189
08.11.2019	10:04:41	43	1,2	51,381	10,566	Deuna	Spr1	41,164
08.11.2019	10:50:19	46	0,6	50,550	12,400	Wildenau (Vgtl.)	Spr2	0,635
08.11.2019	11:02:04	40	3,8	53,740	15,260	Fiji	eBb	6,727
08.11.2019	14:01:02	45	1,8	51,148	13,118	nordöstlich Döbeln	Spr2	0,465
08.11.2019	14:44:00	48	1,7	49,020	12,360	Regensburg	Spr2	1,201
09.11.2019	19:43:30	50	1,3	51,281	10,637	Menteroda	Ind	27,790

Tab. 5.1-2: Zusätzliche Ereignisse aus dem Jahr 2022 im Südharzgebiet. Entfernungsangabe z.B.: Deuna (12 km nördlich): eigentlich Sprengung Deuna, aber 12km nördlich von Deuna automatisch geortet.

Abkürzungen: Spr1: Sprengung Typ 1; Spr2: Sprengung Typ 2; Bb: lokales Erdbeben; Ind: induziertes Erdbeben; eBb: entferntes Erdbeben; M_L s_3 , s_4 : automatische Magnituden; $maxx$ $1E-05$: Spektrales Maximum [$m/s * 100000$].

Datum	Herdzeit (UTC) [hh:mm:ss]	Id-Nr.	M_L s_4	Koordinate [°N]	Koordinate [°E]	Herdgebiet	Art	$maxx$ $1E-05$
21.06.2022	00:21:05	71	0,7	51,406	10,843	nordwestl. Sondershausen	Ind	6,000
02.07.2022	23:02:02	72	0,7	51,445	10,629	östlich Bleicherode	Ind	26,364
03.07.2022	11:30:01	73	0,7	51,297	10,637	westlich Ebeleben	Ind	91,636
02.08.2022	10:46:21	74	0,5	51,405	10,867	nördlich Sondershausen	Ind	4,909
04.08.2022	11:17:36,9	51	1,0	51,514	10,924	östlich Nordhausen	Spr2	3,091
05.08.2022	09:07:13	52	1,3	51,610	10,800	Unterberg	Spr2	38,164
06.08.2022	15:58:05	75	0,4	51,376	10,802	westlich Sondershausen	Ind	4,182
08.08.2022	10:01:15,2	53	1,3	51,749	10,774	Elbingerode (Hornberg)	Spr1	3,865
09.08.2022	14:06:32	76	0,5	51,300	10,548	südwestlich Menteroda	Ind	324,000
10.08.2022	08:16:53,0	54	1,7	51,242	10,662	Deuna (13 km südöstlich)	Spr1	176,527
10.08.2022	09:23:26,6	55	1,0	51,350	10,337	Kallmerode	Spr1	40,502
10.08.2022	10:06:25	56	1,6	51,633	10,844	Unterberg	Spr2	46,593
11.08.2022	10:24:47	57	1,1	51,701	11,192	Ballenstedt	Spr1	5,309
15.08.2022	09:58:55,2	58	1,9	51,750	10,820	Elbingerode (Hornberg)	Spr1	10,855
16.08.2022	10:28:10,1	59	1,6	51,740	10,747	Elbingerode (Hornberg)	Spr1	11,473
16.08.2022	10:54:43	60	1,8	51,850	10,540	Huneberg (Diabaswerk)	Spr1	11,800
18.08.2022	02:35:29	77	0,6	51,377	10,856	Sondershausen	Ind	5,273
18.08.2022	09:48:03,4	61	2,0	51,360	10,487	Deuna (12 km nördlich)	Spr1	292,689
19.08.2022	08:17:51,9	62	1,8	51,348	10,484	Deuna (0,5 km nördlich)	Spr1	151,944
19.08.2022	10:29:19	63	2,1	51,740	10,810	Hornberg (2 km südwestl.)	Spr1	25,709
21.08.2022	08:27:58	78	0,6	51,397	10,850	Sondershausen	Ind	4,727
24.08.2022	10:29:21,3	64	1,7	51,741	10,742	Hornberg (4 km südwestl.)	Spr1	8,945
04.09.2022	04:19:10,9	79	0,9	50,759	10,069	Unterbreizbach	Ind	1,008

5.1.4 Schlussfolgerungen

- ◆ Die spektralen Eigenschaften eines lokalen und induzierten Erdbebens sind ein zusätzliches geeignetes Mittel, diese als solche zu identifizieren. Bei lokalen Erdbeben ist das Bild des Spektrums bestätigend, bei induzierten Erdbeben erhärten deren Spektren einen dringenden Verdacht zur Zuordnung.
- ◆ Es muss bei der Interpretation der Spektren von lokalen und induzierten Erdbeben auf die umgebenden Sprengorte geachtet werden, bei induzierten Erdbeben ist eine Verwechslung mit ihnen wahrscheinlicher. Oft gelingt bei kleinen induzierten Ereignissen deren genaue Ortung nicht oder sie werden überhaupt nicht detektiert.
- ◆ Ist man zunächst nur auf die Bilder der detektierten Ereignisse über E-Mail angewiesen, so geben die Abbildungen der Spektren eine zusätzliche wichtige Information zur Identifikation des Ereignisses.

5.2 Das Erdbeben vom 9. Mai 2020 bei Chemnitz

LUTZ SONNABEND

Die übliche Beben­tätigkeit in der Region Sachsen konzentriert sich, wie in den vorangegangenen Artikeln beschrieben, auf die Schwarmbebenregionen im Vogtland und im Nordwesten der Tschechischen Republik (vgl. Abb. 2.1-7).

Auch außerhalb der Schwarmbebengebiete findet Beben­­tätigkeit statt, welche sich in einem ca. 40 km breiten, Nord-Süd-verlaufenden Band, der sogenannten Leipzig-Regensburg-Zone (LRZ), konzentriert. Diese Zone wird durch eine ausgeprägte Beben­­tätigkeit entlang zweier Störungsrichtungen charakterisiert. Die erste Bruchrichtung ist ca. Nord-Süd und die zweite Nordwest-Südost. Letztere wird auch als herzynische Störungsrichtung bezeichnet. Dass in dieser Region alle beiden Störungsrichtungen regelmäßig aktiviert werden, wurde z. B. in dem Forschungsprojekt des LfULG „Neotektonik und Seismizität in Westsachsen und Nordwestböhmen“ ausführlich dargestellt (SONNABEND 2022, SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE 2019). Die Konzentration der Beben liegt dabei stets an den Kreuzungspunkten von Störungen beider Bruchrichtungen. Einer dieser Kreuzungspunkte liegt z.B. im Raum Gera, wo die NW-SO-verlaufende Gera-Jachimov-Zone die LRZ schneidet oder nahe Novy Kostel wo sich die Mariánské Lázně Fault Zone (MLZ) und die Počátky Plesná Fault Zone (PPZ) schneiden. Die zusätzliche Existenz von hydrothermalen Wässern und Gasen führt zur Entstehung der berühmten Schwarmbeben in dieser Region.

Das Gebiet östlich der LRZ tritt in Sachsen seismisch nur sehr selten in Erscheinung. Umso interessanter sind entsprechende Beben, die nicht dem üblichen Erdbebengeschehen entsprechen.

Am 09. Mai 2020 um 20:50 MEZ (18:50 UTC) ereignete sich ein solches nicht übliches Beben nördlich von Chemnitz. Dessen automatische Ortung wurde im Kapitel 4.1 schon beschrieben. An dieser Stelle soll eine kurze Einordnung des Bebens in das tektonische Gesamtgeschehen versucht werden.

Ortungsergebnis (vgl. Tab. 2.1-1):

Herdzeit:	20:50 MEZ (18:50 UTC)
Magnitude:	1,8
Tiefe:	6,5 km
Geogr. Breite:	50,875
Geogr. Länge:	12,867

Das Beben war das stärkste in Sachsen im Jahr 2020, welches keinen Schwarmbebenbezug hatte. Um eine genaue Vorstellung

von dem Bruchvorgang zu erhalten, wurden für das Beben mehrere sogenannte Herdflächenlösungen berechnet. Dazu wird aus der Schwingungsrichtung der Erdbebenwellen eine Bewegungsrichtung entlang der Bruchfläche geschlussfolgert. Zur Darstellung der Bewegungsrichtung werden Kugeln / Kreise verwendet, bei denen Druck (Kompression) durch eine dunkle Farbe und Dehnung (Zug) weiß dargestellt wird. Die Trennlinien zwischen den Farben sind mögliche Bruchflächen, die rechtwinklich aufeinander stehen. Eine Herdflächenlösung hat immer zwei mögliche Bruchflächen. Welche Bruchfläche tatsächlich aktiviert wurde, muss aus dem Kontext geschlussfolgert werden.

Es stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, um solche Herdflächenlösungen zu generieren. Am Observatorium Collm wird eine Ersteinsatzpolarisationsanalyse durchgeführt. Zusätzlich wurde eine vollständige Wellenforminversion für dieses Beben gerechnet. Dabei handelt es sich um ein Verfahren welches für schwache lokale Beben erst kürzlich adaptiert wurde. Dieses Verfahren wurde auch schon für weitere Beben in der LRZ angewendet und hat sich als sehr zuverlässig erwiesen (SONNABEND 2022). Erfreulicherweise konnte mit beiden Verfahren eine nahezu identische Lösung erzeugt werden (Abb. 5.2-1).

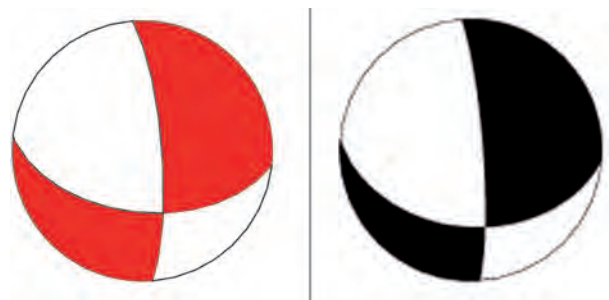


Abb. 5.2-1: Vergleich der Herdflächenlösung des Bebens bei Chemnitz aus der Momententensorinversion (links) mit dem Ergebnis, das Dr. Wendt am Collm durch Ersteinsatzanalyse errechnet hatte (rechts).

Das Beben unterscheidet sich von anderen Beben entlang der LRZ, speziell in der Vogtlandregion augenscheinlich (vgl. Abb. 5.2-3). Interessanterweise ist der Herdmechanismus fast identisch zum Beben Markranstädt von 2017 (Abb. 5.2-2). Dieses Beben wurde von DAHM et al. (2018) ausführlich beschrieben und ebenfalls mit Momententensorinversionen belegt. In jenem Aufsatz wurde eine längere NW-SO-streichende Störungszone angenommen, die das Beben von 2017 bei Mar-

Markranstädt mit dem Beben von Gröbers im Jahr 2015 verbindet. Das Beben von Chemnitz liegt ungefähr in der Verlängerung dieser angenommenen Störungszone. Weiterhin wurde für ein Beben nahe Regis-Breitungen 2003 eine ganz ähnliche Herdlösung erzielt und dieses liegt ebenfalls auf dieser Achse. Dass es sich dabei um eine durchgehende aktive Störungszone von Halle bis Chemnitz handelt, ist unwahrscheinlich und auch nicht belegbar. Aber diese Beben liegen offensichtlich auf alten herzynischen Störungen und werden durch die Aktivitäten entlang der Leipzig-Regensburg-Zone wohl regelmäßig aktiviert.

Ein weiteres Beben, welches eine ganz ähnliche Herdflächenlösung zeigt, lag etwa 13 km südlich von Zeitz. Dieses Beben ereignete sich am 29. August 2015 um 18:11 Uhr MEZ (16:11 UTC) und hatte eine Magnitude von 2,2. Auch dieses Beben lag nicht in dem Bereich der inneren Leipzig-Regensburg-Zone, welche durch die Aktivierung von Nord-Süd-verlaufenden Bruchvorgängen charakterisiert ist.

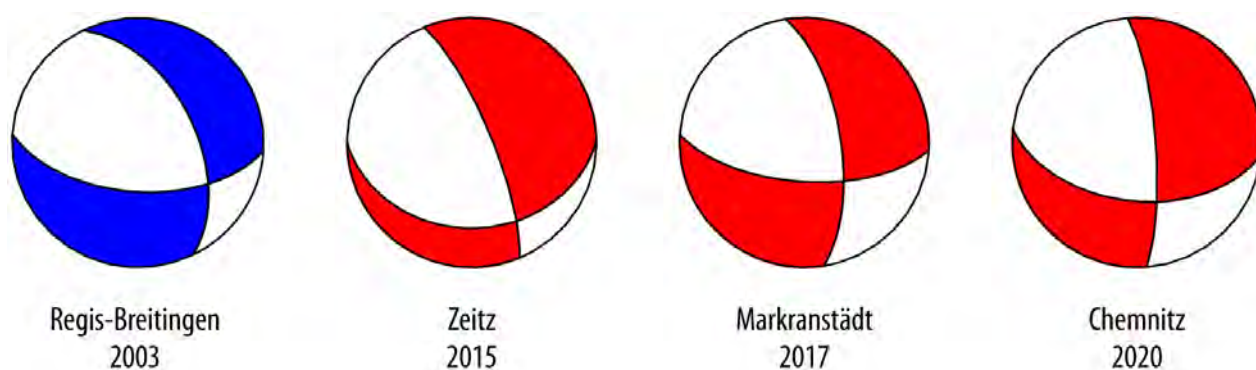


Abb. 5.2-2: Vergleich der Herdflächenlösungen für die Erdbeben bei Regis-Breitungen 2003, Zeitz 2015, Markranstädt 2017 und Chemnitz 2020. Diese Beben zeigen eine ähnliche Herdflächenlösung. Herdflächenlösungen aus MT-Inversion (rot), Lösung aus der Ersteinsatzpolaritätsanalyse (blau).

Zusammenfassend kann hier gesagt werden, dass das Beben von Chemnitz ein besonderes Ereignis war. Solche tektonischen Einzelbeben können in der Umgebung der Leipzig-Regensburg-Zone immer wieder vorkommen. Mit Magnituden zwischen 2 und 3 waren ähnliche Beben in den Randbereichen der LRZ auch durch die Bevölkerung deutlich wahrnehmbar. Durch die fortlaufende Berechnung neuer Herdflächenlösungen zukünftiger Beben können diese Einzelbeben wertvolle Hinweise zum Verständnis der (Neo-)Tektonik in der Region liefern, welche im Nachgang für seismische Risikobewertungen und für zukünftige Bauplanung, z. B. für große Infrastrukturprojekte verwendet werden können.

Literatur

SONNABEND, L. (2022): Neotektonik und Seismizität in Westsachsen und Nordwestböhmen.— <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:15-qucosa2-810029>.

SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE [HRSG.] (2019): Erdbebenbeobachtung in Mitteldeutschland. Dreijahresbericht 2016–2018.— 66 S.; Dresden.

DAHM, T.; HEIMANN, S.; FUNKE, S.; WENDT, S.; RAPPILBER, I.; BINDI, D.; PLENEFISCH, T. & COTTON, F. (2018): Seismicity in the block mountains between Halle and Leipzig, Central Germany:

centroid moment tensors, ground motion simulation and felt intensities of two $M \sim 3$ earthquakes in 2015 and 2017.— *J. Seismol.*, <https://doi.org/10.1007/s10950-018-9746-9>.

KORN, M., FUNKE, S. & WENDT, S. (2008): Seismicity and seismotectonics of West Saxony, Germany – new insights from recent seismicity observed with the Saxonian seismic network.— *Studia Geophysica et Geodaetica* 52(4).

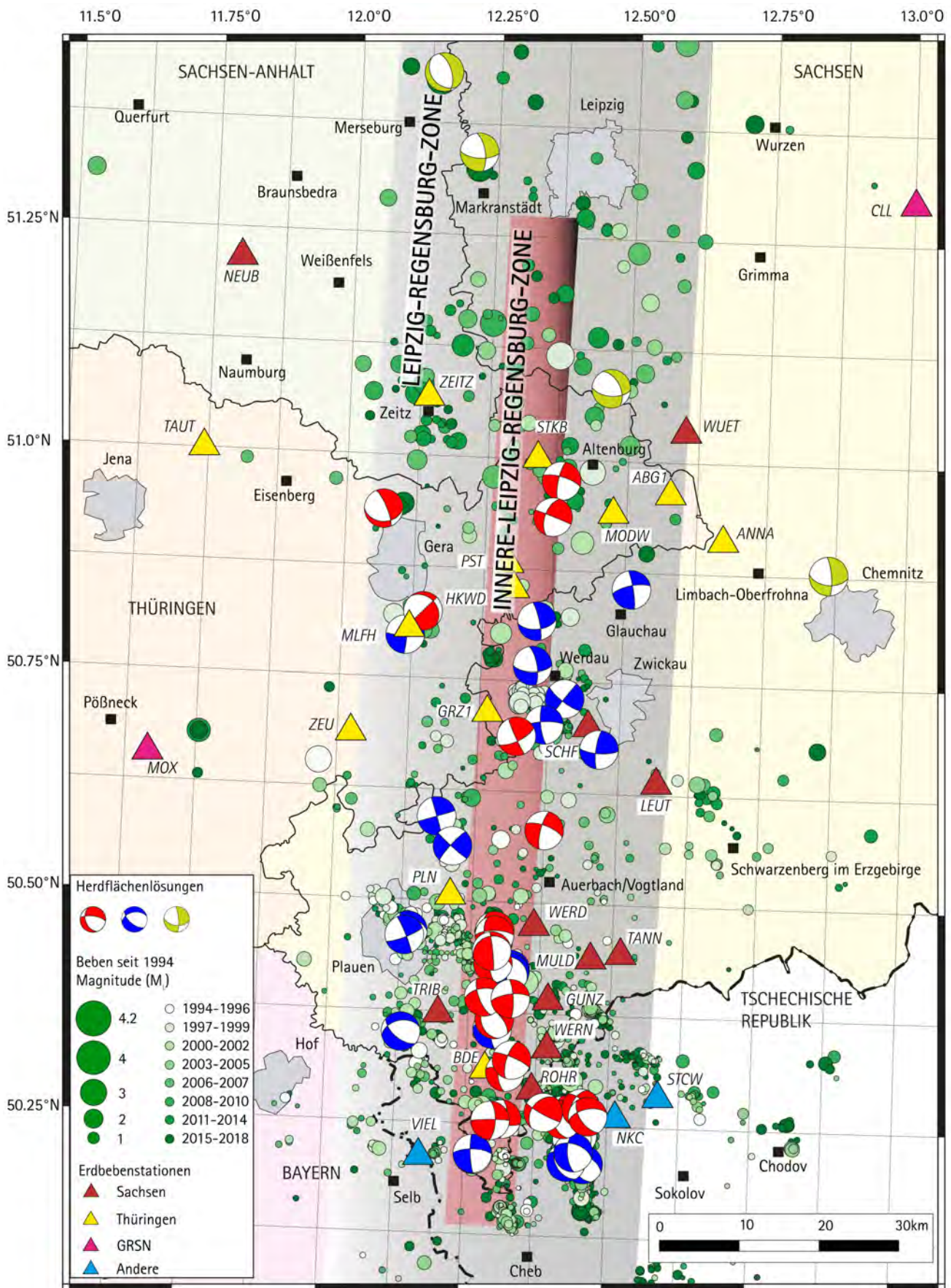


Abb. 5.2-3: Darstellung aller errechneten Herdflächenlösungen aus MT-Inversion (rot) und Vergleich mit allen Lösungen aus der Erstein-satzpolaritätsanalyse von Korn et al. (2008) (blau). Die Mehrzahl der N-S-streichenden Herdflächen ist in einem ca. 5 km breiten Band im Zentrum der Leipzig-Regensburg-Zone (LRZ), der inneren LRZ (rot schattiert), konzentriert. Die Beben bei Gröbers, Markranstädt, Regis-Breitungen und Chemnitz (gelbgrün) könnten entlang einer größeren Struktur aufgereiht sein. Dies ist allerdings nicht gesichert feststellbar. Auffällig ist die Ähnlichkeit der Herdflächenlösungen im Osten der LRZ (Chemnitz) und im Westen bei Zeitz.

Begriffserklärungen

Automatische Auswertung	Bei der automatischen Auswertung werden die Signale der seismischen Messstationen kontinuierlich ausgewertet und bei Beben die Herdkoordinaten ermittelt. In Mitteldeutschland wird das automatische Ortungssystem ↗SeisComp3 verwendet. Auf Grund der ausschließlich technischen Auswertung sind Fehlbestimmungen nicht ausgeschlossen. Daher müssen die Ergebnisse durch die manuelle Auswertung eines erfahrenen Seismologen bestätigt werden.
b-Wert	Der b-Wert gibt die Steigung der Magnitudenhäufigkeitsverteilung, d.h. das Verhältnis von kleinen zu großen Beben innerhalb einer Region an. Das zahlenmäßige Verhältnis von kleinen zu großen Beben weist charakteristische Unterschiede in den einzelnen Regionen auf.
Bodenunruhe, mikroseismisch	mehr oder weniger quasistationäre, relativ kurzperiodische Bodenbewegung, die vorwiegend durch die Tätigkeit des Menschen wie Industrie und Verkehr hervorgerufen wird (auch als Rauschen bezeichnet), stört die seismischen Aufzeichnungen
Cluster	eine Anzahl von gleichartigen Ereignissen, die räumlich oder zeitlich eng beieinander liegen
EMS	Europäische Makroseismische Skala, 1998 eingeführt, ↗Intensität
Epizentralintensität I_0	maximale Schütterwirkung an der Erdoberfläche
Epizentralentfernung D	Entfernung eines Punktes der Erdoberfläche vom ↗Epizentrum
Epizentrum	senkrechte Projektion der Lage des ↗Hypozentrums auf die Erdoberfläche
Erdbebengefährdung	statistisch ermittelte Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Erdbebens einer bestimmten Stärke
Erdbebenkatalog	Zusammenstellung von Erdbeben, die nach bestimmten Gesichtspunkten (z. B. Fühlbarkeit, Schadenswirkungen, Magnitude, Region) für Einzelaussagen und statistische Bearbeitung ausgewählt worden sind. Unter regionalen Gesichtspunkten gibt es u.a. den Katalog für Deutschland einschließlich seiner Randgebiete sowie den für das Vogtland.
Erdbebenschwarm	Er besteht aus vielen Ereignissen, den ↗Schwarmbeben. Sie ereignen sich innerhalb einer kurzen Zeitspanne und die Herde konzentrieren sich auf ein kleines Volumen. Die Mehrzahl von ihnen ist sich ähnlich bezüglich des Herdvorgangs. Das energiestärkste ↗Hauptbeben, hebt sich wenig von den weiteren Beben mit vergleichbarer Energie ab.
Erdbebenserie	Das ist eine Folge von Erdbeben, die im zeitlichen Zusammenhang mit einem ↗Hauptbeben steht. Zu ihr gehören vergleichsweise wenige ↗Vorbeben, das ↗Hauptbeben und viele ↗Nachbeben. Im Gegensatz zum ↗Erdbebenschwarm ist die Magnitude des Hauptbebens deutlich größer als die der begleitenden Beben.
Erdbebenzone	Gebiet, in dem sich Erdbeben besonders konzentrieren. Weltweite Hauptzonen sind die zirkumpazifische, die mediterran-transasiatische und die mittelozeanische Zone.
GRSN	German Regional Seismological Network (Deutsches Regionalnetz seismologischer Breitbandstationen)
Hauptbeben	stärkstes Erdbeben einer ↗Erdbebenserie

Herddaten	Angaben zur Zeit (↗Herdzeit), zum Ort (Koordinaten des ↗Epizentrums), zur Tiefe (↗Herdtiefe) des ↗Hypozentrums und zur Energie (↗ Magnitude oder/und ↗Moment) eines seismischen Ereignisses
Herdflächenlösungen	sind aus Azimut (Streichen), Einfallswinkel (Fallen) und Schwingungsrichtung des ersten Einsatzes der eintreffenden Wellen an mehreren Stationen bestimmte Darstellungen für den Herdmechanismus. Die Diagramme (Beachbälle) zeigen den zugrundeliegenden Störungsmechanismus: Aufschiebung, Abschiebung oder Horizontalverschiebung (↗Strike-Slip).
Herdtiefe	Tiefe des Erdbebenherdes unter der Erdoberfläche. Weltweit unterscheidet man zwischen Flachbeben (bis 70 km tief), mitteltiefen Beben (zwischen 70 und 300 km) und Tiefbeben (tiefer als 300 km)
Herdzeit	bei natürlichen Erdbeben nur nachträglich bestimmbarer Beginn des Herdprozesses, bei Sprengungen und Explosionen der direkt messbare Zeitpunkt der Auslösung
Hypozentrum	räumliche Lage des punktförmig angenommenen Erdbebenherdes, wird mit Hilfe der Auswertungen von mindestens vier Seismogrammen bestimmt
Induzierte Seismizität	umfasst durch menschliche Aktivitäten verursachte Erdbeben z. B. infolge untertägigen Bergbaus, der Anlage von Stauseen, des Einpressens von Fluiden in den Untergrund oder von Sprengungen und Nukleartests
Intensität	beschreibt, wie Erdbeben durch Menschen wahrgenommen werden oder sich auf Gebäude und Natur ausgewirkt haben. Diese Einschätzung ist subjektiv. Teilobjektivierung erfolgt durch die Einordnung in eine ↗Intensitätsskala
Intensitätsskala	mit ihrer Hilfe wird die beobachtete ↗Intensität in 12 Stufen klassifiziert, ↗MSK-Skala, ↗EMS-Skala
Magnitude	von Charles Richter 1935 eingeführt (↗Richter-Skala). Wird aus der gemessenen Erschütterungsamplitude berechnet. Ursprünglich für relativ nahe Beben definiert. Für Entfernungen bis 1000 km wird eine sogenannte Lokalmagnitude (M_L) bestimmt. Zum Vergleich weiter entfernter Beben wird die Raumwellenmagnitude (m_B) benutzt. Die Magnitude steht in einer Beziehung zur seismischen Energie, die bei einem Erdbeben freigesetzt wird. Ganz nahe schwache in Herdnähe beobachtete Beben können negative Magnituden haben. Für die stärksten Beben, die nur sehr selten an wenigen Stellen der Erde auftreten, wurden Magnituden bis 9,5 berechnet.
Makroseismik	Sammlung und Bewertung der vom Menschen gefühlten Wirkungen eines Erdbebens und der sichtbaren Auswirkungen auf Gebäude und Natur – da ohne instrumentelle Grundlage subjektiv beeinflusst
MEZ	Mitteleuropäische Zeit; MEZ = ↗UTC + 1 Stunde
MESZ	Mitteleuropäische Sommerzeit = ↗UTC + 2 Stunden
Mikroseismik	Schwache seismische Wellen. (1) Im Gegensatz zur Makroseismik alle Methoden, die auf der instrumentellen Aufzeichnung von Erdbeben beruhen. (2) Bodenumruhe/seismisches Rauschen ausgelöst durch Verkehr, Industrie und Windkraftanlagen, aber auch die Fernwirkung der Brandung an den Meeresküsten und teilweise der Erdgezeiten.
Moment, seismisches	Produkt aus der Scherfestigkeit des Gesteins, in dem das Erdbeben stattfindet, der Größe der Bruchfläche des Erdbebens und der mittleren Verschiebung entlang der Bruchfläche. Es ist ein Maß für die Bebenstärke.
Monitoring	ständige Beobachtung
MSK	In Europa weit verbreitete Skala zur Klassifizierung von beobachteten ↗Intensitäten. 1964 von Medwediev (Moskau), Sponheuer (Jena) und Karnik (Prag) veröffentlicht.
Nachbeben	schwächere Erdbeben, die sich in einer ↗Erdbebenserie nach dem Hauptbeben ereignen
Raumwellen	sind elastische (seismische) Wellen, die sich durch das Erdinnere ausbreiten. Sie können als Kompressionswelle (P-Welle oder Longitudinalwelle – breitet sich im Vergleich zu anderen Wellen am schnellsten aus, die Bodenteilchen werden in Ausbreitungsrichtung

der Welle bewegt) oder als Scherwelle (S-Welle oder Transversalwelle, die Bodenteilchen schwingen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle) auftreten. Im Gegensatz zu Raumwellen breiten sich Oberflächenwellen immer entlang der Erdoberfläche aus und klingen mit der Tiefe ab.

Richter-Skala	für Erdbeben, basierend auf Amplituden von Seismogrammaufzeichnungen, Definition der ↗Magnitude durch Charles Richter
Schüttergebiet	Fläche, in der ein Beben gespürt worden ist
Schütterradius	mittlerer Radius des ↗Schüttergebietes
Schwarmbeben	↗Erdbebenschwarm
SeisComP3	“Seismological Communication Processor” („Erdbebenmeldeanlage“), Softwarepaket des Helmholtz-Zentrums Geoforschungszentrum Potsdam. Durch den modularen Aufbau der Software kann sie viele Teilaufgaben bei der Erfassung und Überwachung der Erdbeben-tätigkeit übernehmen, z.B. Erfassung, Speicherung und Bereitstellung der kontinuierlichen elektronischen Seismogramme an der Erdbebenstation, zeitnahe Übertragung der elektronischen Seismogramme ins Leipziger Datenzentrum, Weitergabe der elektronischen Seismogramme an weitere Datenzentren, automatische Erkennung von Erdbeben (De- tektion) und deren Ortung, manuelle Nachauswertung, automatische Alarmierung aus- gewählter Erdbeben, z.B. per E-Mail und SMS, Archivierung der kontinuierlichen elektro- nischen Seismogramme sowie der automatischen und manuellen Auswertergebnisse
Seismik	Verfahren zur Feststellung von Form, Lage und Eigenschaften geologischer Körper (bevor- zugt Lagerstätten, Baugrund) mit künstlich angeregten elastischen Wellen (durch Spreng- ung, Schlag, Vibration); häufig auch als Sprengseismik bezeichnet
Seismisches/seismologisches Netz	mehrere ↗seismische Stationen, die meist an mehreren Orten für ein gemeinsames For- schungs- bzw. Beobachtungsziel betrieben werden
Seismische/seismologische Station	Messstelle zur Aufzeichnung von natürlichen Erderschütterungen
Seismizität	Bezeichnung für die Erdbeben-tätigkeit in Raum, Zeit und nach freigesetzter Energie, meist auf ein bestimmtes Gebiet bezogen
Seismograf	Messgerät zur Registrierung von Bodenbewegungen. Er besteht (1) aus dem ↗Seismo- meter und (2) dem Aufzeichnungssystem in Form einer Anzeige und/oder Speicherung des Signals.
Seismogramm	analoge oder digitale Aufzeichnung der Bodenbewegung, erhalten von einem ↗Seismo- grafen, als Funktion der Zeit
Seismologie	(griech. seismos = Erderschütterung): Erdbebenkunde; Wissenschaft von Erdbeben; Teil- gebiet der Geophysik
Seismometer	bestehend aus (1) einem seismischen Sensor, der auf die Bodenbewegung reagiert und (2) einem Wandler, der diese Reaktion in ein Signal für die Aufzeichnung transformiert
Störung	Trennfuge im Gesteinsverband, an der eine Verstellung angrenzender Schollen stattge- funden hat
Strike-Slip	Horizontalverschiebung (Seitenverschiebung, Blattverschiebung). Tektonische Störung, bei der die Schollen ohne Höhenversatz aneinander vorbeigleiten.
SXNET	seismologisches Sachsenetz mit den Stationen von Sachsen-Anhalt
TSN	Thüringer Seismologisches Netz
UTC	(Abkürzung für engl. Universal Time Coordinated = »Koordinierte Weltzeit«): früher GMT (Greenwich Mean Time = »mittlere Greenwich-Zeit«). Sie ist auf den Nullmeridian, der durch Greenwich verläuft, bezogen. Koordinierung bedeutet, dass bei Notwendigkeit Schaltsekunden eingefügt werden. UTC ↗MEZ -1 Stunde
Vorbeben	schwächere Erdbeben, die sich in einer ↗Erdbebenserie vor dem Hauptbeben ereignen

Europäische Makroseismische Skala (EMS)

- Kurzform -

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

Fragebogen zur Erdbebenbeobachtung

Wichtige Größen für die Einschätzung eines Erdbebens sind die Ausdehnung des Schüttergebietes und die Intensität. Ziel ist die (subjektive) Bewertung der Stärke eines Bebens aus den Wahrnehmungen von Personen und den beobachteten Auswirkungen auf Natur und Gebäude. Dabei sind Wissenschaftler und Behörden nach einem Erdbeben auf die Unterstützung durch die Bevölkerung angewiesen.

Zur Meldung der Beobachtungen zu Erdbebenwirkungen kann der nebenstehende Fragebogen verwendet und an eine der unten aufgeführten Institutionen gesendet werden. Bitte teilen Sie mit, was Sie bemerkt haben und gegebenenfalls, was andere in Ihrer Nähe bemerkt haben, z. B. im selben Gebäude oder in der Nachbarschaft. Berücksichtigen Sie jedoch keine Auswirkungen von anderen Orten und keine Auswirkungen, über die Sie in den Nachrichten gelesen oder gehört haben. Auch wenn Sie das Erdbeben nicht wahrgenommen haben, ist dies eine wichtige Information. Das Ausfüllen des Fragebogens ist freiwillig. Es werden keine personenbezogenen Daten erfasst. Zur Beantwortung benötigen Sie ca. 4 Minuten.

Bitte senden Sie den ausgefüllten Fragebogen an eine der am Seismologie-Verbund Mitteldeutschlands beteiligten Institutionen:

Sächsisches Landesamt für Umwelt,
Landwirtschaft und Geologie
Postfach 54 01 37
01311 Dresden
Poststelle.LfULG@smekul.sachsen.de

Thüringer Landesamt für Umwelt,
Bergbau und Naturschutz
Göschwitzer Straße 41
07745 Jena
poststelle@tlubn.thueringen.de

Landesamt für Geologie und Bergwesen
Sachsen-Anhalt
An der Fliederwegkaserne 13
06130 Halle
poststelle.lagb@sachsen-anhalt.de

Universität Leipzig
Geophysikalisches Observatorium Collm
04779 Wermsdorf
wendt@rz.uni-leipzig.de
pbuchholz@rz.uni-leipzig.de

TU Bergakademie Freiberg
Observatorium Berggießhübel
Giesensteiner Straße 8
01816 Bad Gottleuba OT Berggießhübel
brg@geophysik.tu-freiberg.de

Friedrich-Schiller-Universität Jena
Institut für Geowissenschaften
Burgweg 11
07749 Jena
geowissenschaften@uni-jena.de

Erdbeben-Fragebogen

Dieser Fragebogen erfasst Angaben über die Auswirkungen eines Erdbebens. Bitte teilen Sie mit, was Sie bemerkt haben und gegebenenfalls, was andere in Ihrer Nähe bemerkt haben, z. B. im selben Gebäude oder in der Nachbarschaft. Berücksichtigen Sie jedoch keine Auswirkungen von anderen Orten und keine Auswirkungen, über die Sie in den Nachrichten gelesen oder gehört haben. Auch wenn Sie das Erdbeben nicht wahrgenommen haben, ist dies eine wichtige Information.

Das Ausfüllen des Fragebogens ist freiwillig. Es werden keine personenbezogenen Daten erfasst. Zur Beantwortung benötigen Sie ca. 4 Minuten.

Datum des Erdbebens: [.....]

Uhrzeit: [.....]

Haben Sie das Erdbeben wahrgenommen?

- Ja – Bitte füllen Sie alle Abschnitte aus
 Nein – Bitte füllen Sie nur Abschnitt A aus

Abschnitt A – Aufenthaltsort

1. Wo befanden Sie sich zum Zeitpunkt des Erdbebens?

Adresse (Postleitzahl, Ort, evtl. Ortsteil, Straße, Hausnummer, ggf. Land)

.....

- Im Freien
 In einem stehenden Fahrzeug
 In einem Gebäude; Wenn ja, in welchem Stockwerk?
 In einem fahrenden Fahrzeug Sonstiges

2. Was taten Sie?

- Sitzen / Liegen
 Schlafen und nicht erwacht
 Stehen / In Bewegung
 Schlafen und erwacht

3. Haben andere Personen in der Nähe das Erdbeben wahrgenommen?

- Niemand bemerkte es
 Wenige oder einige Personen bemerkten es (weniger als 20 %)
 Viele Personen bemerkten es (20 % bis 50 %)
 Die meisten Personen bemerkten es (mehr als 50 %)
 Ich weiß nicht, ob andere Personen es bemerkt haben / Es war niemand in der Nähe

Abschnitt B – Auswirkungen auf Menschen

4. Was beschreibt Ihre Wahrnehmungen am besten?

- Nichts wahrgenommen
 Geräusch gehört, aber keine Erschütterung gespürt
 Sehr schwache Erschütterung
 Schwache Erschütterung
 Mäßig starke Erschütterung
 Starke Erschütterung
 Sehr starke Erschütterung

5. Wie haben Sie reagiert?

- Keine Reaktion
 Sehr schwache Reaktion
 Schwache Reaktion
 Leicht erschrocken
 Sehr erschrocken
 Panik

6. Ist jemand in Ihrer Nähe aus Angst ins Freie gelaufen?

- Niemand
 Wenige oder einige (weniger als 20 %)
 Viele (20 % bis 50 %)
 Die meisten (mehr als 50 %)
 Ich weiß nicht

7. War es schwierig zu stehen oder gehen?

- Nein
 Ja
 Ich weiß nicht

Abschnitt C – Auswirkungen auf Gegenstände, Gebäude, usw.

8. Haben Sie Folgendes bemerkt?

	Nein	Sehr gering / Einzelne	Gering / Wenige	Mäßig / Einige	Stark / Viele	Sehr stark / Die meisten	Ich weiß nicht
Fenster / Türen klapperten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Geschirr oder andere Gegenstände klapperten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Gegenstände pendelten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Türen schlugen auf und zu	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bilder wurden verschoben	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bilder fielen von der Wand	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kleine Gegenstände wurden verschoben oder fielen um	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bücher oder andere Gegenstände fielen aus Regalen o.ä.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Möbel wurden verschoben	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Möbel fielen um	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

9. Haben Sie die folgenden Gebäudeschäden festgestellt?

	Nein	Sehr gering / Einzelne	Gering / Wenige	Mäßig / Einige	Stark / Viele	Sehr stark / Die meisten	Ich weiß nicht
Risse im Innenputz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Herabgefallener Wand- oder Deckenputz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Herabgefallene Deckenverkleidung / Lampen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Risse in Außenwänden	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Gesprungene oder zerbrochene Fenster	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Beschädigte Schornsteine	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Aus welchem Material ist das Gebäude hauptsächlich gebaut?

- Mauerstein Naturstein Beton Stahl Holz Anderes / unbekannt
 Baujahr 1950 oder jünger? Baujahr älter als 1950?

10. Haben Sie größere strukturelle Schäden festgestellt wie Einsturz von Wänden, Abtrennen von Gebäudeteilen, Versatz des Gebäudes vom Fundament, Einsturz von Gebäuden?

- Nein Ja Ich weiß nicht

11. Haben Sie Schäden an frei stehenden Mauern (Garten, Feld) oder Ähnlichem festgestellt?

- Nein Sehr gering / Einzelne Gering / Wenige Mäßig / Einige
 Stark / Viele Sehr stark / Die meisten Ich weiß nicht

12. Haben Sie weitere Hinweise zu den Auswirkungen des Erdbebens, die nützlich sein könnten?

.....

.....

Stand November 2013. Arbeitskreis Seismologische Auswertung der Arbeitsgruppe Seismologie des Forschungskollegiums Physik des Erdkörpers (FKPE). Auf Grundlage des „Earthquake Questionnaire“ der European Seismological Commission Working Group „Macroseismology“.

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: + 49 351 2612-0
Telefax: + 49 351 2612-1099
E-Mail: lfulg@smekul.sachsen.de
www.lfulg.sachsen.de

Redaktion, Gestaltung und Satz:

Ivo Rappsilber

Autoren:

Petra Buchholz, Sigward Funke, René Voigt, Siegfried Wendt
(Universität Leipzig, Institut für Geophysik und Geologie)
Falk Hänel
(TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geophysik und Geoinformatik)
Thomas Burghardt, Marcel van Laaten, Dirk Schönwald, Ulrich Wegler
(Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Geowissenschaften)
Lutz Sonnabend
(Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie)
Jörg Martin, Ina Pustal
(Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz)
Ivo Rappsilber
(Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt)

Kartographie:

Michaela Kirsch
(Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie)

Titelbild:

Epizentrenkarte des Bebens bei Chemnitz am 9. Mai 2020:
51 Erdbebenstationen haben zum Ortungsergebnis beigetragen

Redaktionsschluss:

31. 10. 2023

Druck:

Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation Thüringen
1. Auflage

Auflagenhöhe:

600 Exemplare

Bezug:

www.publikationen.sachsen.de

Verteilerhinweis:

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben. Sie darf weder von politischen Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinahme des Herausgebers zu Gunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.

Die Gelder für die Veröffentlichung werden aus Steuermitteln auf Grundlage des von den Abgeordneten des Sächsischen Landtags beschlossenen Haushaltes bereitgestellt.

Copyright:

Diese Veröffentlichung ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die des Nachdruckes von Auszügen und der fotomechanischen Wiedergabe, sind dem Herausgeber vorbehalten.

