

Status der Erdbebenüberwachung und Auswertungen von Bodenbewegungsdaten für Schleswig-Holstein und Umgebung

Bericht zur Kooperation 2019

Dr. Christian Weidle^{ID}, Dr. Henriette Sudhaus^{ID}, Felix Eckel^{ID},
Dieter Hoogestraat^{ID}, Jonas Liebsch^{ID}, Alison Seidel^{ID}, Michael Sell,
Dipl.-Ing. Detlef Schulte-Kortnack, Prof. Dr. Thomas Meier
*Institut für Geowissenschaften, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel,
Otto-Hahn-Platz 1, 24118 Kiel*

Dipl.-Geophys. Andreas Omlin
*Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und Ländliche Räume (LLUR)
Abteilung Geologie und Boden - Geologischer Dienst SH (SDG)
Hamburger Chaussee 25, 24220 Flintbek*

Beiträge zur seismologischen Überwachung in Norddeutschland

Nº 02, 2020

Weidle, C. et al.: Status der Erdbebenüberwachung und Auswertungen von Bodenbewegungsdaten für Schleswig-Holstein und Umgebung: Bericht zur Kooperation 2019.

ISSN 3052-7236

DOI 10.38071/2025-00967-7

Herausgegeben von

Institut für Geowissenschaften, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Veröffentlicht am 8. Juni 2020,
... online am 11. August 2025



Dieses Dokument ist unter der Creative-Commons-Lizenz CC BY-SA 4.0 veröffentlicht.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Status Stationsnetz 2019	3
2.1 Permanent-Stationen	3
2.1.1 Standortsuche Dänischer Wohld	4
2.2 Vergleich der Rauschbedingungen an Permanent-Stationen in SH mit anderen Stationen in Norddeutschland	6
2.3 Temporäre Stationsnetze	8
2.4 Arbeiten ausserhalb SH	8
3 Auswertung Datenzentrum	9
3.1 Internationaler Datenaustausch	10
4 Ereignisübersicht 2019	11
4.1 Überregionale Seismizität	11
4.2 Seismische Ereignisse in SH	13
5 Auswertung des lokalen Bad Segeberg Netzes	18
5.1 Auftreten der Ereignisse	20
5.2 Signal-Rausch Verhältnis und Amplituden	20
5.3 Dauer	21
5.4 Ähnlichkeit	23
5.5 Korrelation mit externen Faktoren	23
5.6 Fazit	24
6 Vergleich historischer Erdbebenkataloge für den Bereich der südwestlichen Ostsee	27
6.1 FENCAT - historischer Erdbebenkatalog für Fennoskandinavien	27
6.2 Historische Ereignisse im Zeitraffer	28
6.2.1 Ereignisse vor 1900	28
6.2.2 Ereignisse vor 1960	28
6.2.3 Ereignisse vor 1980	29
6.2.4 Ereignisse vor 1990	29
6.2.5 Ereignisse vor 2000	31
6.3 Diskussion	31
7 Auswertung von historischen Nivellementdaten	33
8 Auswertung von ERS-Daten des Terra firma-Projekts	39

9 Auswertung der 2. Teillieferung des Bodenbewegungsdienstes	46
9.1 Lokale Kalibrierung der Messungen	46
9.1.1 DLR-Hinweise	47
9.1.2 Eingrenzung des Untersuchungsgebietes	47
9.1.3 Wahl eines Referenzpunktes	48
9.1.4 Kalibrierung	52
9.1.5 Varianzen	55
9.1.6 Ergebnis der Kalibrierungen	56
9.2 Auswertung von ascending (TL2) und descending (TL1) Daten bezüglich vertikaler und horizontaler Bewegungen (CAU Kiel)	57
9.3 Auswertung von Signalen an einem Kavernenspeicher	61
9.4 Profilschnitte entlang der Flensburg-Sieverstedter Störungszone	64
10 Zusammenfassung und Ausblick	71
Literatur	75
A Abbildungsverzeichnis	79
B Tabellenverzeichnis	81

1 Einleitung

Im Rahmen der Zusammenarbeit zwischen dem Geologischen Dienst SH (SGD) im Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (LLUR) und dem Institut für Geowissenschaften (IfG) der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel lagen die Schwerpunkte im Jahr 2019 auf der Einrichtung einer systematischen Auswertung seismischer Ereignisse am Datenzentrum des IfG, der Auswertung lokaler Ereignisse um das Bad Segeberg Netz und der Aufarbeitung historischer Erdbebenkataloge im südwestlichen Ostseeraum.

Das seismologische Stationsnetz in Schleswig-Holstein ist durch die erfolgreiche Kooperation zwischen dem SGD und dem IfG von ehemals zwei Stationen in 2012 auf mittlerweile 16 Stationen angewachsen. Der Betrieb dieses Netzes ist somit zunehmend aufwändiger geworden, vor allem da ein Großteil der temporären Stationen über keinen Fernzugriff verfügen. Die Daten müssen somit lokal abgeholt und manuell ins Archiv eingepflegt werden. Deshalb wurde in 2019 begonnen, weitere Stationen sukzessive mit LTE-Routern zu erweitern, um einerseits eine Datenübertragung in Echtzeit zu ermöglichen, andererseits bedarfsgerechter Stationen mit technischen Problemen besuchen zu können. Des Weiteren sind Testmessungen aufgenommen worden, um das Stationsnetz um einen Standort im Dänischen Wohld zu erweitern. Details zum Status des Stationsnetzes und wesentliche Arbeiten daran werden in Kapitel 2 ausgeführt.

Ein wesentlicher Fortschritt im Jahr 2019 ist die Aufnahme einer regelmäßigen und systematischen Datenauswertung aller in Echtzeit zur Verfügung stehenden Daten am IfG. Hierzu wurde das in 2018 begonnene Datenakquisitions- und -auswertesystem zunächst ausgebaut, auf neue Hardware umgesetzt und seit 1. Juni 2019 im Regelbetrieb ausgewertet. Hierzu zählen neben der automatischen Detektion von Erdbeben weltweit die manuelle Nachbearbeitung einzelner Ereignisse mit direktem Bezug zu Schleswig-Holstein. Erstmals wird in Kapitel 3 dazu ein Ereigniskatalog für Schleswig-Holstein präsentiert, welcher die Anzahl der Ereignisse in überregionalen Katalogen deutlich übersteigt.

Da nicht alle Daten aus Schleswig-Holstein in die Echtzeitauswertung einfließen, müssen die “offline“ aufgezeichneten Daten nachträglich manuell ausgewertet werden. Dies betrifft zuvorderst das lokale Netz um Bad Segeberg. Dort konnten in [Weidle et al. (2019)] erstmalig natürliche seismische Ereignisse bei Bad Segeberg nachgewiesen werden, in Kapitel 5 wird die Ereignisserie vom Februar und März 2018 nun ausführlich ausgearbeitet. Es zeigt sich, daß die Ereignisse zwar natürlichen, höchstwahrscheinlich aber nicht tektonischen Ursprungs waren. Als wahrscheinlichste Ursache werden frostinduzierte Mechanismen postuliert.

Die Betrachtung historischer Seismizität in und um Schleswig-Holstein wurde nach den initialen Arbeiten in [Meier & Omlin (2015)] in 2019 wieder aufgenommen. Nachdem bisher

der deutsche historische Erdbebenkatalog von [Leydecker (2011)] als alleinige Grundlage für die Beschreibung historischer Seismizität im südwestlichen Ostseeraum diente, wurden nun Kataloge aus Skandinavien beschafft und in Kapitel 6 vorläufig ausgewertet. Es zeigt sich einerseits eine hohe Konsistenz zwischen den Katalogen, andererseits aber bei Ereignissen aus präinstrumenteller Zeit (etwa vor 1900) Unsicherheiten in den Zeitangaben, bei Ereignissen aus instrumenteller Zeit Unsicherheiten in der ursächlichen Bewertung - Sprengung oder tektonisch - einzelner Ereignisse.

Die Kooperation zur Untersuchung von Bodenbewegungen mit Hilfe von Satellitendaten konzentrierte sich im Berichtsjahr auf drei Schwerpunkte. Zum einen haben wir die amtlichen Nivellementdaten bearbeitet und Auswertungen zu diesen historischen Bodenbewegungen zu einem vorläufigen Abschluss gebracht (Kapitel 7). Wie sich zeigt, ist die Nutzbarkeit dieser Daten nicht allgemein gegeben. So eignen sie sich nicht für großräumige Untersuchungen historischer Bodenbewegungen über Längen von vielen Kilometern hinweg. Kleinräumig betrachtet, über wenige Kilometer hinweg, können die Nivellementdaten sehr hilfreich und wertvoll sein, insbesondere um Erkenntnisse aus den satellitengestützten Verfahren zu ergänzen.

Weiterhin wurden die 2018 begonnenen Arbeiten an der Auswertung der Daten aus den ESA-Satellitenmissionen ERS-1 und ERS-2 fortgesetzt und zu einem vorläufigen Abschluss gebracht werden (siehe Kapitel 8). Dabei konnten Werkzeuge entwickelt werden, die es erlauben sowohl großräumige Effekte mit mehreren Kilometern Ausdehnung als auch solche mit einer Ausdehnung von nur wenigen Hundertemetern zu identifizieren und zu quantifizieren. Diese hier entwickelten Verfahren erlauben nach jetzigem Kenntnisstand den Anschluss der ERS-Daten an die aktuelleren Daten der Sentinel-1-Missionen.

Der dritte Schwerpunkt lag auf der Bearbeitung und Auswertung der im Rahmen des Bodenbewegungsdienstes der BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) erfolgten Teillieferung 2 von Sentinel-1-Daten (Kapitel 9). Im Vordergrund war hierbei die Entwicklung von Verfahren zur lokalen Prozessierung und Auswertung der angelieferten Daten, wie sie vom DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) vorgeschlagen wurden. Die Bearbeitungsschritte erwiesen sich als komplex und nicht immer zielführend.

2 Status Stationsnetz 2019

Das seismologische Stationsnetz umfasst in Schleswig-Holstein mittlerweile 16 permanente und temporäre Installationen. Die Permanentstationen werden in Kooperation mit der BGR in Hannover bzw. dem GFZ Potsdam betrieben, die temporären Stationen vom IfG im Rahmen von Kooperationen mit dem SGD bzw der BGR.

2.1 Permanent-Stationen

Das permanente Stationsnetz in Schleswig-Holstein bestand im Jahr 2019 aus den Stationen HLG (Helgoland), BSEG (Bad Segeberg), SKMB (Sankelmark, Kreis Flensburg), KUDEN (Kuden, Dithmarschen) und KHUS (Kellenhusen, Ostholstein) (Abb. 1).

An den Stationen KUDEN und KHUS lief der Betrieb das ganze Jahr über störungsfrei.

Die Station BSEG, 1996 von der Uni Hamburg eingerichtet, wurde an die BGR übertragen und wird inzwischen in Kooperation zwischen dem IfG und der BGR betrieben. Leider kam es im August 2019 aufgrund einer Umstellung des Internetanschlusses an der Station BSEG zu einem längeren Datenausfall. Das Problem konnte von der BGR erst zum 1. Oktober behoben werden, so daß für die Station BSEG in 2019 etwa 2 Monate Daten fehlen. Während dieser Zeit stehen aber die Daten von dem temporären Stationsnetz um Bad Segeberg (siehe 2.3) zur Verfügung.

An der Station HLG in der Erdbebenwarte des IfG auf Helgoland kam es wiederkehrend zu Problemen mit der Datenübertragung, welche einem instabilen Mobilfunknetz des Anbieters Vodafone geschuldet ist. Bei einem Besuch auf der Insel im Oktober 2019, wurde der Router mit einer zweiten SIM Karte für das Netz der Telekom ergänzt, welches kurzfristig zu einer Stabilisierung der Datenübertragung geführt hat. Im Jahr 2020 ist nun in Absprache mit dem GFZ geplant, die Datenanbindung weiter zu stabilisieren. Hierzu sollen Gespräche mit der James-Krüss-Schule aufgenommen werden, um eine Einbindung in das WLAN-Netz der Schule zu prüfen. Dies würde die Datenanbindung grundsätzlich verbessern, da die Insel per Seekabel an das Internet angeschlossen ist.

An der Station SKMB gab es beginnend im Spätsommer wiederkehrende, mehrminütige Aussetzer der Datenübertragung. Nach einem Besuch durch die BGR im Herbst konnte das Problem gelöst werden, leider kam es kurz darauf zu einem weiteren Problem mit der GPS Uhr. Im Jahr 2019 gab es ein "week number rollover issue" (WNRO) des GPS-Systems, welches vorwiegend ältere GPS Uhren betraf und diese in den meisten Fällen um 1024 Wochen zurücksetzte. Die GPS Uhr an der Station SKMB wurde Anfang Januar 2020 getauscht, seither läuft die Station wieder problemfrei. Die aufgrund des WNRO mit falschem Zeitstempel versehenen Daten können nachträglich korrigiert werden, so daß sich im Datenarchiv keine Lücke ergeben wird.

Regional seismic network

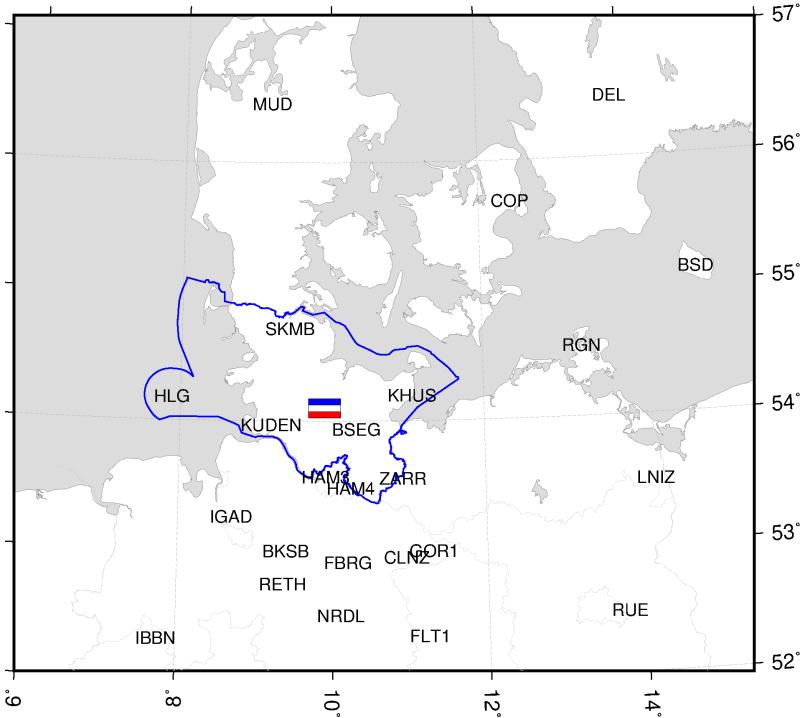


Abbildung 1: Übersichtskarte der Permanent-Seismometer in Schleswig-Holstein und ausgewählter Stationen in der Umgebung.

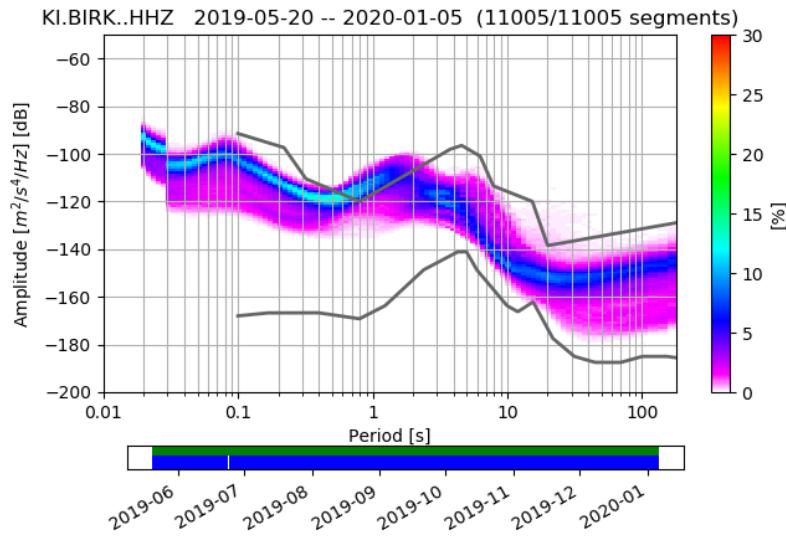
2.1.1 Standortsuche Dänischer Wohld

In 2019 haben wir begonnen, auf dem Dänischen Wohld, nördlich von Kiel, Testmessungen für einen weiteren zukünftigen permanenten Seismometerstandort durchzuführen. Hierzu wurde im Mai 2019 in Birkenmoor ein Gürnalp CMG-3TD des IfG im dortigen Gutshaus (Abb. 2) installiert. Im Dezember 2019 wurde die Station um ein LTE-Modem ergänzt, so dass die Daten aus Birkenmoor seitdem in Echtzeit ans IfG übertragen werden und in das dortige automatische Echtzeitprozessing eingebunden werden (siehe Kapitel 3). Aufgrund von Personalproblemen konnte die Stationssuche im Dänischen Wohld in 2019 leider noch nicht um weitere Teststandorte ergänzt werden.

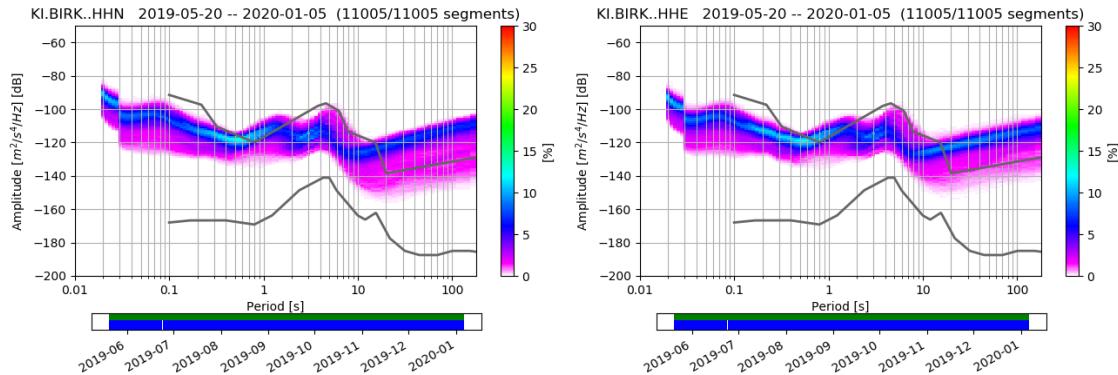
Die Rauschbedingungen am Standort Birkenmoor liegen oberhalb von 2 Hz konstant unterhalb des "new high noise model" (NHNM) von [Peterson (1993)] und zeigen einen ähnlichen Verlauf wie die Leistungsdichtespektren an den Standorten KHUS mit einer charakteristischen Spitze zwischen 1 und 2s Periode, und SKMB bei Frequenzen oberhalb von 2 Hz (siehe Abschnitt 2.2). Im höherfrequenten Bereich ist die Station etwas ruhiger als KUDEN, was durch Unterschiede in den geologischen Untergrundbedingungen zu erklären ist.



Abbildung 2: (links) Außenansicht des Gutshauses auf Gut Birkenmoor. Das Seismometer ist im vorderen Bereich im Keller installiert. (rechts) Standort des Seismometers in einem abgelegenen Kellerraum.



(a) Vertikalkomponente



(b) Nordkomponente

(c) Ostkomponente

Abbildung 3: Spektrale Leistungsdichte an der Station Birkenmoor.

2.2 Vergleich der Rauschbedingungen an Permanent-Stationen in SH mit anderen Stationen in Norddeutschland

Zur Bewertung der Standort- und Datenqualität werden wieder probabilistische Leistungsdichtespektren (PPSD) verwendet, welche die Häufigkeit der frequenzabhängigen Amplitude des kontinuierlichen seismischen Rauschens an einer seismischen Station darstellen. In bisherigen Arbeiten ([Weidle et al. (2019)], [Meier & Omlin (2018)], [Meier & Omlin (2017)]) wurden PPSD verwendet, um neue Standorte zu beschreiben. Im folgenden sollen anhand eines Vergleiches von PPSD aus dem Jahr 2019 die Stationen in SH mit benachbarten Stationen im norddeutschen Becken verglichen und die Datenqualität der SH Stationen überregional eingeordnet werden.

Abb. 4 zeigt PPSD der Vertikalkomponente der verschiedenen Stationen. Bekanntermassen liegt das Rauschniveau bei Frequenzen oberhalb 1 Hz im norddeutschen Becken generell relativ hoch in dem Korridor zwischen dem globalen "new low noise model" (NLNM) und "new high noise model" (NHNM) ([Peterson (1993)]). Die Station BSEG hebt sich im Mittel positiv ab, da an dieser Station über den gesamten betrachteten Frequenzbereich von 50 Hz bis 200 s der Rauschpegel deutlich niedriger ist als an den anderen Standorten. Dies ist aufgrund der einzigartigen Lage der Station in der Kalkberghöhle zu erklären. Die anderen Stationen sind alle oberflächennäher, selbst in den Bohrlöchern der Stationen KUDEN und KHUS, und geologisch in Lockergestein situiert. Eine weitere Ausnahme hiervon ist die Erdbebenwarte des IfG auf Helgoland, welche im Keller der James-Krüss-Schule, auf einem vom Gebäude entkoppelten Betonsockel im Helgoländer Felssockel installiert ist. Das höhere Rauschniveau im Frequenzbereich 0.5 Hz bis 7 s ergibt sich aus meteorologischen und ozeanographischen Effekten und eines verstärkten Einflusses der Meeresmikroseismik am Standort mitten in der Nordsee. Bei langen Perioden jenseits von 10 s zeigen alle Stationen in SH ein sehr gutes Verhalten nahe am NLNM.

Verglichen werden die PPSD der SH Stationen nun mit PPSD benachbarter Stationen im norddeutschen Becken, HAM4 (Hamburg-Bergedorf), IGAD (Garstedt, Lkr Osterholz bei Bremen, NDS), ZARR (Zarrentin, Lkr Ludwigslust-Parchim, MV), RGN (Rügen, MV) und LNIZ (Löcknitz, Vorpommern-Greifswald, MV) (Abb. 5, Stationskarte Abb. 1). Die Stationen werden von der BGR Hannover bzw die Station RGN vom GFZ Potsdam betrieben und sind die nächstliegenden Stationen zum SH Stationsnetz. Die PPSD an diesen Standorten zeigen ein sehr ähnliches Verhalten wie die SH Stationen, im Mittel liegt das Rauschniveau an den benachbarten Stationen bei Frequenzen oberhalb 1 Hz noch etwas über den SH Stationen. Daraus lässt sich schliessen, daß die SH Stationen unter Berücksichtigung der generell schwierigen Standortbedingungen im norddeutschen Becken verhältnismässig gute Rauschbedingungen zeigen. Dies ist auch eine Bestätigung der Vorgehensweise in der Kooperation zwischen SGD und IfG bei der Stationssuche für neue Standorte in SH in den vergangenen Jahren.

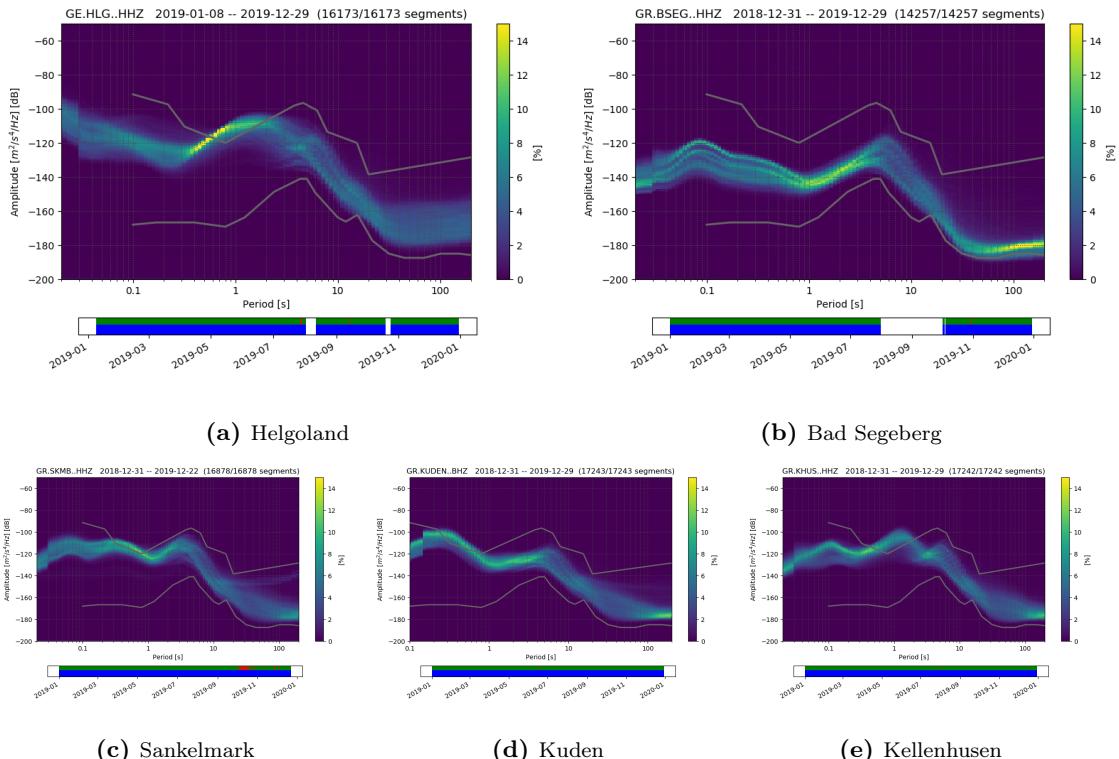


Abbildung 4: Spektrale Leistungsdichte der Vertikalkomponente im Jahr 2019 an den GRSN Stationen in Schleswig-Holstein. Abbildungen von K. Stammmer (BGR).

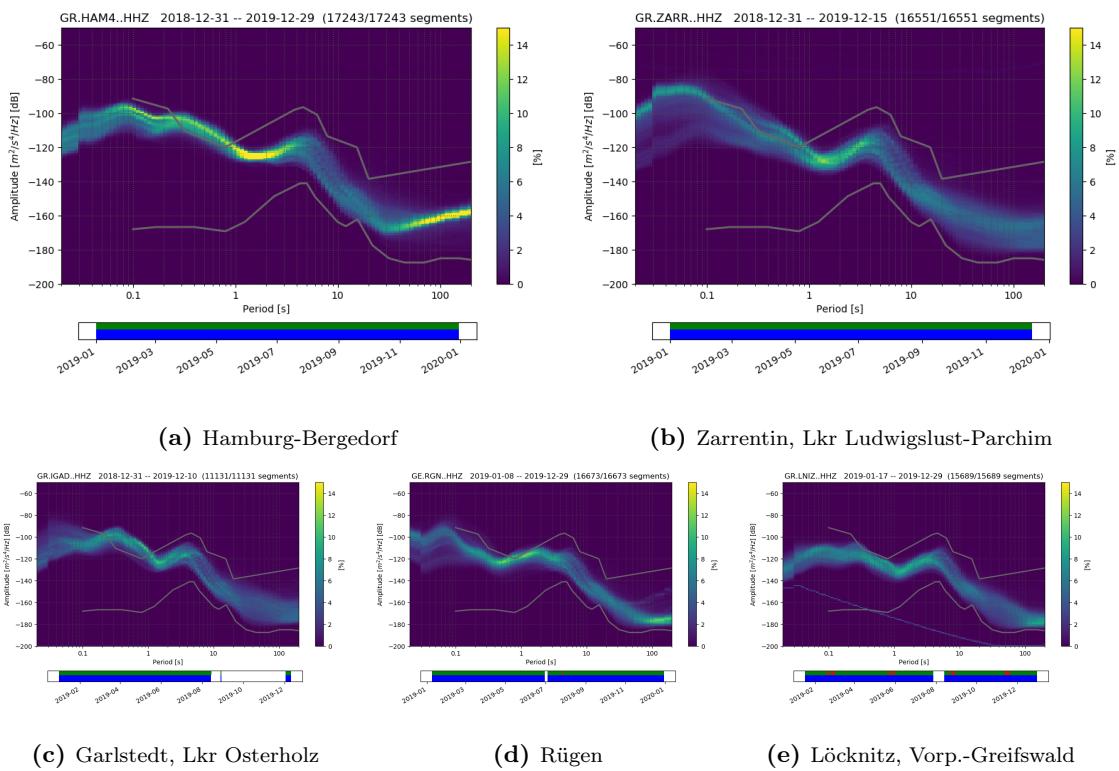


Abbildung 5: Spektrale Leistungsdichte der Vertikalkomponente im Jahr 2019 an benachbarten GRSN Stationen Hamburg, Zarrentin, Garlstedt, Rügen und Löcknitz. Abbildungen von K. Stammmer (BGR).

2.3 Temporäre Stationsnetze

Das IfG betreibt in Zusammenarbeit mit der BGR Hannover seit 2017 ein temporäres seismisches Netz auf Helgoland (Helgoland-Array, kurz HELGA). Das Netz ergänzt die Permanent-Station HLG in der Erdbebenwarte des IfG in der James-Krüss-Schule um fünf weitere Breitbandseismometer, drei davon auf Helgoland und zwei weitere auf der Düne. Seit 2018 sind alle Seismometer mit LTE-Modem ausgerüstet, wodurch eine Datenübertragung in Echtzeit aller Stationen erfolgen kann. Mit Ausnahme einer Station (HLGA1) funktioniert diese auch weitgehend störungsfrei und die Daten werden via BGR Hannover auch am IfG im Echtzeitprozessing verwendet und archiviert. Im Jahr 2020 sollen auch die technischen Herausforderungen an der Station HLGA1 überwunden werden, um eine zuverlässige Echtzeitdatenübertragung zu gewährleisten. Unabhängig davon funktioniert die lokale Datenerfassung an allen Standorten sehr zuverlässig, so dass es im Archiv zu keinen nennenswerten Datenlücken kam. Hierbei ist auch ein WNRO Problem (s.o. Station SKMB) an der Station HLGA2 zu nennen, welches im Herbst 2019 unerwartet auftrat und beim nächsten Besuch in 2020 repariert werden soll. Nach der Reparatur der GPS Uhr können die fehlerhaften Daten korrigiert und das Datenarchiv lückenlos vervollständigt werden.

In Zusammenarbeit mit dem SGD betreibt das IfG ebenfalls seit 2017 das lokale seismische Netz um Bad Segeberg, zunächst mit drei, seit 2018 mit insgesamt fünf zusätzlichen Breitbandseismometern. Im Jahr 2019 wurde das Oberflächenseismometer am Standort Wege-Zweckverband (BSEA3) abgebaut, da mit dem in 2018 installierten Bohrlochseismometer am gleichen Standort ein Gerät mit besseren Rauschbedingungen vorhanden ist ([Weidle et al. (2019)]). Ebenfalls ein WNRO an den älteren Geräten des IfG an den Standorten Klein-Rönnau (BSEA4) und Quaal (BSEA5) erforderten zusätzliche Service-Besuche um die GPS Antenne zu tauschen. Dies konnte in diesem Fall vor Auftreten des WNRO erfolgen, weshalb es zu keinen nennenswerten Disruptionen in der Datenaufzeichnung kam. Zur Auswertung der Daten des Bad Segeberg Netzes wird auf Kapitel 5 verwiesen.

2.4 Arbeiten ausserhalb SH

Neben der Betreuung der seismologischen Stationsnetze in SH war das IfG 2019 gemeinsam mit der BGR Hannover auch am Ausbau des Stationsnetzes in Mecklenburg-Vorpommern (MV) aktiv (Abb. 6). Die BGR plant die Installation je eines weiteren Seismometers in Kühlungsborn, östlich von Rostock, und in Schillersdorf, Lkr Mecklenburgische Seenplatte (Abb. 6). Das IfG hat in 2019 fünf temporäre Seismometer im nördlichen MV in Betrieb genommen. Dies ist für SH insofern relevant, als dass das Stationsnetz im nördlichen MV bisher nur aus der Station RGN bestand und somit nur eine sehr spärliche Überwachung des südwestlichen Ostseeraumes ermöglichte. Durch die Arbeiten in MV wird das dortige Stationsnetz verdichtet, was auch die Überwachung für SH deutlich stärken wird.

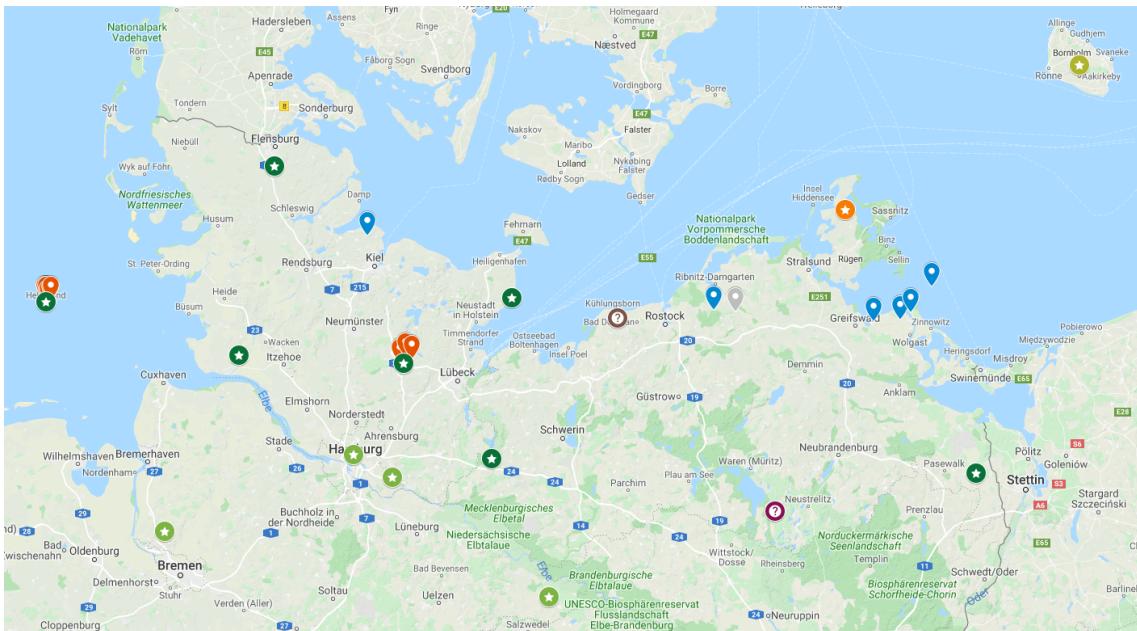


Abbildung 6: Übersicht seismischer Stationen in Norddeutschland. Permanentstationen (kreisförmige Marker) in SH und MV [dunkelgrün], in NDS und HH [hellgrün], GEOFON Station Rügen [orange], geplant in MV ["?"]; vom IfG betriebene temporäre Stationen (Marker) des Bad Segeberg Netzes und Helgoland-Arrays [orange] und einzelne, temporäre Stationen in SH und MV [blau]. Karte: Google Maps.

3 Auswertung Datenzentrum

Das 2018 am IfG in Betrieb genommene [Seiscomp3]-System wurde im vergangenen Jahr sukzessive ausgebaut und auf eine neue Hardware migriert. Mit dem ausgebauten System ist seit dem Sommer eine routinemäßige Auswertung möglich. Mittlerweile werden von 189 Stationen weltweit Echtzeitdaten abgefragt und vollautomatisch prozessiert. Insgesamt 1682 Ereignisse wurden im Laufe des Jahres 2019 detektiert und lokalisiert, der weit überwiegende Anteil sind telesismische Ereignisse mit Magnituden > 4.5 (siehe Abb. 7).

Seit 1. Juni 2019 werden die automatisch prozessierten und detektierten Ereignisse von regionalem Interesse systematisch manuell nachbearbeitet. Aufgrund der nach wie vor relativ geringen Stationsdichte in SH und Umgebung werden die meisten, im folgenden Kapitel ausführlich diskutierten Ereignisse durch die Automatik nicht erfasst. Grund hierfür ist, daß die Ereignisse im Allgemeinen zu schwach sind, um an mindestens vier Stationen vom Algorithmus detektiert werden zu können. Um die Detektionsschwelle zu senken, wurde ein auf den in Echtzeit erfassten Wellenformdaten basierendes, separates Prozessing aufgesetzt, welches Übersichtsdarstellungen der 24h Wellenformen aller Permanentstationen in SH erstellt. Dabei werden mit einem separaten, für Schleswig-Holstein angepassten Detektionsalgorithmus mögliche seismische Ereignisse markiert. Diese tageweisen Übersichtsdarstellungen erleichtern die manuelle Durchsicht der Wellenformdaten und ermöglichen eine manuelle Betrachtung aller Wellenformdaten mit vertretbarem zeitlichem Aufwand. Wird in der manuellen Durchsicht ein mögliches Ereignis erkannt, wird es im [Seiscomp3]-System unter Berücksichtigung aller zur Verfügung stehenden Wellenformen manuell ausgewertet

und in den eigenen Katalog aufgenommen.

3.1 Internationaler Datenaustausch

Im Oktober 2019 konnte C. Weidle am Nordic Seismology Seminar, einem jährlichen Treffen skandinavischer Seismologen, teilnehmen und den fachlichen Austausch mit den skandinavischen Nachbarn vertiefen. Neben den bereits bestehenden Kooperationen mit der BGR, dem GFZ und dem niedersächsischen Erdbebendienst in Hannover ist eine Intensivierung des fachlichen Austauschs mit Kollegen v.a. aus Dänemark und Schweden ein wichtiger Schritt, um die Überwachung in SH zu stärken. Ein wesentliches Element hierbei ist die Einbindung zusätzlicher Stationen aus den Nachbarländern, welche die Datenabdeckung vor allem im südwestlichen Ostseeraum weiter verbessern wird. Zum einen sind die Stationsabstände von SH in Richtung Norden relativ groß, zum anderen sind auch weit entfernte Stationen v.a. in Südschweden oftmals wichtig, um Ereignisse in Norddeutschland detektieren und lokalisieren zu können [Weidle et al. (2019)].

Mit Kollegen vom GEUS in Dänemark konnte ein direkter Datenzugriff auf Echtzeitdaten der dänischen Stationen vereinbart werden. Dieser ist auch bereits eingerichtet und soll noch um weitere Stationen auf dem dänischen Festland ergänzt werden. Die Kollegen des schwedischen nationalen seismischen Netzes (SNSN) in Uppsala stehen einer engeren Zusammenarbeit ebenfalls sehr positiv gegenüber und haben auch einen direkten Echtzeit-Datenzugriff auf ausgewählte Stationen in Süd-Schweden für die Routineauswertung am IfG zugesagt. Dies soll im ersten Halbjahr 2020 eingerichtet werden. Darüberhinaus konnten historische Erdbebenkataloge diskutiert und ausgetauscht werden, eine erste Auswertung dazu folgt in Kapitel 6.

CAU global detections 2019

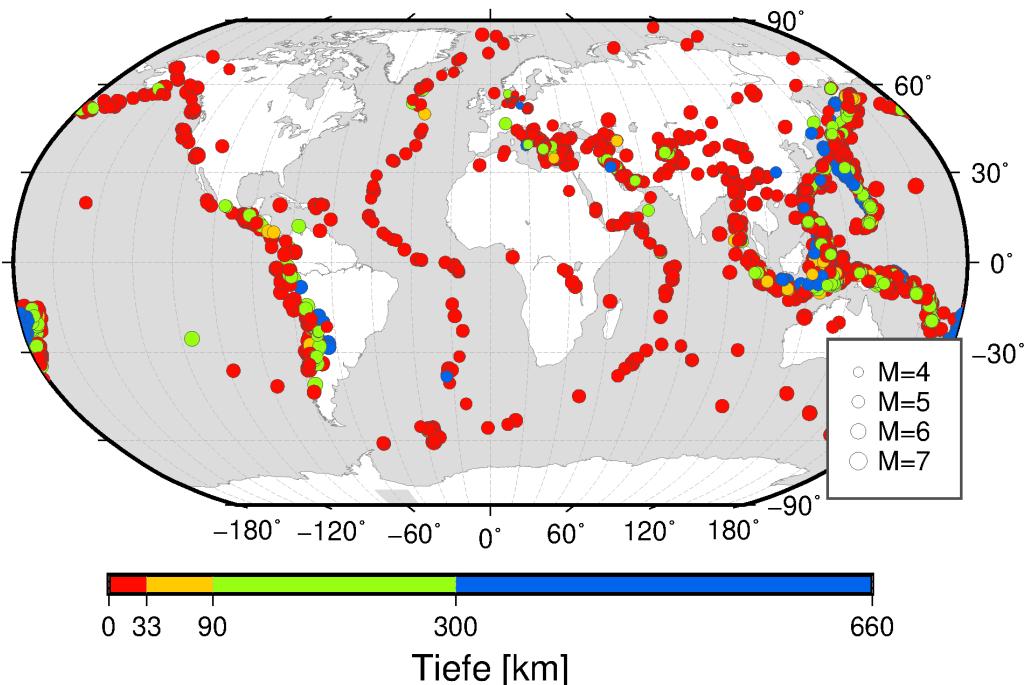


Abbildung 7: Verteilung aller in 2019 am IfG im [Seiscomp3]-System detektierten Ereignisse. Der überwiegende Anteil sind global verteilte Ereignisse mit Magnituden > 4.5 , welche vollautomatisch vom System prozessiert wurden.

4 Ereignisübersicht 2019

Seit Juni 2019 werden am IfG systematisch und kontinuierlich die in Echtzeit verfügbaren Wellenformdaten nach potentiellen Ereignissen untersucht. Diese routinemäßige Auswertung ergänzt und vertieft die automatische Auswertung und führt zu einer deutlich detaillierteren Übersicht über schwache seismische Ereignisse in SH in 2019.

4.1 Überregionale Seismizität

Zur Betrachtung der überregionalen Seismizität wird der Erdbebenkatalog des European-Mediterranean Seismological Centers [EMSC] herangezogen, welcher Ereignisse von verschiedenen europäischen Agenturen sammelt und zu einem konsistenten Erdbebenkatalog harmonisiert (siehe auch [Weidle et al. (2019)]). In der näheren Umgebung von SH gab es am 24. September 2019 ein Beben der Magnitude 4.6 in der zentralen Nordsee. Solche Ereignisse sind in der Nordsee nicht unüblich (s. historische Erdbebenkataloge im Kapitel 6), werden aber nur selten von der Bevölkerung an Land wahrgenommen. Ebenfalls typisch sind Ereignisse mit Magnituden um 3 im Norden Dänemarks. Dies gilt sowohl für Ereignisse an der Nordseeküste (Ereignis vom 18.7.2019), als auch im Bereich des Kattegat zwischen Jütland und Süd-Schweden (27.12.2019, nur im IfG-Katalog erfasst, s.u.). Im Mai und Juni 2019 gab es zwei größere Ereignisse im Bereich der Gasfelder um Groningen (NL),

EMSC Katalog 2019

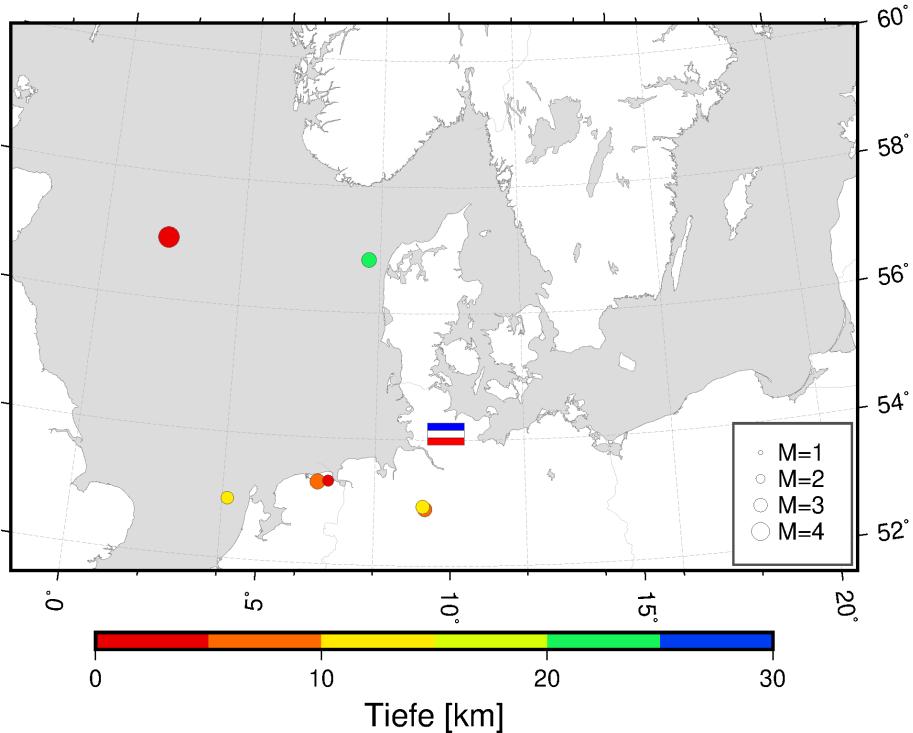


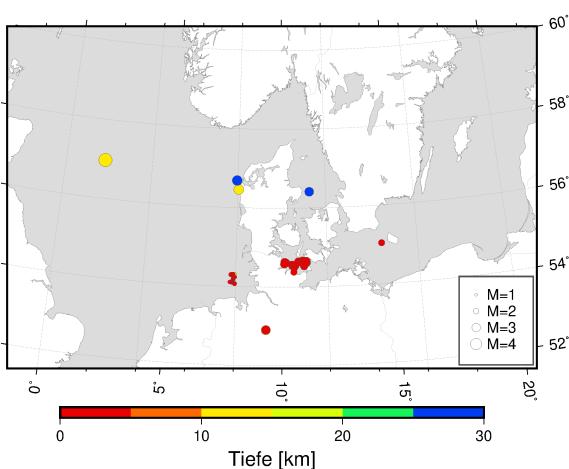
Abbildung 8: Ereignisse um Schleswig-Holstein im Jahr 2019, Quelle: [EMSC].

welche zumindest auf Helgoland deutlich messbar waren. Die signifikantesten Ereignisse in Norddeutschland in 2019 waren die beiden Beben mit Magnituden 3.2 und 3.0 bei Verden/Aller in Niedersachsen, welche am späten Abend des 20. November 2019 stattfanden. Der niedersächsische Erdbebendienst (NED) bringt diese Ereignisse mit den nahegelegenen Gasfeldern in Verbindung. Die automatische Echtzeitauswertung am IfG konnte beide Ereignisse zuverlässig detektieren und lokalisieren. Eine manuelle Auswertung beider Ereignisse ergab konsistente Hypozentralparameter mit denen anderer Agenturen, v.a. vom NED.

Herdzeit (UTC)	Länge (Ost)	Breite (Nord)	Tiefe (km)	Magnitude
2019-05-22T03:48:59.100000Z	6.49	53.30	8	3.4
2019-06-09T05:00:15.000000Z	6.77	53.32	3	2.5
2019-07-18T22:08:46.400000Z	7.67	56.84	20	3.3
2019-08-25T09:47:28.500000Z	2.95	51.43	8	3.0
2019-09-24T13:38:12.700000Z	1.83	56.97	2	4.6
2019-11-20T17:28:38.600000Z	9.34	52.90	8	3.2
2019-11-20T21:32:56.400000Z	9.28	52.94	10	3.0
2019-12-08T22:59:30.400000Z	4.14	52.95	10	2.8

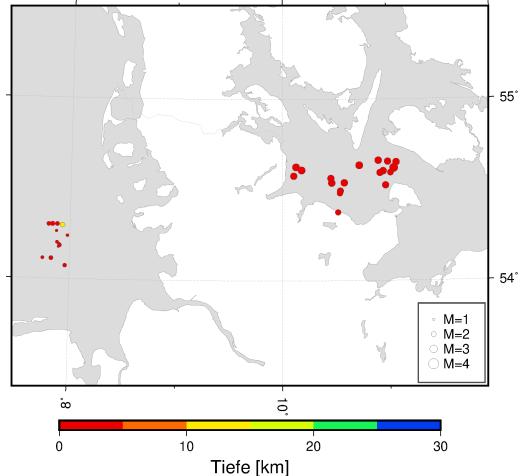
Tabelle 1: Erdbeben im Jahr 2019 in der Umgebung von Schleswig-Holstein, Quelle: [EMSC].

CAU Bulletin 2019



(a) Ereignisse im CAU Bulletin.

CAU Bulletin 2019



(b) detaillierte Ansicht für Schleswig-Holstein.

Abbildung 9: Übersichtskarte der in 2019 am IfG detektierten und manuell nachbearbeiteten Ereignisse in Schleswig-Holstein und Umgebung.

4.2 Seismische Ereignisse in SH

Wie in den Vorjahren, wurde von der BGR eine Ereignisliste mit identifizierten Ereignissen in SH im Jahr 2019 abgefragt (G. Hartmann, BGR, persönliche Anfrage). Mit Stichtag 20. November 2019 wurden dort nur vier Ereignisse archiviert, welche allesamt Sprengungsergebnisse in der Eckernförder Bucht zugeordnet werden.

Herdzeit (UTC)	Länge (Ost)	Breite (Nord)	Tiefe (km)	Magnitude
20190515T09:35:18.210	10.122	54.558	k.A.	1.920
20190615T11:44:44.888	11.052	54.808	k.A.	2.800
20190616T18:04:06.367	10.618	54.470	k.A.	2.080
20190830T17:43:05.968	10.955	54.579	k.A.	1.900

Tabelle 2: Seismische Ereignisse im Jahr 2019 in Schleswig-Holstein, Quelle: G. Hartmann (BGR), persönliche Anfrage.

Seit 1. Juni 2019 werden am IfG systematisch Wellenformen aus SH und benachbarter Stationen nach seismischen Ereignissen ausgewertet. Neben der automatischen Detektion im Seiscomp3-System (siehe [Weidle et al. (2019)]) erfolgt eine manuelle Durchsicht der Wellenformen nach potentiellen Ereignissen (siehe Abschnitt 3). Dies ist nach wie vor unabdingbar, da die Stationsdichte für eine zuverlässige automatische Detektion schwächer Ereignisse mit Magnituden unter 2 bei weitem nicht ausreicht. Tabelle 3 und Abbildung 9 fassen den Katalog des Jahres 2019 zusammen. Generell ist anzumerken, daß die Ereignistiefen in den meisten Fällen bei der Lokalisierung fixiert wurden, typischerweise auf Tiefe 0 bzw. 10 km.

Von den vier im BGR Katalog gelisteten Sprengungen wurden drei unabhängig am IfG identifiziert und lokalisiert, das vierte fand am 15. Mai 2019 statt, vor Aufnahme der systematischen Auswertung. Darüberhinaus finden sich im IfG-Katalog 16 weitere Ereignisse, welche als Sprengungsereignisse in der südwestlichen Ostsee interpretiert werden.

Hierzu zählen auch neun Ereignisse am 30. und 31. August 2019, welche im Bereich der Insel Fehmarn lokalisiert werden und höchstwahrscheinlich im Zusammenhang mit einem NATO-Manöver in der Region zu verstehen sind, welches auch mediale Aufmerksamkeit nach sich zog (siehe z.B. <https://spon.de/afBOW>).

Neben Sprengungen in der südwestlichen Ostsee werden mit dem Helgoland-Array auch Ereignisse um Helgoland zuverlässig identifiziert. Insgesamt 12 Ereignisse mit Verdacht auf Sprengung wurden in und um Helgoland lokalisiert. Hierbei ist zu beachten, daß die Lokalisierung der Ereignis meist aufgrund des Ersteinsatzes an 2-3 Stationen erfolgt und somit nicht sehr präzise ist. Dies erklärt die Streuung der Ereignisse um Helgoland in Abb. 9b. Das Ereignis am 17. Juli 2019 konnte durch einen persönlichen Kontakt auf Helgoland als Granatensprengung bestätigt werden. Mittelfristig wäre es wünschenswert einen routinemäßigen Abgleich von vermuteten Sprengungsereignissen um Helgoland mit dem dortigen Ordnungsamt zu etablieren.

Ein außergewöhnliches Ereignis trat am 12. September 2019 an Stationen des Helgoland-Arrays auf und wurde zunächst als "Verdacht auf Sprengung" kategorisiert. Nach Hinweisen von dänischen Kollegen konnte das Ereignis als Überschallknall eines Meteors bestätigt werden, welcher am selben Tag gegen 14.55 Uhr MESZ im Bereich der Nordsee in die Atmosphäre eintrat. Eine Reihe von Augenzeugenberichten beschreiben den Meteor (siehe z.B. https://fireballs.imo.net/members/imo_view/event/2019/4385), ein Kitesurfer in der Nordsee nahm zufällig ein Video von dem Meteor auf (siehe <https://youtu.be/mWZqMqDaK90>) und eine Auswertung der seismologischen Daten zeigt eine deutliche Signatur sowohl auf Helgoland als auch an den Daten des Bad Segeberg Netzes (Abb. 10). Auch hier ist die in Tabelle 3 genannte Lokation als eher ungenau einzustufen. Erstens wurden für die Lokalisierung nur die Daten des Helgoland-Arrays verwendet - die Daten des Bad Segeberg Netzes lagen zum Zeitpunkt der Auswertung noch nicht vor. Zweitens ist die Lokalisierungsroutine in [Seiscomp3] nicht für die Lokalisierung atmosphärischer Events optimiert.

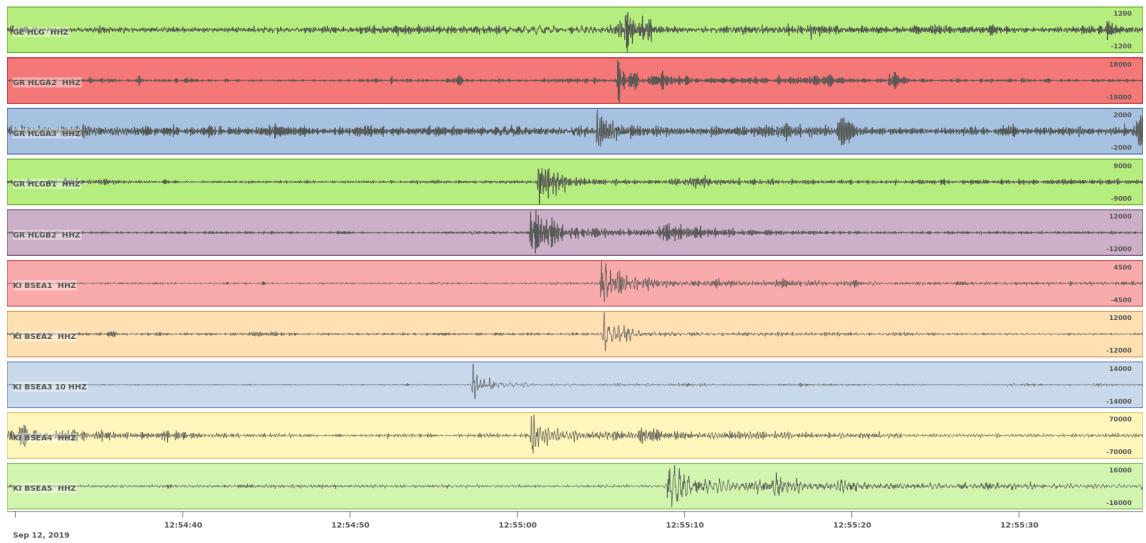


Abbildung 10: Meteor über SH, aufgezeichnet am 12. September 2019 gegen 14.55 Uhr MESZ an den seismischen Stationen auf Helgoland und um Bad Segeberg. Darstellung mit [Pyrocko].

Tabelle 3: Seismische Ereignisse im Jahr 2019 in Schleswig-Holstein und Umgebung, detektiert und bearbeitet am IfG. Ereignistyp wurde durch Analysten zugewiesen.

Herdzeit (UTC)	Breite (Nord)	Länge (Ost)	Tiefe (km)	Magnitude	Region	Typ
2019-06-15 11:44:54	54.5774	10.1077	0.0	2.7	Germany	explosion
2019-06-16 16:57:25	54.4949	10.5490	0.0	2.6	Germany	explosion
2019-06-16 17:28:35	54.4827	10.5446	0.0	2.4	Germany	explosion
2019-06-16 18:04:05	54.5396	10.5861	0.0	2.8	Germany	explosion
2019-06-20 07:54:56	54.5386	10.4674	0.0	2.8	Germany	explosion
2019-06-20 08:36:01	54.5644	10.4597	0.0	2.7	Germany	explosion
2019-07-06 10:30:02	54.6266	10.1288	0.0	2.9	Germany	explosion
2019-07-14 11:55:13	55.0430	14.4175	0.0	2.3	Sweden	NULL
2019-07-17 14:14:31	54.1867	7.9020	4.1	1.5	North Sea	explosion
2019-07-18 06:26:32	54.1872	7.9037	0.0	1.2	North Sea	NULL
2019-07-18 06:45:41	54.2380	7.9767	2.5	1.2	North Sea	NULL
2019-07-18 15:03:40	54.2617	7.8731	0.0	1.1	North Sea	explosion
2019-07-18 22:08:49	56.6884	7.9535	90.7	3.5	North Sea	earthquake
2019-07-22 16:48:50	54.1816	7.9071	4.2	1.3	North Sea	explosion
2019-07-23 15:07:32	54.1846	7.9096	4.3	1.1	North Sea	explosion
2019-07-26 06:23:24	54.1900	7.9000	0.0	1.2	North Sea	explosion
2019-08-22 08:45:33	54.6091	10.1825	0.0	2.9	Germany	explosion
2019-08-30 08:50:30	54.5956	11.0249	0.0	2.5	Germany	explosion
2019-08-30 14:49:13	54.6041	10.9556	0.0	2.8	Germany	explosion
2019-08-30 17:43:05	54.5942	10.9253	0.0	2.7	Germany	explosion
2019-08-30 20:37:56	56.4621	8.0378	10.0	3.5	Denmark	not locatable
2019-08-31 07:45:21	54.6214	11.0565	0.0	3.3	Germany	explosion
2019-08-31 08:20:19	54.6563	10.9991	0.0	2.7	Germany	explosion

Tabelle 3: Seismische Ereignisse im Jahr 2019 in Schleswig-Holstein und Umgebung, detektiert und bearbeitet am IfG. Ereignistyp wurde durch Analysten zugewiesen.

Herdzeit (UTC)	Breite (Nord)	Länge (Ost)	Tiefe (km)	Magnitude	Region	Typ
2019-08-31 10:02:43	54.6624	10.9102	0.0	2.8	Germany	explosion
2019-08-31 10:45:07	54.6530	11.0797	0.0	2.8	Germany	explosion
2019-08-31 11:40:11	54.6353	10.7295	0.0	2.9	Germany	explosion
2019-08-31 16:11:47	54.5262	10.9772	0.0	2.7	Germany	explosion
2019-09-12 12:55:53	54.2959	7.9290	10.0	1.9	North Sea	sonic boom
2019-09-24 13:38:13	56.9672	1.8008	10.0	4.7	North Sea	earthquake
2019-09-24 14:47:51	54.1813	7.9072	0.0	1.1	North Sea	explosion
2019-10-13 10:38:36	54.0725	7.9580	0.0	1.6	North Sea	explosion
2019-11-04 21:32:42	54.1124	7.7473	0.0	1.3	North Sea	atmospheric event
2019-11-05 14:05:35	54.3003	7.8350	0.0	1.8	North Sea	explosion
2019-11-09 10:05:38	54.3007	7.8803	0.0	1.7	North Sea	explosion
2019-11-18 18:31:56	54.2000	7.8803	0.0	1.3	North Sea	atmospheric event
2019-11-20 17:28:39	52.9059	9.3267	6.6	3.3	Germany	earthquake
2019-11-20 21:32:57	52.9080	9.3328	4.2	2.9	Germany	earthquake
2019-11-21 11:15:48	54.1752	7.8940	0.0	1.0	North Sea	explosion
2019-11-21 18:17:29	54.3767	10.5257	0.0	2.3	Germany	explosion
2019-11-27 16:44:20	54.1112	7.8279	0.0	1.5	North Sea	atmospheric event
2019-11-27 16:50:30	54.1112	7.8279	0.0	1.6	North Sea	explosion
2019-11-27 16:56:23	54.1112	7.8279	0.0	1.7	North Sea	explosion
2019-11-29 16:49:30	54.3000	7.8000	0.0	1.7	North Sea	atmospheric event
2019-12-27 22:20:08	56.4088	11.2622	31.1	3.2	Denmark	earthquake

5 Auswertung des lokalen Bad Segeberg Netzes

Das seit 2017 in Betrieb befindliche lokale seismische Netz um Bad Segeberg umfasst mittlerweile fünf Stationen zusätzlich zur GRSN Station im Segeberger Kalkberg. Da die Daten des temporären Netzes nur lokal in den jeweiligen Datenrekordern registriert werden, erfolgt eine Auswertung dieses Datensatzes separat und zeitverzögert. Die wesentlichen Schritte der Auswertung wurden in [Weidle et al. (2019)] dargestellt und werden hier nur kurz aufgegriffen.

Beim automatischen Detektieren von Ereignissen am Bad Segeberg Array ist eine Häufung von Detektionen in zwei Zeiträumen im Februar/März 2018 festgestellt worden (Abbildung 11). Die Ereignisse wurden mit einem STA/LTA Algorithmus detektiert (Einstellungen siehe Tabelle 4). Im Folgenden sollen die beiden Zeitfenster in denen die Häufung von Detektionen auftritt, genauer untersucht werden. Es soll herausgefunden werden, ob es charakteristische Eigenschaften der detektierten Ereignisse gibt, wie hoch die Ähnlichkeit der Ereignisse zueinander ist, und weswegen in diesem Zeitraum eine Häufung von Detektionen auftritt. Eine manuelle Durchsicht der Wellenformen offenbart weitere Ereignisse, die der Detektor mit den Default-Einstellungen nicht finden konnte, daher wurden die Parameter des Detektors angepasst, um möglichst viele dieser Ereignisse zu finden.

Wie die Wellenformbeispiele in Abbildung 12a zeigen, sind die Ereignisse nur an den Stationen BSEG im Kalkberg und BSEA1 in Stipsdorf sichtbar. Ein gelegentlich auftretendes koinzidentes Signal an der Station BSEA2 in Klein-Gladebrügge deutet auf ein Ereignis anderen Ursprungs, häufig ein telesismisches Ereignis, hin. Diese werden gelegentlich vom lokalen Netz erfasst und sollen im Folgenden nicht berücksichtigt werden. Dazu wurde der Detektor derart angepasst, daß ein Signal an BSEG und BSEA1 erforderlich, gleichzeitig an BSEA2 aber nicht vorhanden ist.

Der angepasste Detektor wurde konkret auf den Zeitraum der Ereignisschwärme angewandt. Anschließend wurden die Detektionslisten manuell überprüft. Fehldetektionen (siehe Abbildung 12b) wurden gelöscht und weitere, auch mit den angepassten Parametern, nicht gefundenen Ereignisse wurden von Hand gepickt. Die manuelle kontrollierte Liste stellt die vollständigste Aufzählung der Ereignisse der beiden Schwärme da.

Parameter	Wert [Default]	Wert [Angepasst]
Filter	2 – 7 Hz	1 – 7 Hz
STA	0.2 s	0.5 s
LTA	4.0 s	10.0 s
Thresholds	8.0 / 0.5	5.0 / 0.5
Coincidence Sum	4	4
Stationen müssen triggern		BSEG, BSEA1
Stationen dürfen nicht triggern		BSEA2

Tabelle 4: Default-Einstellungen des STA/LTA Detektors und Anpassungen der Parameter

Die Ergebnisse zwischen dem angepassten Detektor und der manuellen Kontrolle unterscheiden sich um einige 10 Detektionen (Tabelle 5). Im Schwarm 1 wurden manuell wenige

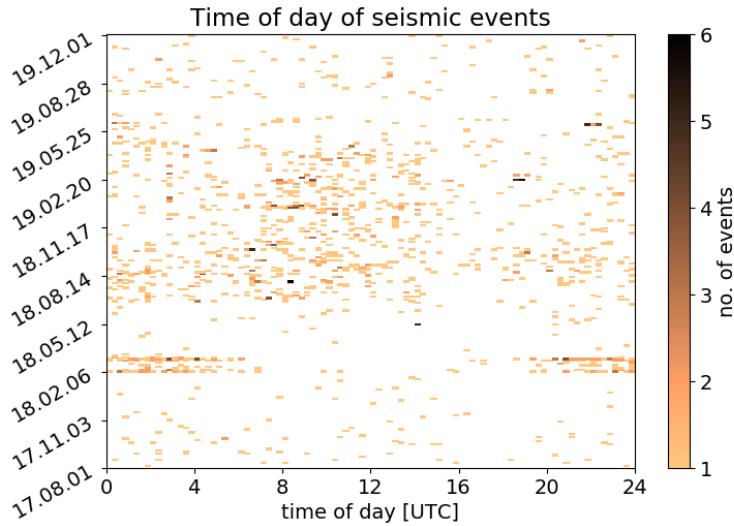
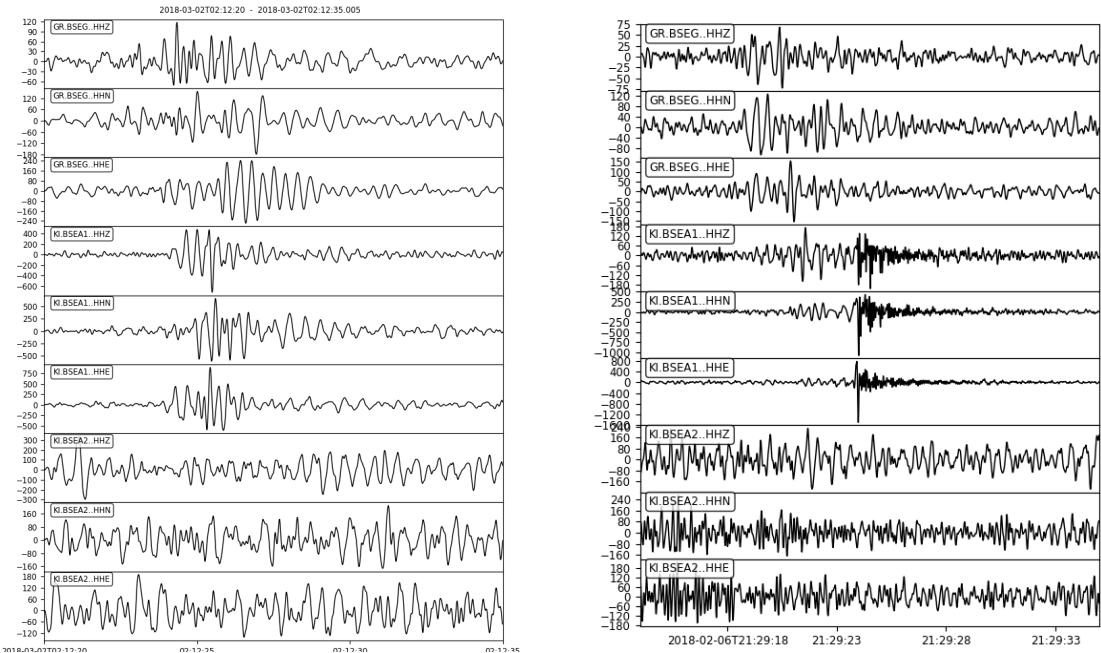


Abbildung 11: Alle Detektionen mit dem STA/LTA Detektor zwischen August 2017 (Installation des Netzwerks) und Dezember 2019. Es heben sich zwei Zeiträume im Februar/März 2018 durch eine erhöhte Anzahl an Detektionen hervor. Ab Sommer 2018 steigt die Anzahl der Detektionen aufgrund der Erweiterung des Netzwerks an. Die Abnahme der Detektionen im Sommer/Herbst 2019 ist mit dem temporären Ausfall der Stationen BSEG und BSEA4 zu erklären.



(a) Erfolgreiche Detektion: ein typisches Beispiel für ein Ereignis aus dem Schwarm (02.03.2018, 02:12 UTC)

Abbildung 12: Beispiele aus den Wellenformen der Ereignisschwärme. Ein typisches Ereignis ist in Abbildung a) gezeigt. Ein Signal ist ausschließlich an BSEG und BSEA1 zu sehen. An BSEA2 jedoch nicht. Abbildung b) zeigt ein Beispiel einer Fehldetektion. Alle Kriterien für eine Detektion sind zwar erfüllt. Es gibt einen Anstieg in der Amplitude an BSEG und BSEA1, nicht aber an BSEA2. Für den Analysten ist erkennbar, dass es sich bei den Signalen um zwei unterschiedliche Quellen handeln muss. Die Wellenformen unterscheiden sich zu stark voneinander.

ger Ereignisse identifiziert als im angepassten STA/LTA Detektor, es wurden also einige Fehldetektionen entfernt. Im Schwarm 2 ist das Gegenteil der Fall. Hier wurden mehr zusätzliche Ereignisse gefunden als Fehldetektionen gelöscht. Insgesamt erfasst der angepasste Detektor die Ereignisschwärme aber hinreichend genau.

Im Vergleich zwischen dem Detektor mit Default-Parametern zu dem Detektor mit angepassten Parametern fällt auf, dass sich die Anzahl der gefundenen Detektionen in beiden Schwärmen etwa verdoppelt (Abbildung 13). Der Detektor mit Default-Parametern findet lediglich stärkere Ereignisse, wogegen der angepasste Algorithmus auch schwieriger zu identifizierende Ereignisse detektieren kann.

Methode	Schwarm 1	Schwarm 2
Standard	58	96
Angepasst	107	222
Manuell	95	240

Tabelle 5: Anzahl der Detektionen mit den unterschiedlichen Methoden

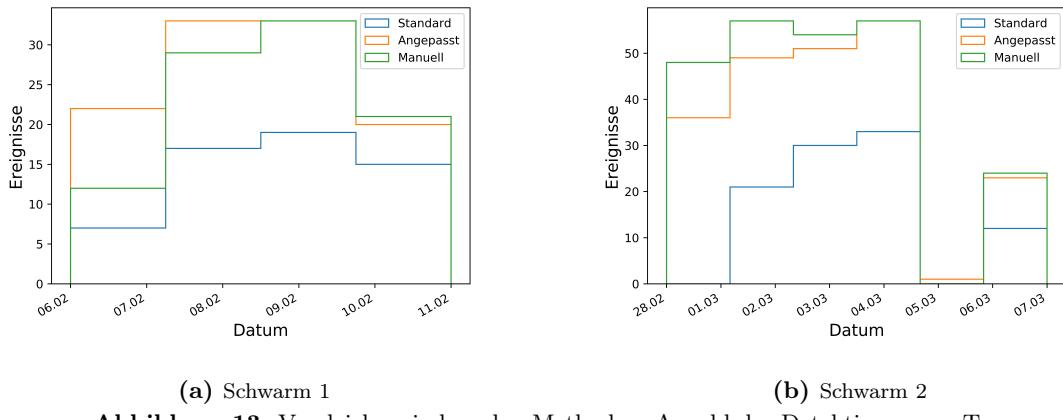


Abbildung 13: Vergleich zwischen den Methoden: Anzahl der Detektionen pro Tag.

5.1 Auftreten der Ereignisse

Die manuelle Kontrolle hat insbesondere tagsüber regelmäßige Fehldetektionen offenbart. Tatsächlich treten die Ereignisse in den Schwärmen in den Tagesstunden nicht auf. In der Regel hören die Ereignisse morgens gegen 8 Uhr auf und setzen ab ca. 16 Uhr am Nachmittag wieder ein. Während des zweiten Schwarms hören die Ereignisse sogar tendenziell etwas früher auf (Abb. 14).

5.2 Signal-Rausch Verhältnis und Amplituden

Es wurde bereits gezeigt, dass die meisten Ereignisse signifikant höhere Amplituden als das Hintergrundrauschen haben [Weidle et al. (2019)]. Die Amplituden in Stipsdorf sind etwa um den Faktor 5 höher als in Bad Segeberg (Abbildung 15). An der Station BSEA1 zeigen 95 % aller Ereignisse eine Amplitude größer als 0.3 $\mu\text{m}/\text{s}$, an der Station BSEG

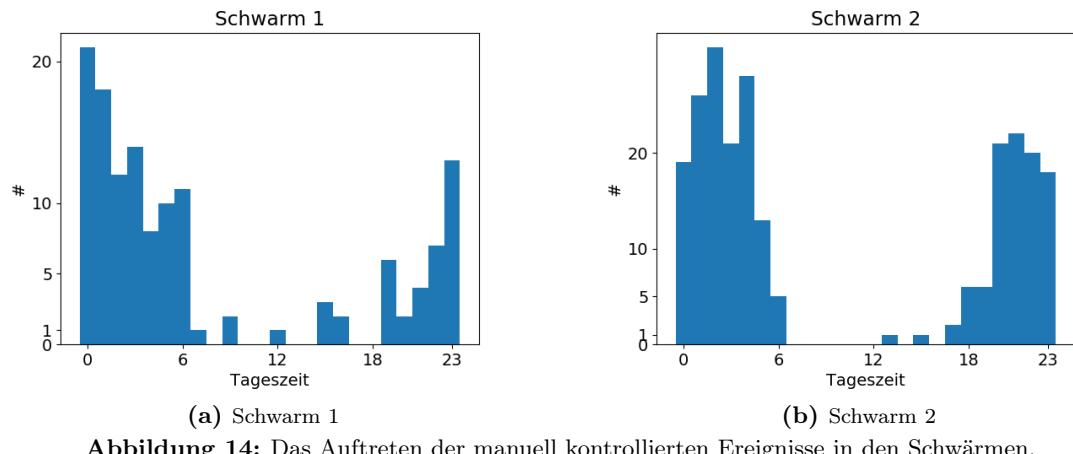


Abbildung 14: Das Auftreten der manuell kontrollierten Ereignisse in den Schwärmen.

sind sie größer als $0.06 \mu\text{m}/\text{s}$. Das 90% Perzentil des über die Zeiträume beider Schwärme gemittelten Rauschpegels befindet sich in der gleichen Größenordnung, jedoch zeigen nur wenige Ereignisse eine so niedrige Amplitude auf. Der Großteil aller Ereignisse übersteigt das Rauschlevel deutlich. Ein Auftreten weiterer signifikanter Ereignisse in den Tagesstunden kann somit ausgeschlossen werden. Die höhere Amplitude in Stipsdorf ist mit den unterschiedlichen Untergrundsituationen zu erklären. BSEA1 sitzt auf den weichen Oberflächensedimenten mit geringeren seismischen Geschwindigkeiten. Diese resultieren in höheren Amplituden. BSEG steht auf dem Gestein des Salzstocks welches im Vergleich deutlich höhere seismische Geschwindigkeiten und damit geringere Amplituden zeigt.

5.3 Dauer

Die Dauer der Ereignisse wird über den Pegel des Hintergrundrauschen und die Enveloppe mittels Schwellwertüberschreitungen bestimmt. Insbesondere bei kleinen Ereignissen ist die Methode nicht unbedingt präzise, kann aber die meisten Fälle behandeln. Bei den Ereignissen der Schwärme ist die Dauer von der Definition des Endes abhängig. In der Regel klingt die Amplitude mit der Zeit ab und verschwindet nach einigen Sekunden im Hintergrundrauschen. Definiert wird das Ende über ein Perzentil des Rauschens. Die Länge der Ereignisse ist von dieser Definition abhängig. Hier wurde ein 75 % Perzentil des Rauschpegels vor dem Ereignis verwendet, das heißt, das Ereignis endet dann, wenn die Enveloppe auf das 75 prozentige Mittel des Rauschens abgefallen ist. Die Natur der Ereignisse sorgt auch dafür, dass Amplitude und Dauer stark miteinander korrelieren. Je stärker ein Ereignis ist, desto stärker hebt es sich aus dem Hintergrundrauschen ab und braucht auch länger um wieder auf dieses zurück zu fallen (Abb. 16a). Es ist also nicht überraschend, daß ein höheres Signal-Rausch Verhältnis zu größeren Signaldauern führt. Dennoch sind die meisten Ereignisse lediglich ein paar Sekunden lang, nur wenige dauern länger als 10 s (Abb. 16b). Dass die Ereignisse an BSEA1 im Schnitt länger andauern als an BSEG liegt an der allgemein höheren Amplitude.

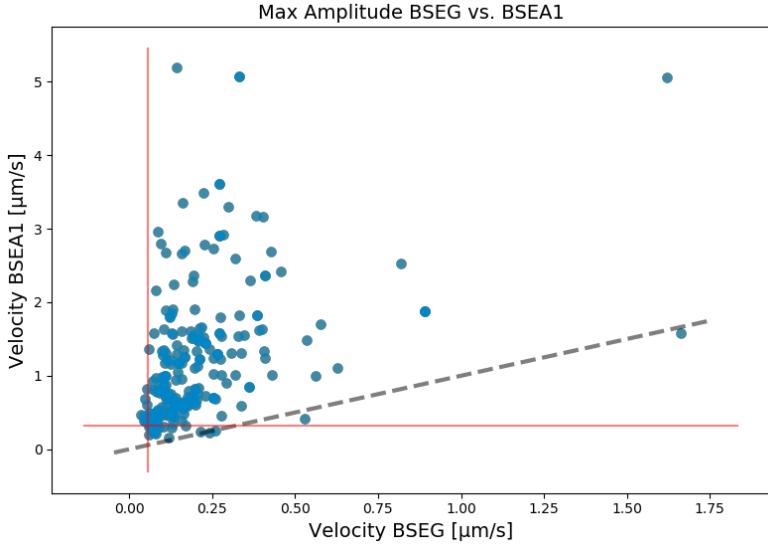
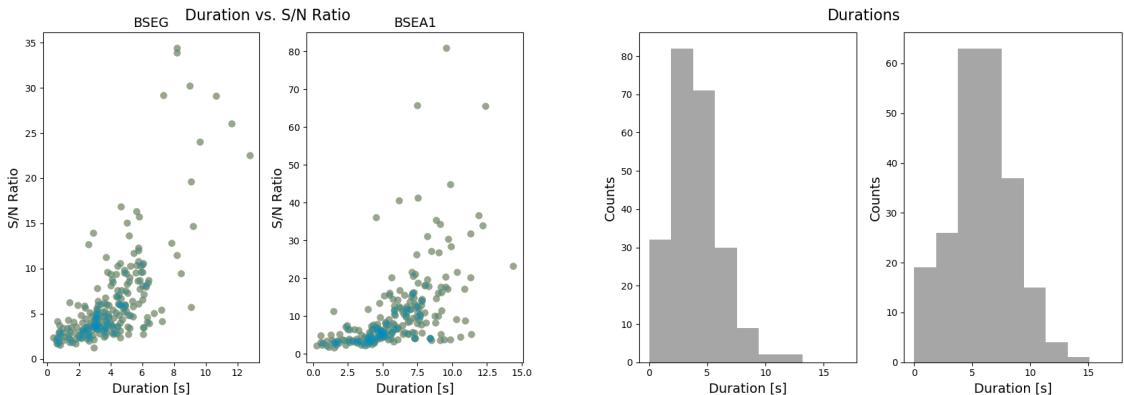


Abbildung 15: Amplitude (Bodenschwinggeschwindigkeit) der Vertikalkomponente aller manuell kontrollierten Ereignisse in beiden Schwärmen an den Stationen BSEG (X-Achse) und BSEA1 (Y-Achse). Die absolute Amplitude ist in Stipsdorf höher als im Kalkberg. Die gestrichelte Gerade zeigt das Amplitudenverhältnis 1:1 an. In rot sind die gemittelten 90% Perzentil Rauschpegel über beide Schwärme der jeweiligen Stationen (Z-Komponenten) eingezeichnet. Die meisten Ereignisse zeigen Amplituden, welche das Tagesrauschlevel deutlich übersteigen.



(a) Länge der Ereignisse und ihr Signal-Rausch Verhältnis

(b) Verteilung der Ereignislängen (Z-Komponente) an BSEG (links) und BSEA1 (rechts)

Abbildung 16: Charakteristische Eigenschaften der Ereignislängen in beiden Schwärmen an allen Komponenten. Die Ereignisse haben eine Dauer von wenigen Sekunden, selten mehr als 10 s. Lange Ereignisse sind häufig die Stärksten.

5.4 Ähnlichkeit

Eine Ähnlichkeitsanalyse zeigt, ob sich die Ereignisse untereinander in ihrer Wellenform ähneln. Dazu wird zu jedem Ereignis ein 30 s langes Fenster ausgeschnitten. Diese Fenster werden alle gegeneinander korreliert. Das Maximum des Korrelationskoeffizienten dient als Ähnlichkeitsparameter. Die Werte lassen sich in einer Matrix darstellen, in der jeder Eintrag einer Ereignis-Ereignis Kombination entspricht. Die Hauptdiagonale enthält Einsen, da dort jedes Ereignis mit sich selbst korreliert wurde (Autokorrelation). Die Matrix kann iterativ von links nach rechts bzw. von oben nach unten absteigend nach den Korrelationskoeffizienten sortiert werden. Dadurch entsteht eine sortierte Ähnlichkeitsmatrix (Abbildung 17a). Die meisten Ereignis-Ereigniskombinationen zeigen Maxima in den Korrelationskoeffizienten die sich um 0.35 bewegen (Abbildung 17b). Kombinationen mit schlechteren Korrelationen treten häufiger auf, als Kombination mit besseren Kombinationen. Nur wenige Kombinationen überschreiten überhaupt ein Maximum von 0.6, häufig sind dies Ereignisse mit einem höheren Signal-Rausch Verhältnis. Insgesamt ist die Ähnlichkeit der Ereignisse untereinander aber als nicht besonders hoch zu bewerten.

Daraus lässt sich ableiten, dass es sich um sehr variable Quellen handeln muss, zunächst einmal im Quellmechanismus, aber möglicherweise auch in der Quelllokation. Ein einziger, lokalisierter Prozess mit konsistenter Quelfunktion kann also weitestgehend ausgeschlossen werden.

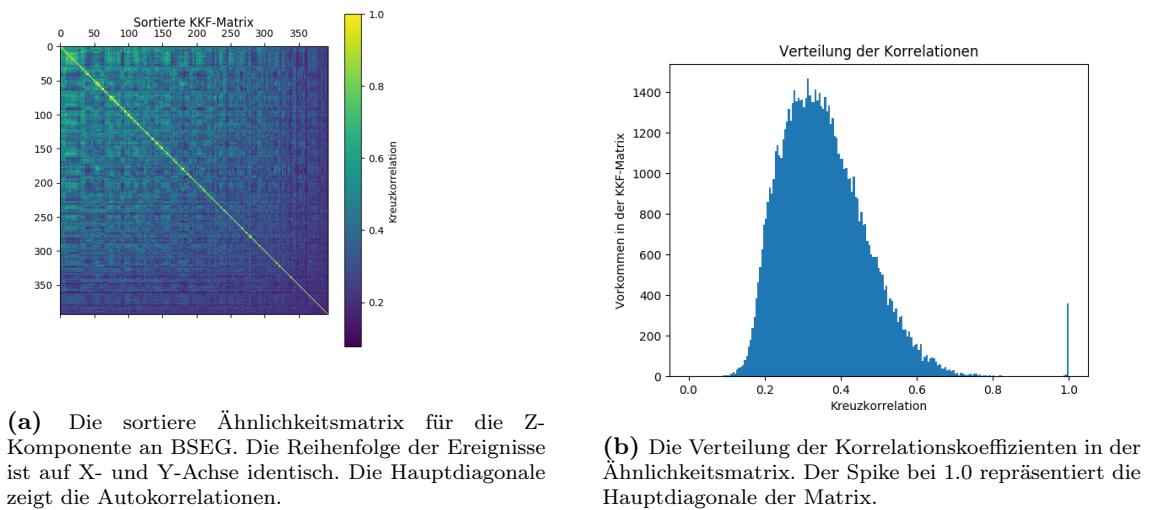


Abbildung 17: Ähnlichkeitsanalyse der Ereignisse beider Schwärme (jeweils nur Vertikalkomponente).

5.5 Korrelation mit externen Faktoren

Auch wenn nicht auszuschließen ist, dass die hier betrachteten Ereignisse anthropogenen Ursprungs sind, ist diese Quelle dennoch unwahrscheinlich. Anthropogenes Rauschen, zum Beispiel durch Straßenverkehr, Bauarbeiten oder sonstige Maschinerie induziert, ist typischerweise insbesondere in den höheren Frequenzen von 20 bis 50 Hz und darüber hinaus

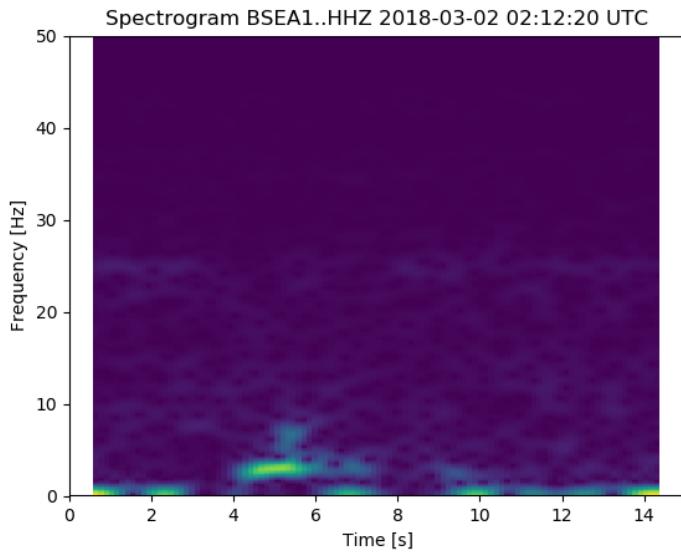


Abbildung 18: Beispielhaftes Spectrogramm für ein Ereignis des Schwarms. Dargestellt ist das Spectrogramm für die Vertikalkomponente an der Station BSEA1. Die Wellenform dieses Ereignisses ist in Abbildung 12a gezeigt.

zu beobachten. Diese Ereignisse zeigen diese Charakteristik jedoch nicht. Ihr typischer Frequenzgehalt liegt zwischen 1 und 7 Hz (Abb. 18). In höheren Frequenzbändern finden sich keine Anzeichen mehr für die Ereignisse.

Eine Besonderheit zeigt sich jedoch im Vergleich mit meteorologischen Beobachtungen. Das Auftreten der beiden Ereignisschwärme korreliert mit Perioden besonders niedriger Temperatur [Ortmann (2020)] weit unterhalb des Gefrierpunktes (Abbildungen 19 und 20). Die Perioden im Februar/März 2018 sind die kältesten Tage in der gesamten Laufzeit des Netzwerks. Auch im Winter 2018/2019 sind Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes aufgetreten, jedoch nicht bis in den zweistelligen Bereich und nur über kürzere Zeiträume. Damit stehen diese beiden Zeiträume aus dem gesamten Aufzeichnungsbereich heraus und könnten auch erklären, warum das Phänomen bislang nicht erneut aufgetreten ist. Die Korrelation zwischen Temperaturabfall und Auftreten der Ereignisse ist direkt. Sollten die Temperaturen für das Auftreten verantwortlich sein, dann muss die Quelle in unmittelbarer Nähe zur Oberfläche liegen oder der Außenluft direkt ausgesetzt sein. Eine Propagation der Kälte in die Sedimente findet praktisch nicht statt, da diese eine längere Zeit in Anspruch nehmen würde. Die Ereignisse hören dann auf, wenn die Tiefsttemperaturen wieder den Taupunkt erreichen. Es sei daran erinnert, dass ein Unterschied von wenigen Grad in den absoluten Temperaturwerten zwischen der Messstation in Kiel und dem Untersuchungsgebiet in Bad Segeberg bestehen bleiben kann.

5.6 Fazit

Im Februar und März 2018 konnten zwei Zeiträume mit einer signifikant überdurchschnittlichen Häufung von Detektionen in einem STA/LTA Detektionsprozess festgestellt werden.

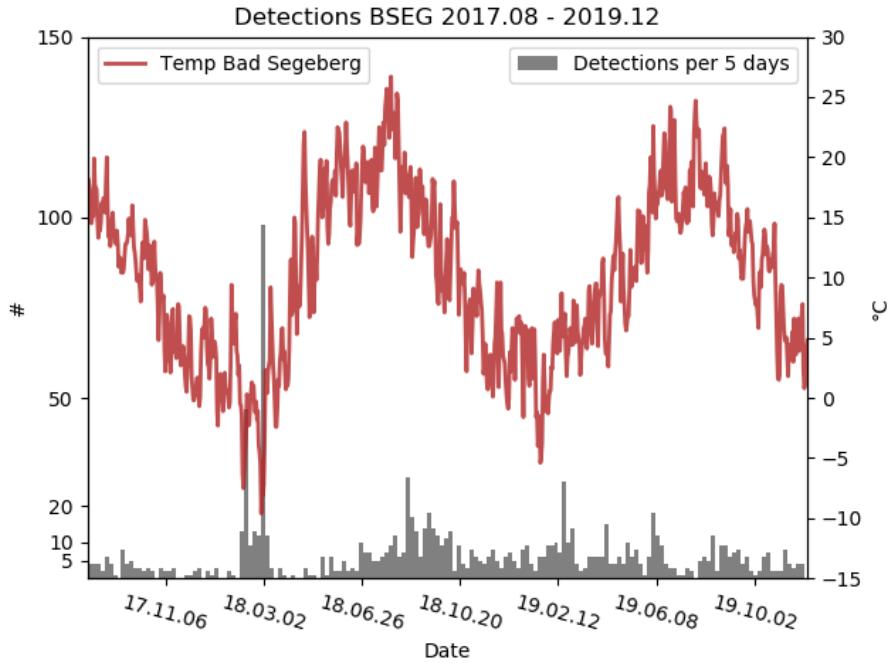


Abbildung 19: Vergleich zwischen Tagesmitteltemperatur von Bad Segeberg und der Anzahl der Detektionen über jeweils 5 Tage.

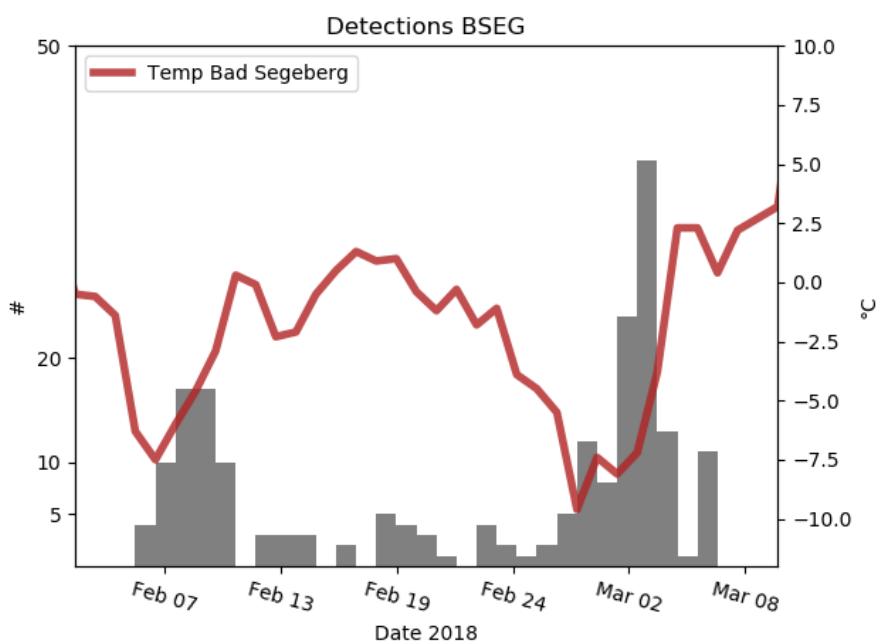


Abbildung 20: Ausschnitt aus Abbildung 19. Vergleich zwischen Tagesmitteltemperatur 5 cm über dem Boden gegen die Anzahl der Detektionen über 3 Tage im Zeitraum der beiden Ereignisschwärme Anfang Februar und Anfang März 2018.

Die zwei Ereignisschwärme sind lediglich an den Stationen BSEG und BSEA1 zu beobachten. Sowohl vor als auch nach diesem Zeitraum ist das Phänomen nicht mehr zu beobachten (Stand Dezember 2019). Die Ereignisse können zu einem großen Teil mithilfe einer angepassten Variante des STA/LTA Detektors identifiziert werden. Insgesamt werden etwas über 300 Einzelereignisse diesen beiden Schwärmen zugerechnet. Hauptsächlich sind diese Ereignisse nur in den Nachtstunden vorhanden und ein Auftreten tagsüber kann nahezu ausgeschlossen werden. Die Ereignisse zeigen untereinander über beide Schwärme hinweg ähnliche Charakteristika. Die Verteilung der Signal-Rausch-Verhältnisse ist ebenso vergleichbar wie die Verteilung der Längen und maximalen Amplituden. Eine Analyse der Wellenformähnlichkeit zeigt, dass es zwar viele Ereigniskombinationen mit Korrelationen von mindestens 0.5 gibt, jedoch sind kaum Kombinationen mit sehr hohen Korrelationen vorhanden. Es konnte keine Eigenschaft eines Ereignisses gefunden werden, welche dieses mit Sicherheit einem der beiden Schwärme zuordnen ließe. Somit muss von einem sehr variablen Quellprozess und möglicherweise auch variierender Quelllokation ausgegangen werden.

Der Vergleich mit den Tagesmitteltemperaturen zeigt eine starke Korrelation von Perioden starken Frostes mit dem Auftreten der beiden Schwärme. Das Szenario tritt, wie auch die Schwärme, in der anschließenden Laufzeit des Netzwerks nicht wieder auf. Die Ereignisse entstanden also höchstwahrscheinlich durch Frostspiegelungen von oberflächennahem Wasser, wobei auch Klüfte im flacheren Untergrund einzuschliessen sind.

In [Weidle et al. (2019)] wurde bereits aufgrund einer Polarisationsanalyse eine Quellregion zwischen dem Segeberger Kalkberg und Stipsdorf postuliert und die Magnitude der Ereignisse mit -1 bis 0 geschätzt.

Die Auswertung dieser Ereignisse verdeutlicht die Empfindlichkeit des lokalen seismischen Netzes um Bad Segeberg für schwache seismische Ereignisse jeglichen Ursprungs.

6 Vergleich historischer Erdbebenkataloge für den Bereich der südwestlichen Ostsee

In vorangegangenen Arbeiten zur Seismizität in SH wurde immer Bezug auf den Leydecker Katalog ([Leydecker (2011)]) genommen, welcher - nicht zu Unrecht - als Referenz für historische Seismizität in Deutschland gilt. Ein generelles Problem mit seismischen Katalogen besteht aber häufig an den Randbereichen der betrachteten Region, wo Kataloge häufig unvollständig, schlechter lokalisiert und auch unzuverlässiger klassifiziert werden. Dies betrifft in SH den Bereich der südwestlichen Ostsee, wo Ereignisse im Leydecker Katalog gelistet sind, deren Zuverlässigkeit sowohl in Herdparametern (Ort und Zeit) als auch in der Klassifizierung (tektonisch oder Sprengung) aber schwer zu bewerten ist.

Deshalb wurden in 2019 erste Schritte unternommen, um den Leydecker-Katalog im südwestlichen Ostseeraum mit historischen Katalogen aus dem skandinavischen Raum abzulegen. Ein solcher Katalogabgleich ist im allgemeinen sehr aufwändig und erfordert manuelle Durchsicht aller Ereignisse, um eine verlässliche Zuordnung von Ereignissen in verschiedenen Katalogen sicherzustellen. So ist beispielsweise die Herdzeit bei historischen Ereignissen nur sehr ungenau beschrieben - Abweichungen in der Jahreszahl sind nicht unüblich und taggenaue Angaben fehlen häufig. Oder die Klassifizierung eines Ereignisses als tektonisch oder Sprengung ist widersprüchlich. Zuguterletzt sind die in den Katalogen enthaltenen Parameter und Formate nicht konsistent, was eine EDV unterstützte Auswertung erschwert. Daher ist eine detaillierte Zusammenführung verschiedener Kataloge, zumal historischer, eine Aufgabe für sich und kann im vorgelegten Rahmen nur angestossen und mögliche Bearbeitungswege aufgezeigt werden.

6.1 FENCAT - historischer Erdbebenkatalog für Fennoskandinavien

Basierend auf der Arbeit von [Ahjos & Uski (1992)] wird an der Universität Helsinki (Finnland) der "Fennoscandian Earthquake Catalog"(FENCAT) kompiliert und kontinuierlich ergänzt. Der Datensatz ist frei verfügbar und kann von der Webseite der Universität Helsinki heruntergeladen werden [FENCAT]. Der Katalog umfasst von verschiedenen Agenturen in den skandinavischen Ländern berichtete seismische Ereignisse seit dem Jahr 1375, vornehmlich basierend auf einer Reihe von Studien zu historischer Seismizität im baltischen Raum und in instrumenteller Zeit auf Katalogen der Datenzentren in den jeweiligen Staaten.

In den folgenden Abbildungen werden kumulative Seismizitätskarten für Ereignisse bis zum genannten Jahr für die verschiedenen Kataloge verglichen und wesentliche Elemente diskutiert.

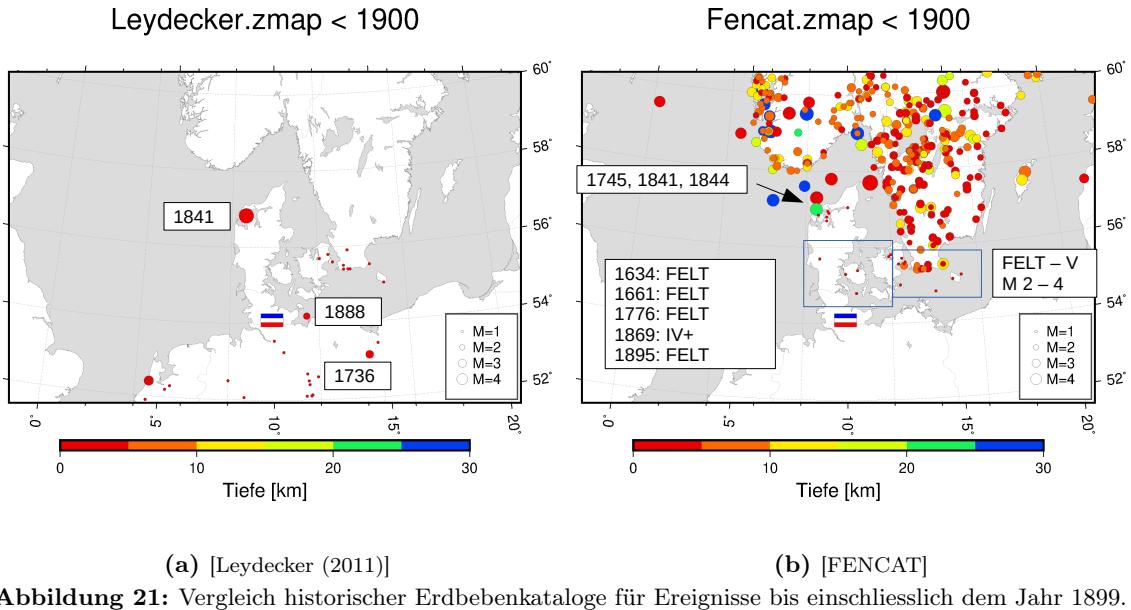


Abbildung 21: Vergleich historischer Erdbebenkataloge für Ereignisse bis einschliesslich dem Jahr 1899.

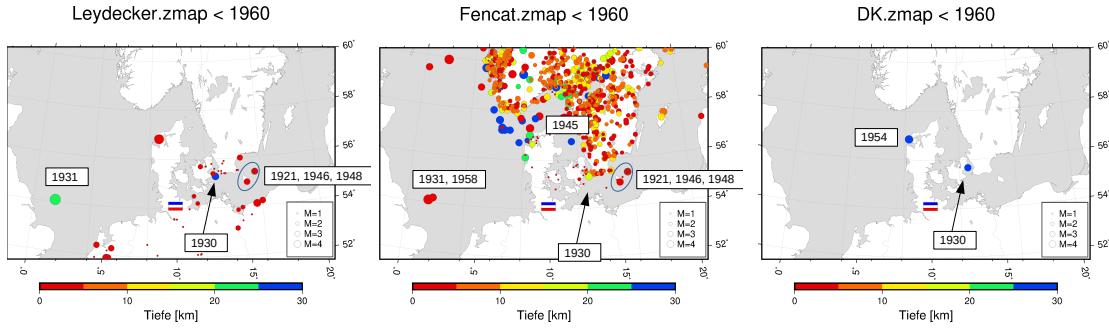
6.2 Historische Ereignisse im Zeitraffer

6.2.1 Ereignisse vor 1900

Abb. 21 zeigt den Leydecker und den FENCAT Katalog in einheitlicher Darstellung für Ereignisse von Norddeutschland bis Süd-Skandinavien bis einschliesslich dem Jahr 1899. Auffällig ist zunächst eine viel höhere Anzahl von Ereignissen im FENCAT Katalog mit zugewiesener Magnitude. Ereignisse ohne Magnitudenangabe sind als kleine Punkte dargestellt. Im Überlappungsbereich der Kataloge ist das Ereignis vom Nachmittag des 3. April 1841 im Norden Jütlands erwähnenswert (M 5.4 bei Leydecker, M 4.5 in FENCAT), FENCAT listet in derselben Region aber noch weitere signifikante Ereignisse (1745, 1844) welche in Leydecker fehlen. An der Südspitze Schwedens gibt es in FENCAT eine Reihe von gespürten Ereignissen bis zu Intensität V bzw. Magnituden zwischen 2 und 4, welche ebenfalls zu großen Teilen in Leydecker gelistet werden. Interessant sind zudem in FENCAT fünf Ereignisse zwischen 1634 und 1895 in Dänemark (v.a. Süd-Jütland und Fyn), welche von der Bevölkerung gespürt wurden, in Leydecker aber fehlen. Diese Ereignisse könnten als konsistent mit wiederkehrenden Ereignissen in jüngerer Zeit mit Magnituden um 3 in der Region interpretiert werden. Erwähnenswert ist auch das Ereignis 1888 in der Lübecker Bucht, welches in Leydecker, nicht aber in FENCAT gelistet ist. Gleicher gilt für das Ereignis 1736 in Vorpommern, welches aber außerhalb des für FENCAT relevanten Bereiches liegt.

6.2.2 Ereignisse vor 1960

Nach 1900 konnten die ersten Ereignisse instrumentell aufgezeichnet werden, bspw. an der 1903 erstmals eingerichteten Station auf Helgoland. Seit 1930 erstellt der nationale geologische Dienst von Dänemark (GEUS) ebenfalls einen eigenen Erdbebenkatalog



(a) [Leydecker (2011)]

(b) [FENCAT]

(c) [Dänischer Katalog]

Abbildung 22: Vergleich historischer Erdbebenkataloge für Ereignisse bis einschliesslich dem Jahr 1959.

([Dänischer Katalog]), welcher im folgenden miteinbezogen werden soll (Abb. 22).

In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts gab es im südwestlichen Ostseeraum im Jahr 1930 ein signifikantes Ereignis im Bereich des Öresundes, welches in allen drei Katalogen gelistet ist. Ebenso zeigen Ereignisse um Bornholm aus den Jahren 1921, 1946 und 1948 eine hohe Konsistenz zwischen Leydecker und FENCAT. Interessant sind das Hinzukommen weiterer Ereignisse im Norden Jütlands, u.a. das Ereignis vom Nachmittag des 18. Oktober 1954 mit M 4.6 im GEUS Katalog, aber nur M 2.9 in FENCAT. Diese Ereignisse fehlen in Leydecker. Andererseits listet Leydecker zwei Ereignisse auf Fehmarn in den Jahren 1906 und 1907 und eine Reihe von Ereignissen an der nordpolnischen Küste, welche sowohl in FENCAT als auch dem GEUS Katalog fehlen.

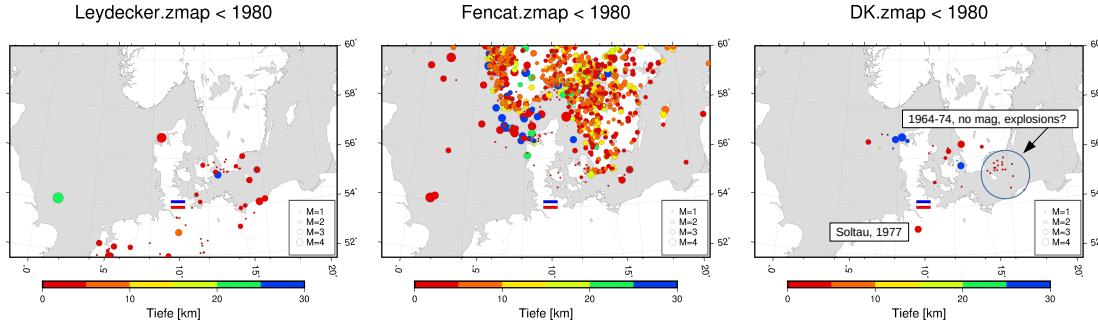
Interessant sind auch Ereignisse in der westlichen Nordsee in den Jahren 1931 (M 6.1 in Leydecker und M 5.5 in FENCAT) und 1958 (M 4.4 in FENCAT, fehlt in Leydecker).

6.2.3 Ereignisse vor 1980

Zwischen 1960 und 1980 sind v.a. zwei Aspekte im Vergleich der Kataloge hervorhebenswert (Abb. 23). Zum einen das Ereignis von Soltau 1977 mit einer Magnitude von 4, welches im Leydecker und im GEUS Katalog gelistet wird, und als eines der stärksten gemessenen Ereignisse in Norddeutschland gilt. Zum anderen finden sich im GEUS Katalog eine Vielzahl von nicht quantifizierten, aber mit Sprengungsverdacht bezeichneten Ereignissen in der Ostsee um die Insel Bornholm zwischen 1964 und 1974. In dieser Gegend sind militärische Aktivitäten nicht unüblich. Im Leydecker Katalog sind diese Ereignisse nicht gelistet.

6.2.4 Ereignisse vor 1990

In den 80er Jahren gab es eine Reihe von nennenswerten Ereignissen, welche relativ konsistent in allen Katalogen gelistet werden (Abb. 24). Ein Ereignis bei Bornholm in 1981, und Ereignisse in der südlichen Nordsee, jeweils mit Magnituden um 3-4, aber leichten Abweichungen in der Magnitudenbestimmung zwischen GEUS und Leydecker. Nennenswert ist auch das wahrscheinlich erste katalogisierte Sprengungsergebnis in der Eckernförder Bucht von 1983 mit M 2.2.

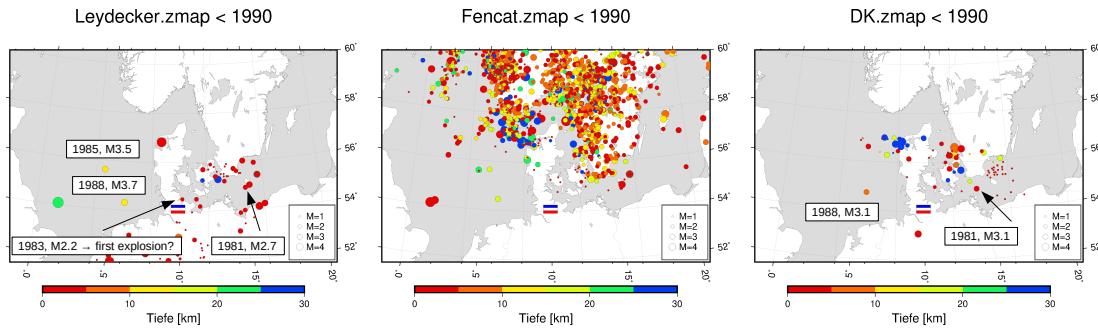


(a) [Leydecker (2011)]

(b) [FENCAT]

(c) [Dänischer Katalog]

Abbildung 23: Vergleich historischer Erdbebenkataloge für Ereignisse bis einschliesslich dem Jahr 1979.

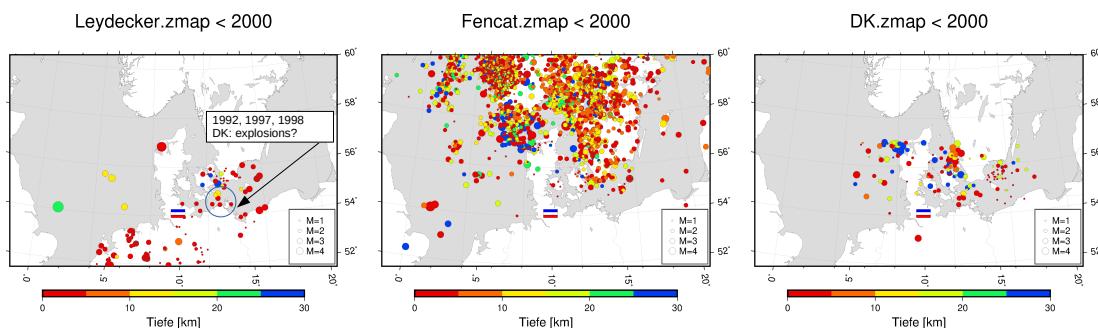


(a) [Leydecker (2011)]

(b) [FENCAT]

(c) [Dänischer Katalog]

Abbildung 24: Vergleich historischer Erdbebenkataloge für Ereignisse bis einschliesslich dem Jahr 1989.



(a) [Leydecker (2011)]

(b) [FENCAT]

(c) [Dänischer Katalog]

Abbildung 25: Vergleich historischer Erdbebenkataloge für Ereignisse bis einschliesslich dem Jahr 1999.

6.2.5 Ereignisse vor 2000

In den 90er Jahren schliesslich sind vor allem eine Reihe von Ereignissen im Bereich der Ostsee um Rügen und Richtung der süddänischen Inseln Mön und Falster zu nennen (Abb. 25). Drei dieser Ereignisse von 1992, 1997 und 1998 aus Leydecker konnten im GEUS Katalog zugeordnet werden. Während Leydecker diese Ereignisse als "tektonisch" markiert, werden diese im GEUS Katalog einer Sprengung verdächtigt. Welche dieser Bewertungen am Ende zu bevorzugen ist, lässt sich ohne Auswertung aller verfügbaren Wellenformdaten zu diesen Ereignissen nicht abschliessend feststellen. Die unterschiedliche Bewertung verdeutlicht aber noch einmal die Signifikanz des Stationsausbaus im südwestlichen Ostseeraum um zukünftig solche ambivalenten Bewertungen ausschliessen zu können.

Aufgrund der zunehmenden Ereignisrate durch die intensivierte instrumentelle Erfassung zum Ende des 20. Jahrhunderts, wird eine Zuordnung einzelner Ereignisse zunehmend schwieriger. Für Zeiten nach 2000 wird darauf hier verzichtet, zumal sich durch den intensivierten Datenaustausch die Kataloge über die Ländergrenzen hinweg zunehmend konsistenter zeigen.

6.3 Diskussion

Der Vergleich historischer Kataloge aus Deutschland, Dänemark und dem skandinavischen Raum im Bereich der südwestlichen Ostsee zeigt allgemein eine große Übereinstimmung in Auftreten und Lokalisierung historisch belegter seismischer Ereignisse. Unsicherheiten bestehen in Einzelfällen in der Magnitudenbestimmung historischer Ereignisse, oder in jüngerer Zeit auch in der Klassifizierung einzelner Ereignisse als Sprengung oder Erdbeben. Konsistent mit dem heutigen Bild der Seismizität ist in den historischen Katalogen eine im Allgemeinen moderate Stärke der Ereignisse bis Magnituden um 3, aber auch Ereignisse mit Magnituden im Bereich 4-5 sind nicht ungewöhnlich. Beispiele hierfür sind das Beben von Oslo im Jahr 1904 (M 5.4, [Bungum et al. (2009)]) oder auch Ereignisse im Norden Jütlands, z.B. 1841 mit M 5.4 nach Leydecker bzw. M 4.5 nach FENCAT. Solch stärkere Ereignisse sind in instrumenteller Zeit zweifelsfrei dokumentiert, bspw. mit den Ereignissen bei Kaliningrad im Jahr 2004 (M 4.7 und M 4.6, [Grünthal et al. (2008)]) oder auch bei Malmö 2008 (M 4.3, [Voss et al. (2009)]). Signifikante Ereignisse aus instrumenteller Zeit in Norddeutschland sind das Beben von Soltau im Jahr 1977 (M 4) und in jüngerer Zeit Beben mit Magnituden größer 3 bei Wittenburg im Jahr 2000 und bei Rostock in 2001 [Grünthal et al. (2008)]. Hinzu kommen spürbare Ereignisse mit Magnituden größer 3 in Niedersachsen, bspw. das Beben von Rotenburg 2004 (M 4.5) oder jüngst bei Verden im November 2019 mit M 3.2 (siehe Abschnitt 4.1), welche vermutlich im Zusammenhang mit der Erdgasförderung stehen und somit als induzierte seismische Ereignisse klassifiziert wurden.

Im Vergleich zu Süddeutschland treten in Norddeutschland tendenziell weniger natürliche seismische Ereignisse auf. Es zeigt sich aber eine Zunahme in Anzahl und Stärke der Ereignisse in Richtung Südkandinavien. Im zentralen Skandinavien wird der Einfluss post-

glazialer Hebungen auf das rezente Spannungsfeld als Hauptursache für die Seismizität angeführt. Die Ursachen der natürlichen seismischen Aktivität in Norddeutschland sind andererseits nicht genau bekannt. Deformationen in postglazialen Sedimenten werden auch hier mit Spannungsänderungen durch postglaziale Hebung in Verbindung gebracht (z.B. [Hoffmann & Reicherter (2012)], [Brandes et al. (2015)], [Grube (2019)]). Die Bedeutung postglazialer Prozesse für das heutige Spannungsfeld in Norddeutschland ist aber unklar. Wenige, bisher im südlichen Ostseeraum bestimmte Herdmechanismen deuten auf eine Konsistenz mit der maximalen horizontalen Hauptspannung in der Erdkruste hin, welche in Norddeutschland etwa in Nord-Süd-Richtung orientiert ist [Grünthal et al. (2008)].

Die im Jahr 2019 aufgetretenen seismischen Ereignisse (siehe Abschnitt 4) sind also insgesamt in Einklang mit der historischen Seismizität im südwestlichen Ostseeraum zu bewerten: Ereignisse mit Magnituden bis zu 5 sind für Südkandinavien und die Nordsee nicht unüblich, in Norddeutschland sind Beben mit Magnituden um 3 gut dokumentiert, im Bereich der niedersächsischen Gasfelder sogar bis Magnitude 4.5. Ereignisse mit Magnituden unter 2 sind in Schleswig-Holstein bisher instrumentell kaum erfasst, was die Bedeutung einer intensiveren Überwachung sowie einer detaillierten Analyse auftretender Ereignisse, z.B. durch die Bestimmung von Herdmechanismen, unterstreicht.

7 Auswertung von historischen Nivellementdaten

In 2019 wurden erstmals Datenanalysen anhand der amtlichen Nivellements über Schleswig-Holstein vorgenommen, mit dem Ziel auch historische Messungen vor der Erstellung des Deutschen Haupthöhennetzes 1985 (DHHN85 Westdeutschland), bzw. DHHN92 (Gesamtdeutsches Haupthöhennetz 1992) in die Bodenbewegungsbetrachtungen einbeziehen zu können. Die Motivation für diese Arbeiten ist, dass einige dieser Messungen lange zurückliegen und Vergleiche daher lange Zeiträume überspannen können. Das hat zum Einen den Effekt, dass trotz größerer Ungenauigkeiten der Einzelmessung die Mittelung über die Zeit zu verlässlichen Ergebnissen führen könnte. Zum anderen ermöglichen uns diese Daten eventuell Aussagen über die Dauer der Aktivität von heute beobachteten Bodenbewegungsprozessen zu machen sowie Einschätzungen darüber, ob diese Prozesse gleichmäßig verlaufen oder Schwankungen unterworfen sind.

Die Nivellementdaten wurden uns vom Landesamt für Vermessung und Geoinformation Schleswig-Holstein zur Verfügung gestellt. Zunächst wurden die komplexen Tabellen der ALK-Punktdaten (ALK - Amtliches Liegenschaftskataster) mit Informationen zu den Festpunkten der Landesvermessung Schleswig-Holsteins in ein Geoinformationsystem eingepflegt. Diese Informationen schließen unter anderem Angaben über die Art des Messpunktes, die Messjahre, gemessene Höhen im jeweiligen Haupthöhensystem und zum Teil auch Angaben zum formalen Fehler der Messung (meist nur bei Messungen nach 1960) mit ein. Es wurden im Weiteren nur die Punkte betrachtet, die wiederholt eingemessen wurden (Abb. 26 und 27). Von diesen Festpunkten sind fast alle bis 1985 einmal eingemessen worden (Abb. 26) und Höhenwerte liegen für diese frühen Messungen ausschließlich im Haupthöhensystem 1912 (DHHN12) vor. Für die jeweils nachfolgenden Messungen liegen die Höhenangaben jeweils im Haupthöhensystem 1985 (DHHN85) vor (Abb. 27). Die Zeitspannen der Wiederholungsmessungen sind in Abbildung 28 dargestellt.

Ein direkter Vergleich der Höhen und die Ableitung von Bodenbewegungen ist aufgrund der unterschiedlichen Bezugssysteme und der sehr großen Zeiträume, die die Erstmessungen überspannen, nicht ohne weiteres möglich. Zum einen gibt es keine direkte und eindeutige Umrechnung der Höhen vom Höhensystem DHHN12 in die jüngeren Höhensysteme. Jedoch sollte sich der systematische Unterschied der Höhensysteme DHHN12 und DHHN85 auf einen generellen Höhenunterschied von wenigen Zentimetern und einen leichten Ost-West-Trend beschränken (pers. Kommunikation Andreas Gerschwitz, LVerMGeo SH). Weitaus größere Probleme bereiten die oft sehr viele Jahre auseinander liegenden Nivellementmessungen im Höhensystem DHHN12 (Abb. 26). Da beim Nivellieren neuere Messstrecken an vorherige Messstrecken angeknüpft werden, können große Fehler entstehen, wenn an den jeweiligen Anschlusspunkten seit der letzten Messung Bewegungen stattgefunden haben [AdV und AK-Niv6 (1995)]. Dann wären die Höhendifferenzen zwischen Punkten von verschiedenen Messkampagnen verfälscht. Solche Verfälschungen werden wahrscheinlicher, je größer die Zeiträume zwischen den Anschlüssen der Messstrecken sind, weil Bewegungen am Messpunkt und/oder in der Umgebung wahrscheinlicher werden. So liegen zum Beispiel vie-

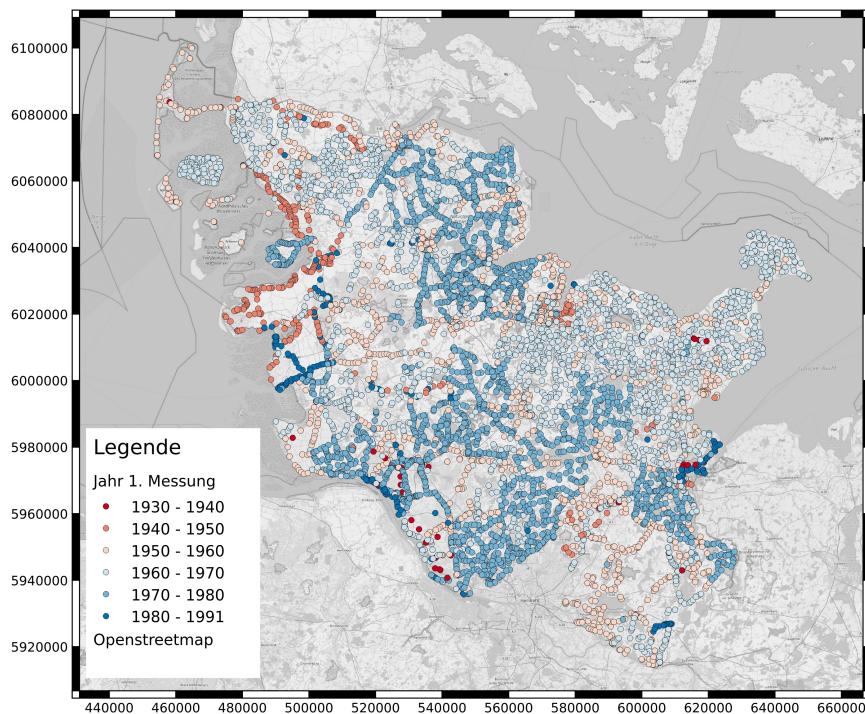


Abbildung 26: Festpunkte der Landesvermessung Schleswig-Holstein mit mindestens einer Wiederholungsmessung. Die Farbkodierung gibt das Jahr der ersten Messung an.

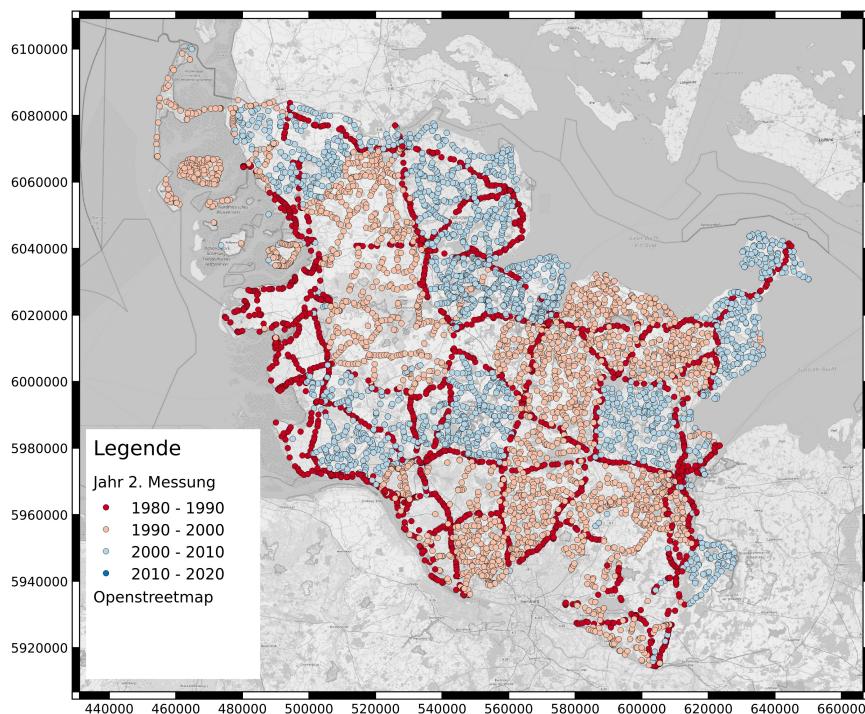


Abbildung 27: Festpunkte der Landesvermessung Schleswig-Holstein mit mindestens einer Wiederholungsmessung. Die Farbkodierung gibt das Jahr der zweiten Messung an.

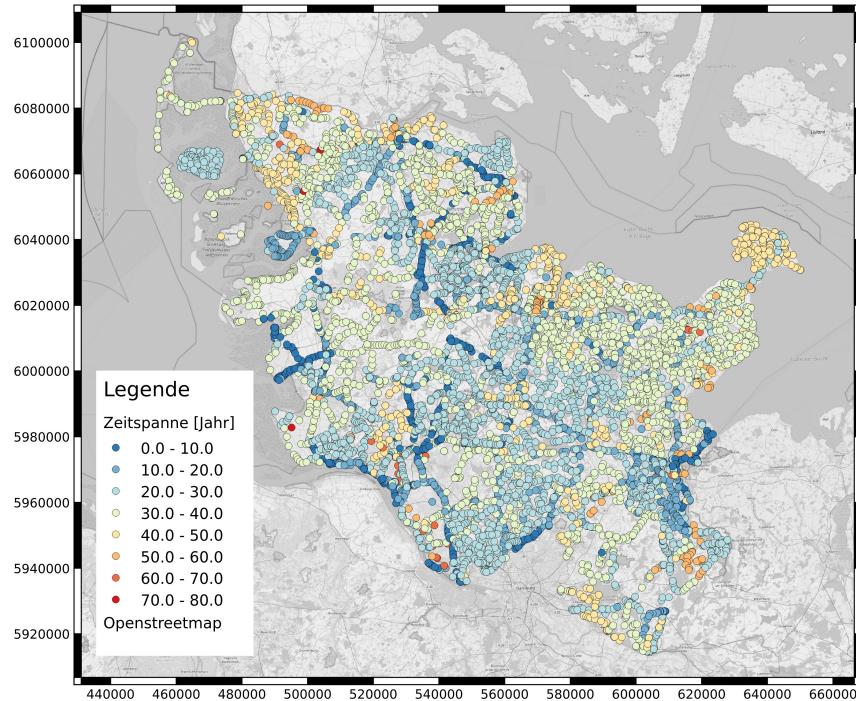


Abbildung 28: Festpunkte der Landesvermessung Schleswig-Holstein mit mindestens einer Wiederholungsmessung. Die Farbkodierung gibt die Zeitspanne zwischen den Wiederholungsmessungen an.

le Messpunkte entlang überregionaler Straßen, an denen häufig Bauvorhaben stattfinden, welche mutmaßlich Bewegungen an den Festpunkten auslösen [AdV und AK-Niv6 (1995)]. Es bestehen weitere negative Einflüsse auf die Messgenauigkeit. Unter anderem kann starker Verkehr die Messgenauigkeit negativ beeinflussen sowie der häufig sehr große Abstand der Festpunkte zueinander [AdV und AK-Niv6 (1995)].

Die genannten Effekte sind teilweise in den abgeleiteten Bodenbewegungsgeschwindigkeiten erkennbar. Nahe der Elbe in dem Gebiet um Brokdorf schwanken die abgeleiteten Bodenbewegungsgeschwindigkeiten stark zwischen benachbarten Punkten (Abb. 29). Benachbarte Punkte wurden hier oft in unterschiedlichen Jahren, erstmals und wiederholt, eingemessen (Abb. 26 und 27). Die abgeleiteten Geschwindigkeiten an diesen Festpunkten sind nicht ohne weiteres miteinander vergleichbar. In anderen Gebieten gibt es weniger starke Unterschiede bei den Messungen zwischen benachbarten Punkten und die abgeleiteten Geschwindigkeiten zwischen den Punkten variieren weniger stark. Ein Beispiel hierfür sind Messpunkte an der B203 westlich und östlich von Tellingstedt (Abb. 29). In der Konsequenz bedeutet dies, dass sich aus großräumigen Trends basierend auf diesen Daten keine gut bestimmten Höhenänderungen und Bodenbewegungen ableiten lassen.

Relative und kleineräumige Höhenänderungen lassen sich aus den vorliegenden Nivellementdaten unter bestimmten Bedingungen jedoch ableiten. Dafür setzen wir voraus, dass Nivellementmessungen einer Messkampagne, zum Beispiel innerhalb eines Jahres, in sich konsistent sind. Das heißt, dass diese Messungen keine großen relativen Höhenmessfehler zwischen den Festpunkten aufweisen. Entstehen nun durch Bodenbewegungen relative und signifikante Höhenänderungen zwischen diesen Festpunkten, dann werden diese Höhenän-

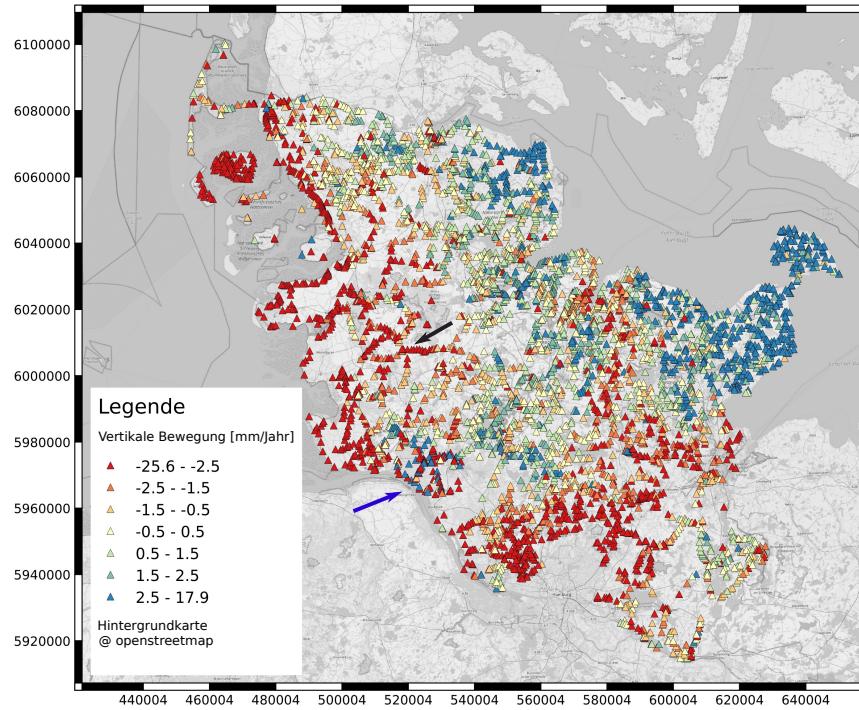


Abbildung 29: Aus Nivellementdaten mit sehr unterschiedlichen Messbedingungen abgeleitete vertikale Bodenbewegungsgeschwindigkeiten über Schleswig-Holstein. Der blaue Pfeil zeigt auf das Gebiet um Brokdorf, der schwarze Pfeil auf Tellingstedt.

derungen in eine folgende und ebenfalls in sich konsistente Nivellementmessung eingehen und dann auch in einer Höhendifferenz zwischen Punkten sichtbar werden. Meist überspannen solche konsistenten Messungen leider nur wenige Kilometer. Wir vergleichen im Folgenden nur noch Höhen zweier Messkampagnen, die jede für sich im selben Jahr stattgefunden haben und daher mit hoher Sicherheit in sich konsistent sind.

Auch beim Vergleich von in sich konsistenten Nivellementmesskampagnen muss die Messgenauigkeit der Einzelmessung bei der Analyse von Bodenbewegungen berücksichtigt werden. Dazu zählen hier die Genauigkeiten der Höhenmessung und der Zeitangaben. Höhenmessungen in den hier besprochenen Nivellementdaten haben Fehlerbereiche oberhalb von 2 mm. Damit ergeben sich Fehler in berechneten Höhendifferenzen $\sigma_{\Delta h}$, die der Summe der Fehler der Einzelmessungen entsprechen, von mindestens 4 mm. Langsame Bewegungen, wie wir sie in Schleswig-Holstein vermuten und bisher beobachtet, bauen also nur über lange Zeiträume Höhenänderungen auf, die signifikant über dem Messfehler liegen. In anderen Worten, je länger der Zeitraum zwischen den Messungen ist, desto kleiner werden die Fehler der abgeleiteten Geschwindigkeiten. Uns liegen nur Messjahre als Zeitangaben vor, nicht jedoch das genaue Datum einer Messung. Die Zeitspanne zwischen den Messungen ist also mit einer Unsicherheit $\sigma_{\Delta t}$ von maximal einem Jahr behaftet. Die Unsicherheiten in der Höhenmessung und der Zeitspanne gehen in die Berechnung der Genauigkeit der Bodenbewegungsgeschwindigkeit σ_v wie folgt ein:

$$\sigma_v = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\Delta h}}{\Delta h}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta t}}{\Delta t}\right)^2} \cdot |v|.$$

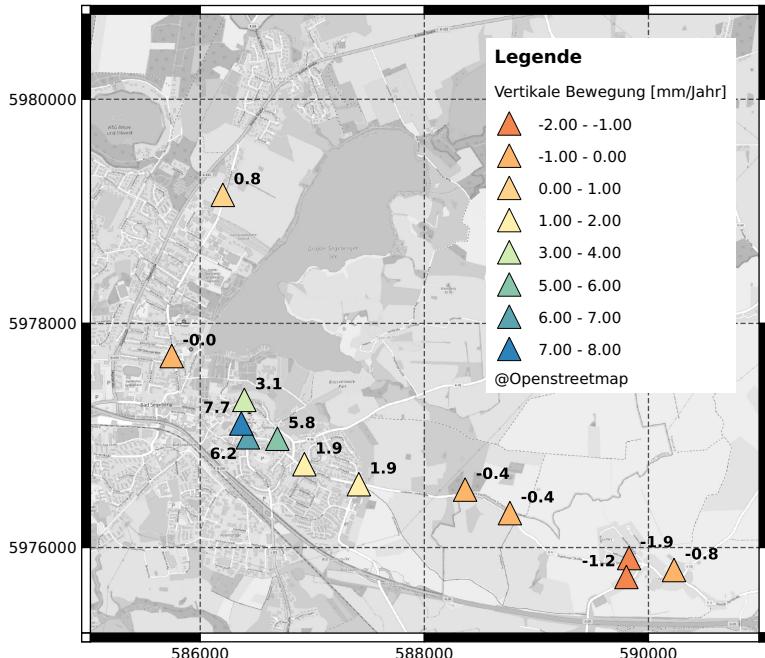


Abbildung 30: Abgeleitete Bodenbewegungsgeschwindigkeiten aus Nivellementdaten von jeweils homogenen Messkampagnen über Bad Segeberg. Die Geschwindigkeiten sind hier relativ zum westlichsten Messpunkt in der Kurhausstraße angegeben.

Um eine genügende Genauigkeit in den Bewegungsraten zu erreichen, werden im weiteren nur Messungen verfolgt, die mit mindestens 16 Jahren Zeitdifferenz eingemessen wurden. Die Differenzen in den Höhen, geteilt durch die jeweilige Zeitspanne zwischen den Messungen, ergeben vertikale Bodenbewegungsgeschwindigkeiten im Millimeterbereich pro Jahr (Abb. 29). Diese Resultate zeigen scheinbar räumlich stark unterschiedliche vertikale Bodenbewegungen über Schleswig-Holstein. Die großräumigen Trends sind, wie oben erwähnt, wahrscheinlich mit starken Artefakten behaftet. Für kleinräumige Untersuchungen relativer Bewegungsunterschiede besteht im Nord-Osten und in der Mitte Schleswig-Holsteins eine gute Überdeckung, während im Westen und Süd-Osten nur entlang von Hauptstraßen für unserer Zwecke brauchbare Messlinien existieren. Am Beispiel Bad Segeberg können wir die Aussagekraft der Nivellementdaten demonstrieren.

In Bad Segeberg und Umgebung gibt es Messungen aus zwei jeweils in sich konsistenten, Messkampagnen von 1956 und 1982 mit einem Zeitabstand von 26 Jahren. Die aus den Höhenunterschieden abgeleiteten vertikalen Bodenbewegungsgeschwindigkeiten zeigen, wie auch die Bodenbewegungsgeschwindigkeitsdaten aus der satellitengestützten Radarinterferometrie, eine deutliche Hebung im Bereich des Kalkbergs (Abb. 30). Die Geschwindigkeitsdifferenz von Messpunkten auf dem Kalkberg gegenüber den randlichen Messpunkten beträgt überwiegend deutlich mehr als 3 mm/Jahr. Zum Beispiel ergibt sich aus dem ermittelten Höhenunterschied zwischen dem Festpunkt am Kalkberg und dem weiter westlich gelegenen Festpunkt in der Kurhausstraße eine vertikale Bodenbewegungsgeschwindigkeit von mehr als 7 mm/Jahr. Diese Geschwindigkeitsdifferenzen sind deutlich größer als die etwa 1 mm/Jahr, die mit der InSAR Zeitreihenanalyse ermittelt wurden (Abb. 55).

Für die jüngeren Messungen in Bad Segeberg im Jahre 1982 werden die Messfehler in der ALK-Punkdatei formal mit etwa 4 mm angegeben und man kann einen mindestens ähnlich großen, wahrscheinlich jedoch größeren, Messfehler bei den älteren Messungen im Jahre 1956 annehmen. Die Genauigkeit der Höhendifferenzen $\sigma_{\Delta h}$ zwischen den Messungen von 1956 und 1982 ist die Summe der Fehler der Einzelmessungen und damit im besten Fall 8 mm.

In diesem genannten besten Fall ergibt sich eine Genauigkeit für die Geschwindigkeit von etwa 0.3 mm/Jahr. Das ist wahrscheinlich eine unrealistische Annahme. Jedoch erst Ungenauigkeiten $\sigma_{\Delta h}$ von 26 mm und mehr führen zu Geschwindigkeitsungenauigkeiten von 1 mm/Jahr und mehr. Die aus den Nivellementdaten abgeleiteten Geschwindigkeiten können folglich als sehr stabil angesehen werden.

Das am Bad Segeberger Kalkberg beobachtete Muster der Bewegung passt recht genau zu den heutigen Messungen. Es ist daher sehr wahrscheinlich, dass es sich um eine belastbare Beobachtung handelt, die sehr langzeitig wirkende Prozesse bestätigt, aber auch Schwankungen in deren Aktivität. Eine solche Analyse der Nivellementdaten kann für andere Gebiete angewendet werden, in denen durch InSAR Zeitreihenanalysen signifikante Geschwindigkeitsänderungen über kleinem Gebiet angezeigt werden und so helfen Beobachtungen und Thesen über die zugrundeliegenden Prozesse zu stützen.

8 Auswertung von ERS-Daten des Terra firma-Projekts

Wie im Kooperationsbericht 2018 angekündigt, konnte die Auswertung von PS-InSAR-Daten aus den historischen ERS-Missionen der ESA im Rahmen einer Bachelorarbeit im Bereich der Geophysik [Hoogestraat (2019)] vorangebracht werden. Diese Daten decken räumlich die südliche Hälfte von Schleswig-Holstein und den Zeitraum von 1992 bis 2001 ab. Sie beinhalten Zeitreihen relativer Verschiebungen von stabilen Rückstrepunkten hinsichtlich einer Referenzposition. Aus diesen Verschiebungsdaten wurden Verschiebungsraten und Kohärenzwerte dieser Raten abgeleitet. In unseren Arbeiten konnten Werkzeuge entwickelt werden, die es erlauben sowohl großräumige Effekte in den Verschiebungssignalen als auch solche Effekte mit einer Ausdehnung von nur wenigen hundert Metern zu identifizieren und zu quantifizieren. Nach jetzigem Kenntnisstand erlauben diese Verfahren überdies den Anschluss von ERS-Daten an die aktuelleren Daten der Sentinel-1 Satellitenmissionen.

Eine erste, detaillierte Betrachtung der Daten ergab, dass sich das Niveau der durchschnittlichen Verschiebungsraten μ aber auch die Standardabweichung der Verschiebungsraten σ um ihren Mittelwert von einem lokalen Umlaufbahnstreifen ("Track") zum anderen unterscheiden (Abb. 31). Für diese beobachteten Differenzen lassen sich bei einer Untersuchung

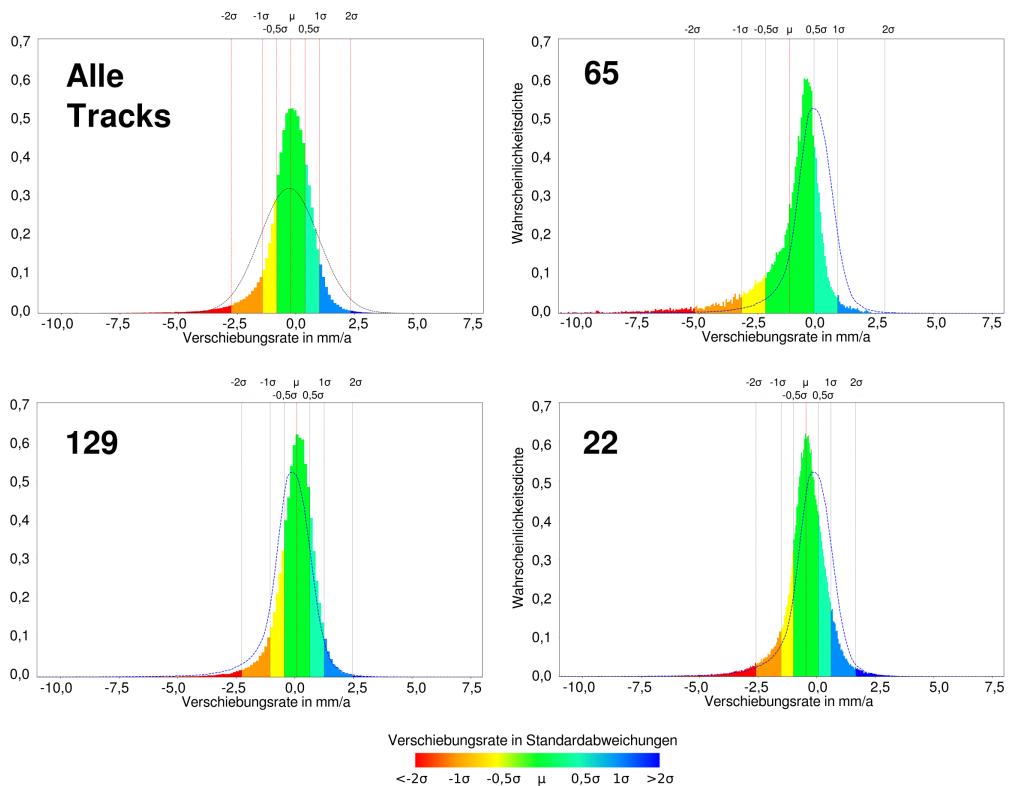


Abbildung 31: Vergleich der Verteilungen der Verschiebungsraten in den einzelnen Tracks. In den Abbildungen für die Tracks 65, 129 und 22 markiert die gestrichelte Linie die Verteilung über alle drei Tracks ("Alle Tracks"). In der Teilabbildung "Alle Tracks" zeigt die gestrichelte Linie den Verlauf einer Standard-Normalverteilung mit den μ - und σ -Werten zu "Alle Tracks".

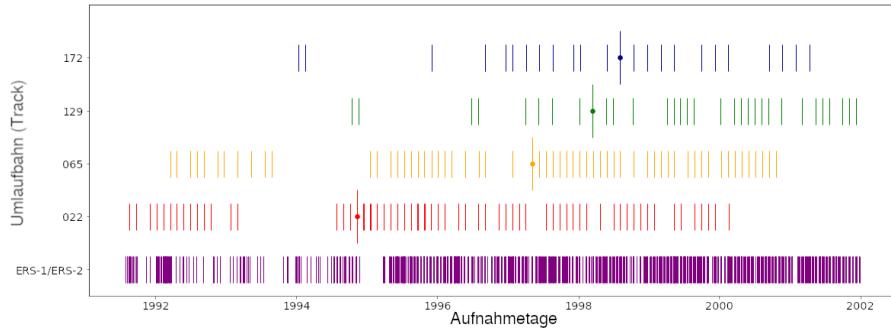


Abbildung 32: Tage mit ERS-1/-2-Aufnahmen sowie Tage mit Zeitreihenwerten in den einzelnen Tracks. Die für die Prozessierung gewählten Masteraufnahmen konnten inzwischen recherchiert werden und sind in der Grafik mit einem Punkt markiert.

derjenigen Gebiete, in denen sich die Tracks überschneiden, keine generellen Strukturen erkennen. Dies macht geologische Prozesse und die Unterschiede der je Track verschiedenen Aufnahmegeometrien als Ursache der Bewegungsunterschiede unwahrscheinlich. Als Ursache verbleiben daher verschiedene Parameter der Zeitreihen-Auswertung je Track oder andere unbekannte Störeinflüsse.

Vor diesem Hintergrund musste für die Darstellung der Daten eine Form gefunden werden, die es erlaubt, Verschiebungen unabhängig vom Niveau der Werte innerhalb eines Tracks einzuordnen und so vergleichbar zu machen. Erreicht werden konnte dies, indem Verschiebungsraten nicht mehr anhand ihrer absoluten Größe beurteilt wurden. Stattdessen wurde ihr Abstand um den Mittelwert einer gemeinsamen Verteilung herum betrachtet. Der Übersicht halber wurden diese Abstandswerte der Verschiebungsraten v in sieben Klassen unterteilt:

$$[-2\sigma \leq v, -2\sigma < v \leq -1\sigma, -1\sigma < v \leq -0.5\sigma, -0.5\sigma < v \leq 0.5\sigma, 0.5\sigma < v \leq 1\sigma, 1\sigma < v \leq 2\sigma, v \leq 2\sigma].$$

Da Bodenbewegungen für Schleswig-Holstein und Hamburg ein Phänomen sind, das sich in der Regel im Bereich weniger Millimeter bewegt, wurden bereits Werte, die um mehr als 0.5σ vom Mittelwert einer Verteilung abweichen, als relevant angesehen und farblich abgegrenzt wie in Abbildung 31 deutlich wird.

Wie im vergangenen Jahr aufgezeigt, weisen alle Tracks zu Beginn der Aufzeichnungen eine größere Aufnahmelücke auf (Abb. 32). Dies ist insofern problematisch, als dass sich Wertebereich und Variabilität der Daten, die vor der Aufnahmelücke gesammelt wurden, oftmals sehr von denen der später gesammelten Daten unterscheiden (beispielhaft Abb. 33). Hierfür war ein Verfahren zu entwickeln, mit dessen Hilfe die Auswirkung solcher Unterschiede auf eine Zeitreihe bewertet werden konnte, um gegebenenfalls eine Korrektur der mittleren Verschiebungsraten durchzuführen.

Als Maß für die Unsicherheit der Werte einer Zeitreihe wurde der "Root Mean Square Error (RMSE)" gewählt, mit dem sich ein Maß für die durchschnittlichen Abweichungen von einem Trend ermitteln lässt. Diese Abweichung wurde für die gesamte Zeitreihe sowie für den nach der Aufnahmelücke liegenden Teil einer Zeitreihe allein bestimmt. Die Differenz der beiden Abweichungswerte wurde mit dem gemittelten Wert des gesamten Track vergli-

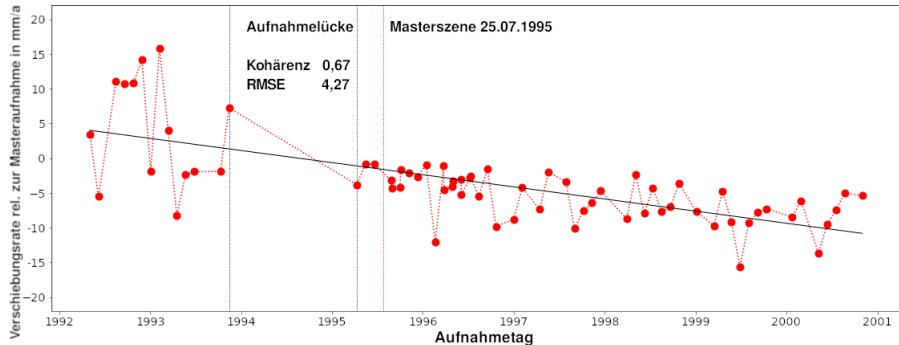


Abbildung 33: Zeitreihe, bei der die Daten vor und nach der Aufnahmelücke eine deutlich andere Abweichung von Gesamtrend aufweisen.

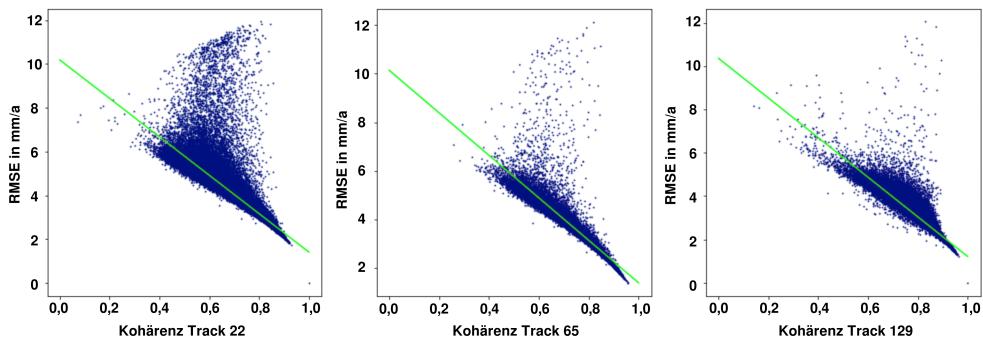


Abbildung 34: Korrelation zwischen Kohärenz einer Zeitreihe und deren RMSE-Wert pro Track. Die grüne Linie zeigt die zugehörige Regressionsgerade.

chen. Lag die Differenz der Abweichung innerhalb eines Korridors von $\pm 1\sigma$ um den für den gesamten Track zu erwartenden Mittelwert, wurden die Zeitreihe und die aus ihr berechnete mittlere Verschiebungsrates unverändert akzeptiert. Überschritt die absolute Differenz der Abweichungen die Standardabweichung, wurde eine neue mittlere Verschiebungsrates allein auf Basis derjenigen Werte einer Zeitreihe berechnet, die nach der Aufnahmelücke lagen. Die mittlere Verschiebungsrates wurde dann als Steigung des linearen Trends der Werte nach der Aufnahmelücke, bezogen auf 365 Tage, neu berechnet. Der Vorteil dieser Methode liegt nicht zuletzt darin, dass für die Analyse auch solche Rückstreupunkte erhalten bleiben, die ansonsten aufgrund des statistisch unsicheren Verlaufs ihrer Zeitreihe herausgefiltert worden wären.

Hinterfragt haben wir den Zusammenhang zwischen der Stabilität der Rückstreuereigenschaften eines Streupunktes (Kohärenz) und der Qualität (RMSE-Wert) der damit aufgenommenen Zeitreihe. Dass die beiden Größen keinesfalls miteinander korrelieren müssen, wurde bereits im Rahmen des Terra firma-Projekts festgestellt [Bateson et al. (2010)]. Auch die uns vorliegenden Daten beinhalteten zahlreiche Streupunkte, deren Zeitreihen trotz hoher Kohärenz einen großen RMSE-Wert aufwiesen und instabil waren (Abb. 34).

Für die insbesondere in Track 22 auffällig geringe Korrelation zwischen Kohärenz der Zeitreihe und deren RMSE können Mess- und Prozessierungsfehler ebenso ursächlich sein wie natürliche und anthropogene Veränderungen am Boden, zum Beispiel durch Kiesabbau. Da die vom DLR durchgeführte Berechnung der mittleren Verschiebungsraten an den

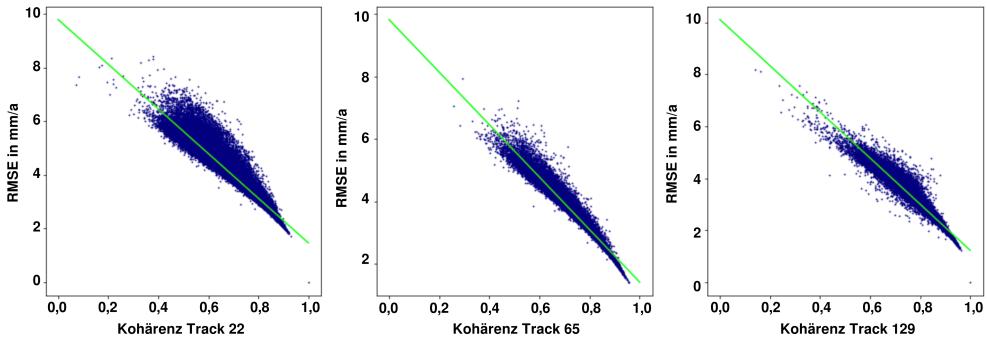


Abbildung 35: Korrelation zwischen Kohärenz einer Zeitreihe und deren RMSE-Wert pro Track nach erfolgter Bereinigung. Die grüne Linie zeigt die zugehörige Regressionsgerade.

Streupunkten auf die Feststellung linearer Trends ausgerichtet war und dieser Fokus auch für die Auswertung beibehalten wurde, mussten Streupunkte nur geringer Korrelation zwischen RMSE und Kohärenz herausgefiltert werden. Dazu wurde ein Filter entwickelt, mit dem diejenigen Streupunkte aus den Daten entfernt wurden, bei denen der RMSE oberhalb einer Schwelle von einer Standardabweichung über dem linearen Trend der Korrelation zwischen RMSE und Kohärenz lag (Abb. 35).

Mit Hilfe der entwickelten Verfahren ist es uns nun möglich, unterschiedliche Bodenbewegungsmuster auf verschiedenen Größenskalen zu identifizieren. In der damit erstmals erfolgten bereinigten Gesamtdarstellung (Abb. 36) der Verschiebungsraten über das Unter-

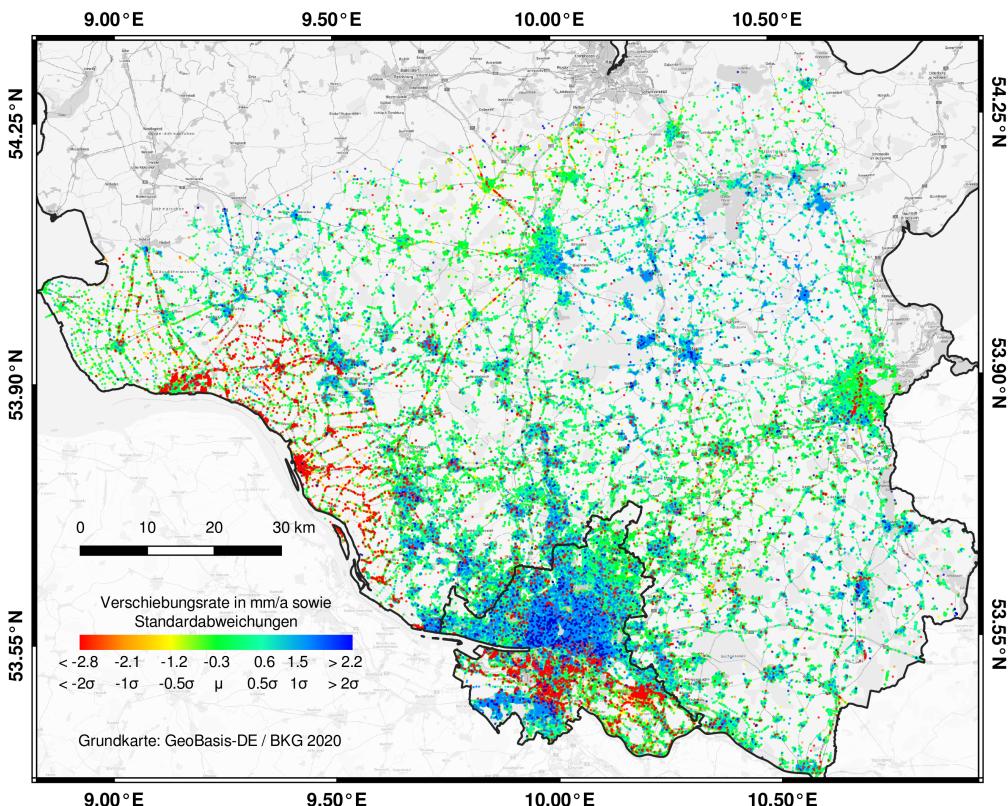


Abbildung 36: Dauerhafte Streupunkte aus den Track 22, 65 und 129 auf dem Gebiet von Schleswig-Holstein und Hamburg, dargestellt mit einer gemeinsamen Farbskala.

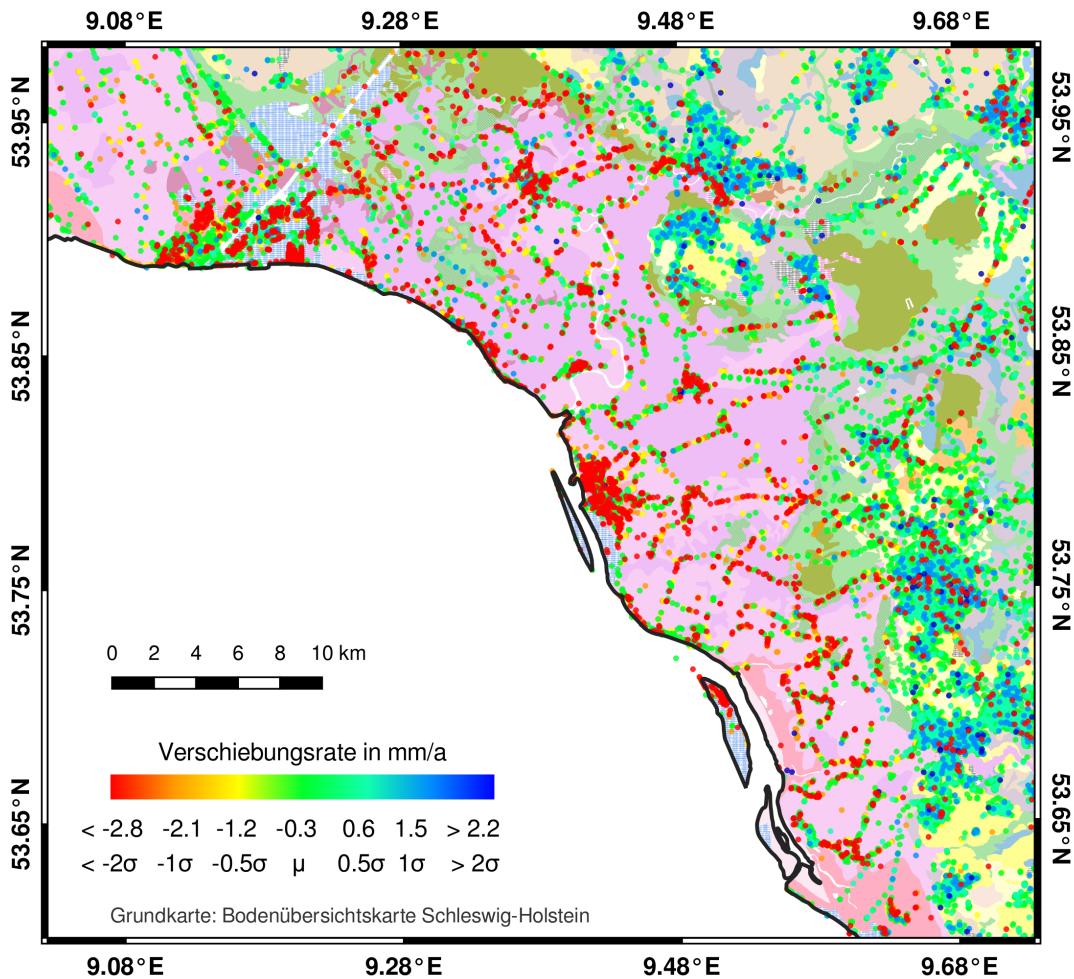


Abbildung 37: Verschiebungsraten entlang der Elbmarschen vor dem Hintergrund der Bodenkarte Schleswig-Holstein.

suchungsgebiet ist die flächenmäßig auffälligste Erscheinung das offensichtliche Absinken der Marschen entlang der Elbe (Abb. 37). Dieses Bewegungsmuster zieht sich über den Hamburger Hafen bis nach Vierlande durch, wo zudem ein Bereich in Reitbrook mit höherer Streupunktdichte und mit Subsidenztrend zu erkennen ist (Abb. 36). Ebenfalls gut erkennbar ist die zum größten Teil durch Gipstreiben hervorgerufene Hebung am "Kalkberg" in Bad Segeberg (Abb. 38).

Weitere lokale Untersuchungen wurden an Einzelerscheinungen kleineren Ausmaßes vorgenommen. Beispielhaft angeführt werden können hier die Senkungsscheinungen rund um das inzwischen stillgelegte Kernkraftwerk Brunsbüttel und nahe dem Kernkraftwerk Brokdorf sowie die kontinuierlichen Senkungsbewegungen entlang des Containerterminals "Toller Ort" im Hamburger Hafen (Abb. 39). Auffällig ist auch eine Linie verstärkter Subsidenz entlang des nördlichen Randes der Lübecker Altstadt (Abb. 40). Um die Aussagekraft der gefundenen Ergebnisse zu belegen, sind weitere Untersuchungen auf Basis der Sentinel-1 InSAR Zeitreihen erforderlich.

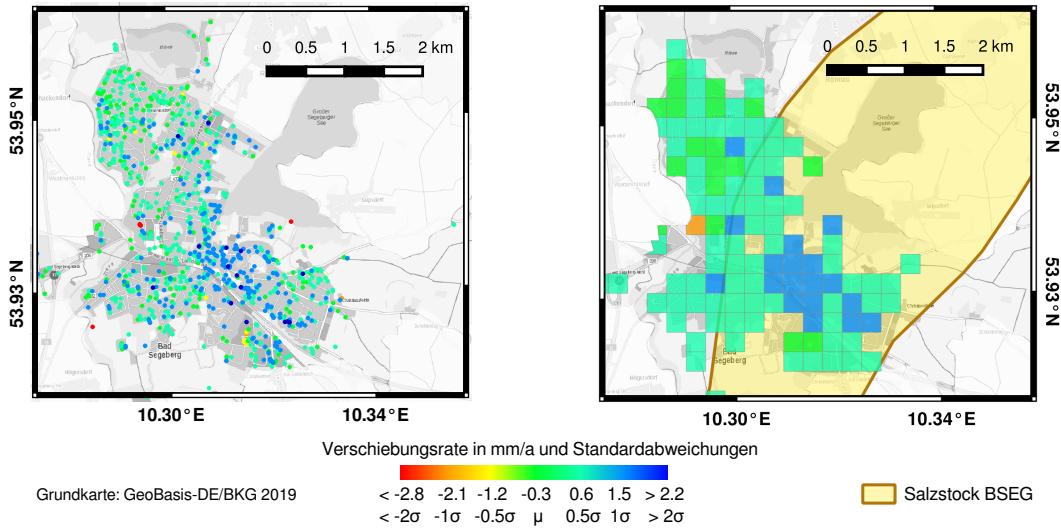


Abbildung 38: Beobachtungen des Gipstreibens am Kalkberg in Bad Segeberg. a) Dauerhafte Streupunkte in der Stadt Bad Segeberg. b) Räumliche Mittelung der Verschiebungsraten in a) auf einem Raster von 100 m x 100 m bei einer Mindestanzahl von drei Streupunkten pro Rasterzelle.

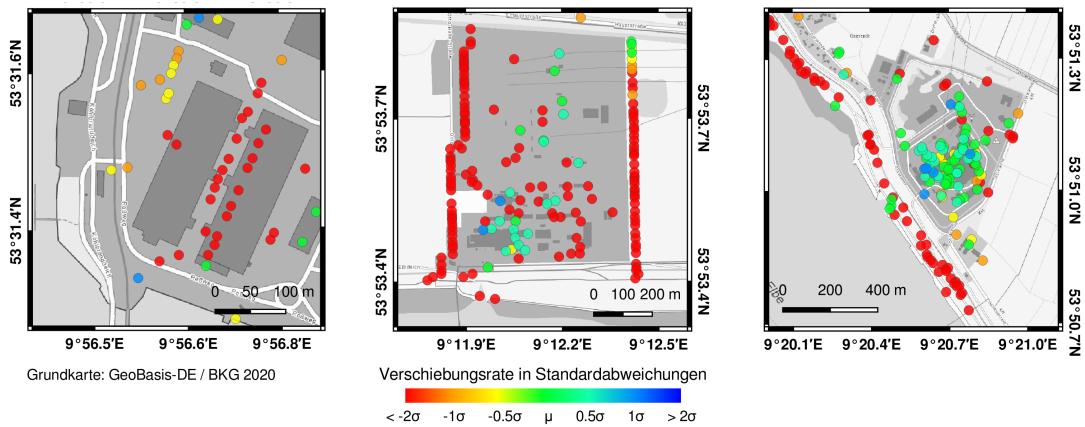


Abbildung 39: Subsidenzerscheinungen am HHLA-Containerterminal Tollerort (links), sowie im Bereich der Kernkraftwerke Brunsbüttel (Mitte) und Brockdorf (rechts).

Nach Erhalt der Teillieferung 2 der Daten des Bodenbewegungsdienstes (siehe anschließendes Kapitel) haben wir im lokalen Rahmen einen ersten direkten Vergleich zwischen den ERS- und den Sentinel-Daten unternehmen können. Dabei zeigte das von uns im Rahmen der Auswertung der ERS-Daten entwickelte Verfahren zur Darstellung von Bodenbewegungen das Potenzial, die beiden Datensätze vergleichbar zu machen. So lässt sich das in den ERS-Daten vorhandene Subsidenzmuster entlang der Trave, auch im Bereich der Lübecker Altstadt, ohne eine Vorprozessierung auch in den Sentinel-Daten aufzeigen (Abb. 40).

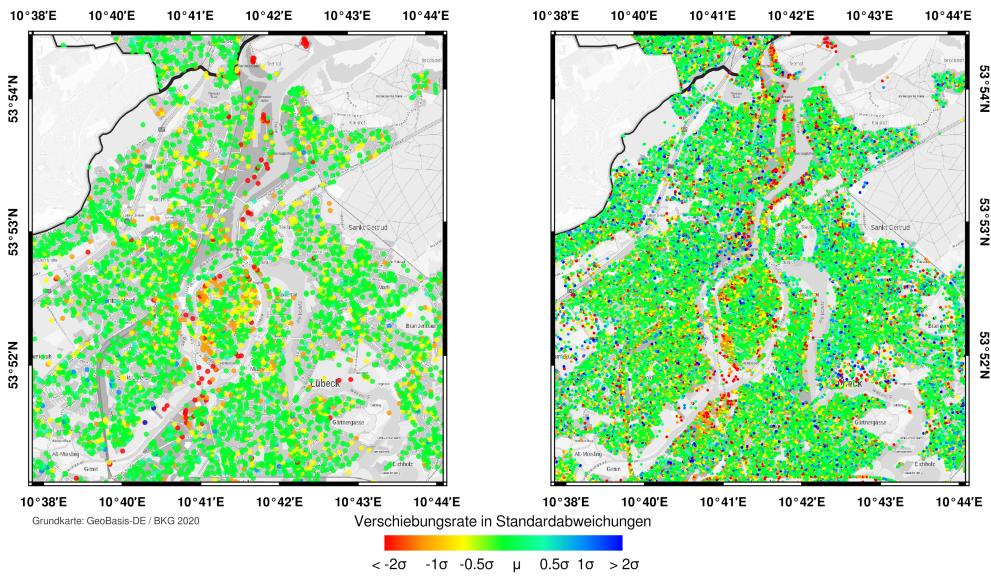


Abbildung 40: Verschiebungsraten in Standardabweichungen auf dem Gebiet der Stadt Lübeck und angrenzender Gemeinden auf Basis von ERS-Daten (links) und Sentinel-1-Daten (rechts)

Ob dieses Ergebnis für die uns vorliegenden Daten allgemeingültig ist, ist Gegenstand weiterer Untersuchungen. Bei diesen ist zur berücksichtigen, dass sich die Datenstruktur der vom DLR berechneten ERS Zeitreihen von der Datenstruktur der Sentinel-1 Zeitreihen unterscheidet. Im Rahmen der Prozessierung der ERS-Daten wurde davon ausgegangen, dass sich in den Zeitreihen der Streupunkte ausschließlich ein linearer Trend widerspiegelt. Dessen Ausprägung wurde als mittlere Bewegungsrate angegeben. Bei der Auswertung der Zeitreihen der Sentinel-Daten wurde vom Vorhandensein eines linearen Trends, ergänzt um eine periodische Komponente mit der Frequenz 1/Jahr ausgegangen. Für einen belastbaren Vergleich der beiden Datensätze wird dies zu berücksichtigen sein.

9 Auswertung der 2. Teillieferung des Bodenbewegungsdienstes

Für das Berichtsjahr lagen erstmals Daten aus der Teillieferung 2 des Bodenbewegungsdienstes zur Auswertung im Rahmen der Kooperation vor. Mit dem neuen Datenpaket führte das DLR nicht nur erstmalig einen Vorschlag für ein durch die Anwender auszuführendes, ergänzendes Prozessing ein (siehe Kapitel 9.1). Erstmals wurden für die Zeitreihen der errechneten Streupunkte auch periodische Anteile mit einer Frequenz von 1/Jahr angegeben. Die weiterhin angegebenen linearen, jährlich-durchschnittlichen Verschiebungsrauten sind um diesen periodischen Anteil bereinigt. Eine intensive Auseinandersetzung damit streben wir im Zusammenhang mit der für das Frühjahr 2020 avisierten dritten Teillieferung an, die Daten aus sowohl aufsteigenden (ascending) wie fallenden (descending) Satellitenüberflügen beinhalten soll. Für diese Aspekte sollen abschließende Auswertungsverfahren entwickelt werden.

9.1 Lokale Kalibrierung der Messungen

In dem 2018 durchgeführten ersten Validierungs-Projekt der SGD von SH und HH zur Qualitätssicherung der BBD-Daten konnte herausgearbeitet werden, dass an Salzstrukturen oder Störungen auftretende Bodenbewegungen sich in den relativ kurzen, 2,5-jährigen Zeitreihen an einigen Strukturen bereits zumindest als Trend abzeichnen. Für den zentralen Bereich des Salzstocks Bad Segeberg belegen die BBD-Daten sogar deutliche Hebungen, deren Ursache hauptsächlich im sogenannten Gipstreiben (Umwandlung von Anhydrit in Gips) gesehen wird. In dem zweiten Validierungs-Projekt sollten diese Arbeiten fortgeführt und ausgebaut werden. Es war geplant, die gleiche Methodik anzuwenden: statistische Auswertung und Interpolation der BBD-Daten sowie Verschneidung mit vorliegenden geologischen Fachinformationen. Hierbei sollte eine Optimierung der Interpolations-Verfahren angestrebt werden. Für die Untersuchungsgebiete des ersten Projekts sollte ein Vergleich zwischen den descending (absteigend) und ascending (aufsteigend) gewonnenen Daten ausgeführt werden. Danach sollte das Auswerteverfahren auf weitere durch Salzstrukturen geprägte Landesteile ausgerollt werden, um der Fragestellung nachzugehen, an welchen Salzstrukturen und Störungen in SH und HH Bodenbewegungen auftreten, die durch Halokinese, begleitende Tektonik und ggf. Verkarstung induziert werden.

Im Rahmen des BGR Copernicus Workshops “BBD – Boden Bewegungsdienst Deutschland in der Anwendung“ im Dezember 2018 entwickelte sich eine kontroverse Diskussion über die bisherigen Auswertungen der BBD-Daten durch die Geologischen Dienste. Seitens der DLR wurde angemerkt, dass die Analysen der AK6 Vertreter zeigen, dass diese nicht von Experten ausgeführt wurden. Offensichtlich bestehen erhebliche Bedenken über die angewandten Auswerteverfahren. Im Prozessierungs-Bericht der DLR zur zweiten Teillieferung von deutschlandweiten BBD-Daten wurden **Hinweise zur Nutzung der PSI-WAP Produkte** gegeben.

Wir haben die Bedenken der DLR zum Anlass genommen unsere bisherigen Auswerteverfahren zu hinterfragen. Statt der im Projektvorschlag skizzierten Vorgehensweise haben wir für SH den Fokus zunächst auf die Umsetzung der Handlungsempfehlungen der DLR-Experten und damit die Methodik der Auswertung gelegt, um für zukünftige Validierungen nachfolgender Teillieferungen einen gesicherten Workflow zur Verfügung zu haben. Ergänzt wird dieser Arbeitsschwerpunkt durch einzelne lokale Daten-Analysen in SH und HH. Die ursprünglich angestrebten ersten landesweiten Analysen der BBD-Daten bezüglich tektonischer Prozesse wird auf eine nachfolgende Teillieferung von BBD-Daten verschoben.

9.1.1 DLR-Hinweise

Die DLR Hinweise umschreiben die technischen Schritte, die für die Ausnutzung der inhärenten Genauigkeit der gemessenen Bewegungszeitreihen erforderlich sind; sie umfassen folgende Einzelschritte:

- Eingrenzung auf ein reduziertes Untersuchungsgebiet (AOI - Area Of Interest)
- Auswahl eines lokalen Referenzpunkts
- Kalibrierung der Messungen auf lokalen Referenzpunkt im AOI
- Berechnung der Varianz im AOI

Durch die BGR bereitgestellt wurden ascending Daten der Stapel 015_01, 044_01, 117_01 sowie 117_02, jeweils begrenzt auf die Landesflächen von SH und HH. Die Daten der Stapel 015_01 und 117_02 erfassen nur kleine Randbereiche von SH und wurden nicht ausgewertet. Für die Stapel 117_01 und 044_01 wurden die Operationen unabhängig voneinander durchgeführt, indem die Datentabelle der Bewegungsparameter je Stapel als jeweils eigenes Shape aufgeteilt wurde.

9.1.2 Eingrenzung des Untersuchungsgebietes

Es wurden vier verschiedene AOI ausgewählt. Neben den bereits im ersten Validierungsprojekt untersuchten Fokusgebieten Bad Segeberg in SH und Groß Flottbek in HH – in denen Salztektonik und Subrosionsprozesse (u.a. Erdfälle) auftreten – sind dies mit Leck und Eutin (beide in SH) zwei Gebiete, die jenseits von Salzstöcken liegen, so dass für diese keine wesentlichen, durch tektonische Prozesse induzierten Bodenbewegungen zu erwarten sind. In jedem Gebiet wurden Datenpunkte aus vier Kacheln des DTK5-Rasters betrachtet, also AOI mit einer Ausdehnung von 4 km x 4 km. Die AOI Flächen liegen somit alle unterhalb des empfohlenen Areals von höchstens 20 km x 20 km.

Die Datentabellen (shape je Stapel) wurden mit dem DTK Rahmenraster verschnitten, so dass in den dabei entstehenden neuen Shapes für jeden Stapel außer den Bewegungsparametern für jeden Scatterer auch die DTK Kachelnummer seiner Position verzeichnet war. Anschließend wurden die Daten nach den zu einem jeweiligen Untersuchungsgebiet gehörenden Kachelnummern gefiltert. Den nun vorhandenen, im Verhältnis zur Ursprungsdatenbank sehr kleinen Datentabellen wurden mit Hilfe eines Joins über das eindeutige Identifikationsattribut PS_ID die Zeitreihen der enthaltenen Scatterer hinzugefügt.

9.1.3 Wahl eines Referenzpunktes

Wir haben die Nutzung von Referenzpunkten derart verstanden, dass trotz der von der DLR im Rahmen der Datenprozessierung durchgeföhrten Korrekturen ein residualer Fehler in den Daten verbleibt. Für jeden Stapel wurde bereits von der DLR ein Referenzpunkt ermittelt, der möglichst optimale Bewegungsparameter aufweist und quasi frei von Bewegungen ist. Die in diesem Referenzpunkt beinhalteten Datenvariationen stellen dann den nicht korrigierten Restfehler dar. Dieser wird von allen anderen Datenpunkten eines Stapsels subtrahiert, um die Daten final zu kalibrieren. Da diese Kalibrierung von der DLR jedoch nur regional für ganze Stapel durchgeföhr wurde, können bei lokalen Gebieten (maximal 20 km x 20 km) noch weitere Residuen vorhanden sein. Diese sollen mit dem empfohlenen Verfahren über die lokalen Referenzpunkte reduziert werden.

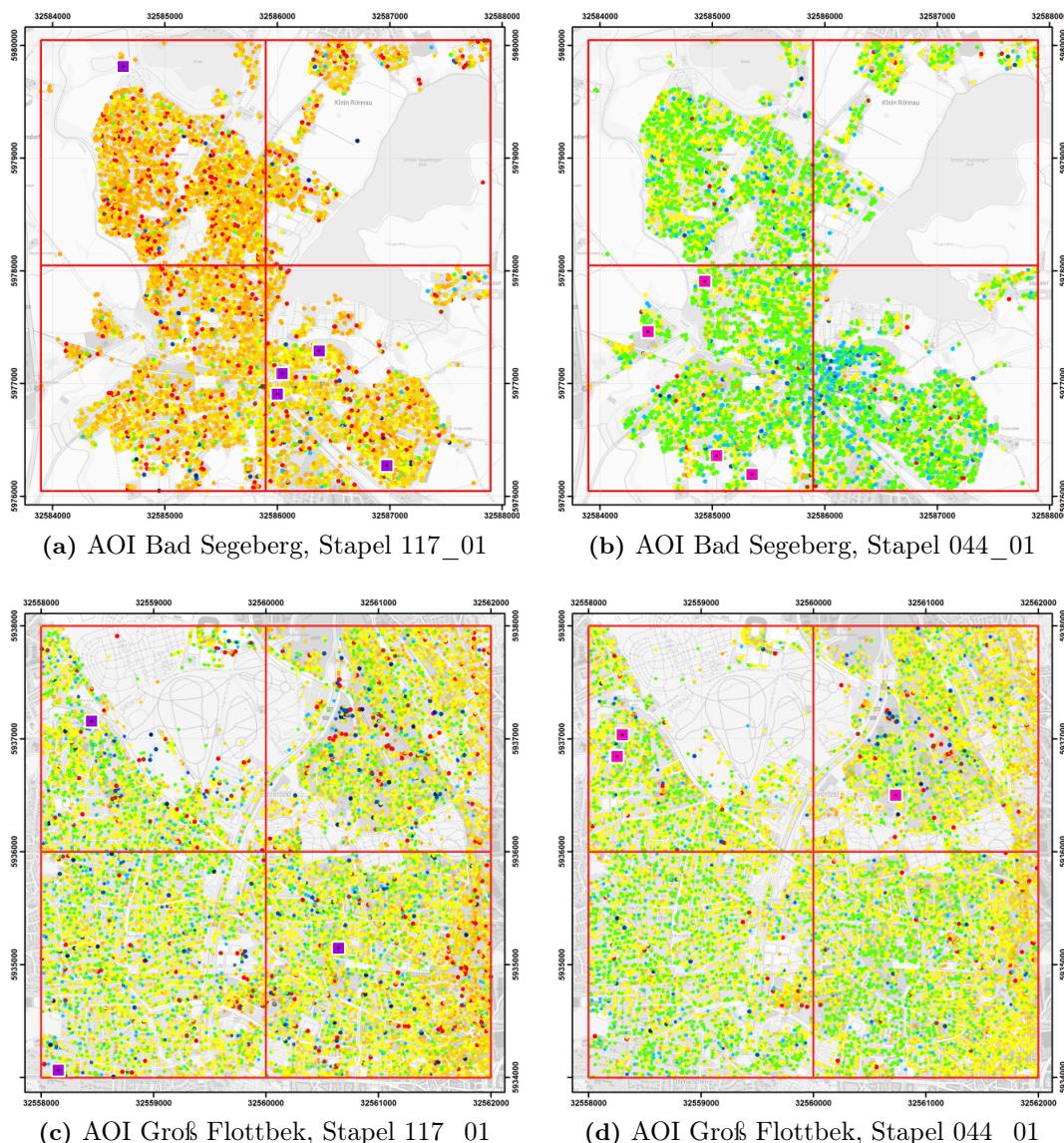


Abbildung 41: Verschiebungsraten, unkalibriert, in den AOI Bad Segeberg und HH Groß Flottbek. Legende wie in Abb. 42 dargestellt.

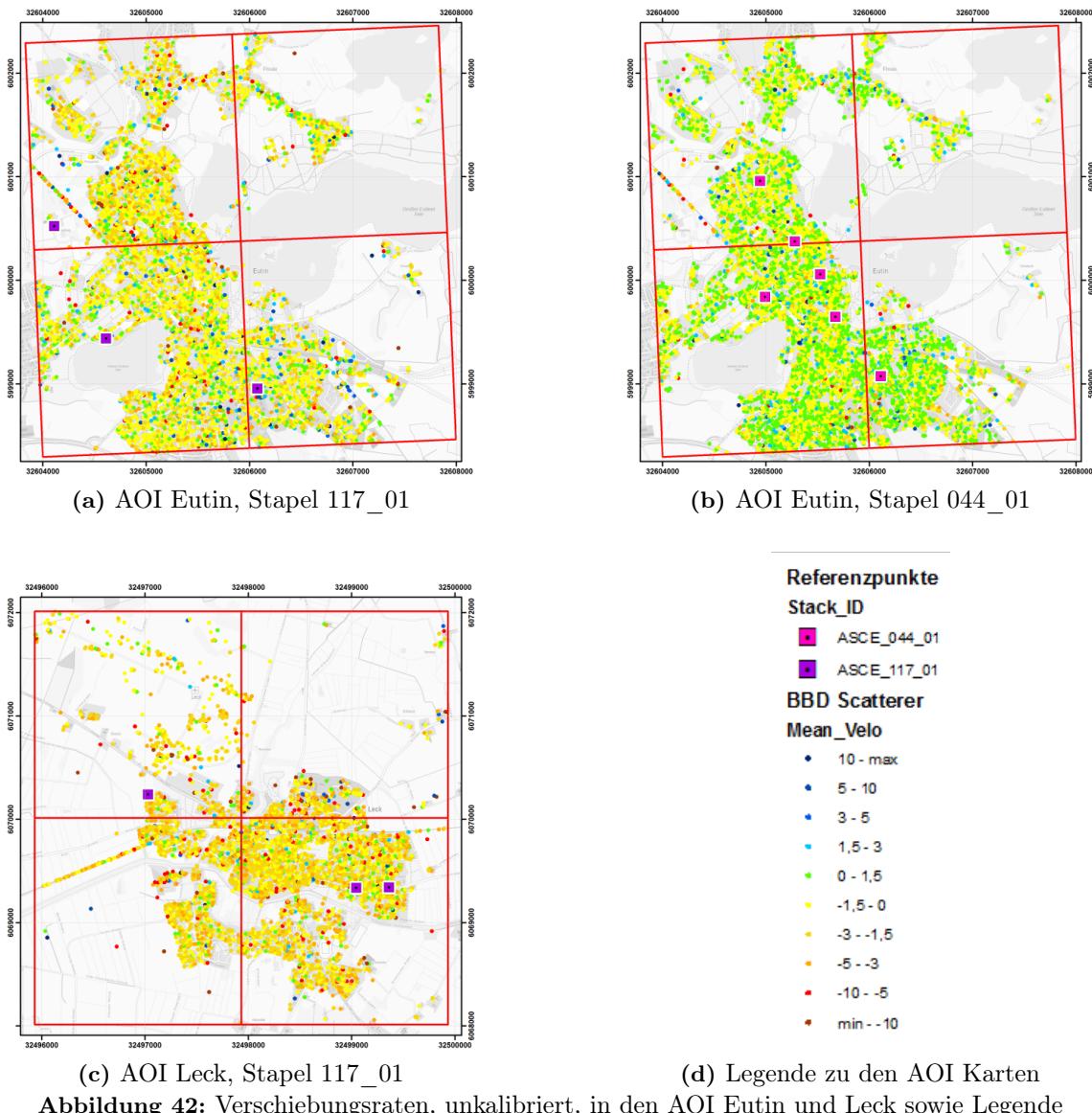


Abbildung 42: Verschiebungsraten, unkalibriert, in den AOI Eutin und Leck sowie Legende

Zunächst wird die Spalte RMSE hinzugefügt, die den Root Mean Square Error der Zeitreihe im Verhältnis zu dem in ihr vorhandenen Trend angibt. Dieser Schritt erscheint uns notwendig zu sein, da die alleinige Beachtung einer möglichst geringen mittleren Verschiebungsrate dazu führen kann, dass Scatterer als Referenzpunkte favorisiert werden, die einen sehr hohen RMSE mit Verschiebungen von bis zum 20 mm von einer Zeitreihenposition zur nächsten aufweisen. In einem zweiten Schritt werden die Daten anhand der von der DLR empfohlenen Filterparameter (Mean_Velo, Temp_Coh, SCR, Var_Mean_V, Var_Cos, Var_Sin) sowie des RMSE gefiltert. Die Werte für die Filter wurden anhand der statistischen Kennzahlen der Bewegungsparameter für die Daten im AOI bestmöglich verifiziert. Das Ergebnis dieses Filterprozesses stellt die vorläufige Menge möglicher Referenzpunkte im Untersuchungsgebiet dar.

Die Karten der vier AOI (Abb. 41 und 42) zeigen die möglichen Referenzpunkte sowie die nicht kalibrierten Scatterer der Gebiete mit identischer Symbologie. In den Karten —

insbesondere im AOI Bad Segeberg — fällt auf, dass der Parameter Mean_Velo zwischen den beiden Stapeln erhebliche Unterschiede aufweisen kann. Während sich die Hebung im Bereich des Kalkbergs im Stapel 044_01 (Abb. 41, b) deutlich abzeichnet, ist diese im Stapel 117_01 (Abb. 41, a) nicht klar zu identifizieren. Eine lokale Kalibrierung der Daten ist erforderlich. Das gelieferte shape der Verschiebungsparameter umfasst die Datenpunkte aus allen Stapeln, deren gemeinsame Darstellung in einer Abbildung wäre jedoch fatal und könnte zu falschen Schlussfolgerungen verleiten.

Den Werteverlust zwischen den Daten der beiden Stapel visualisieren die Histogramme in Abbildung 43, die Mittelwerte sind mit etwa 0,4 mm/a leicht gegeneinander verschoben:

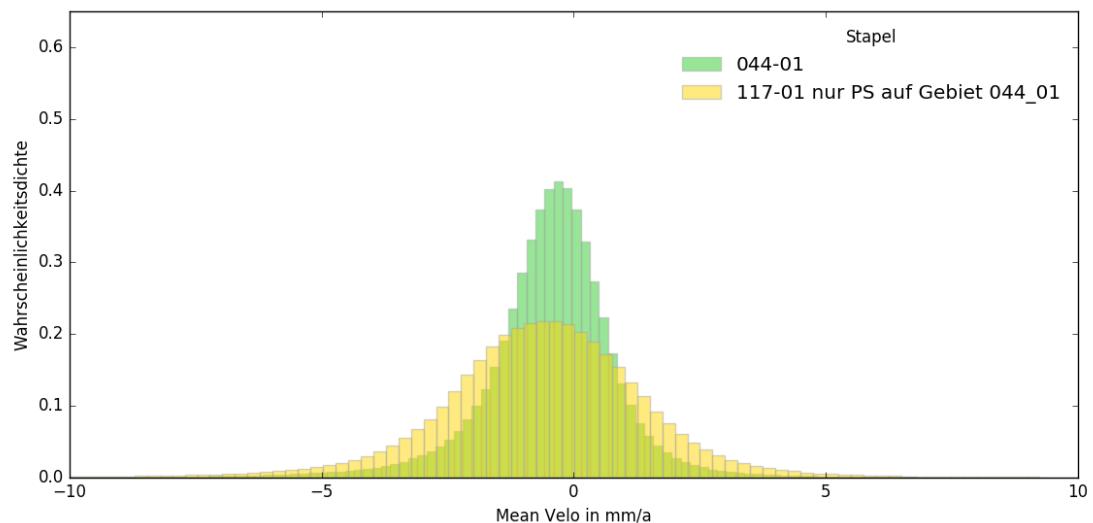


Abbildung 43: Histogramme der Mean_Velo Werte der beiden Stapel 044_01 und 117_01, für 117_01 eingeschränkt auf die Ausdehnung von 044_01

Die Zeitreihen der ermittelten Referenzpunkte wurden für eine visuelle Prüfung dargestellt (beispielhaft Abb. 44).

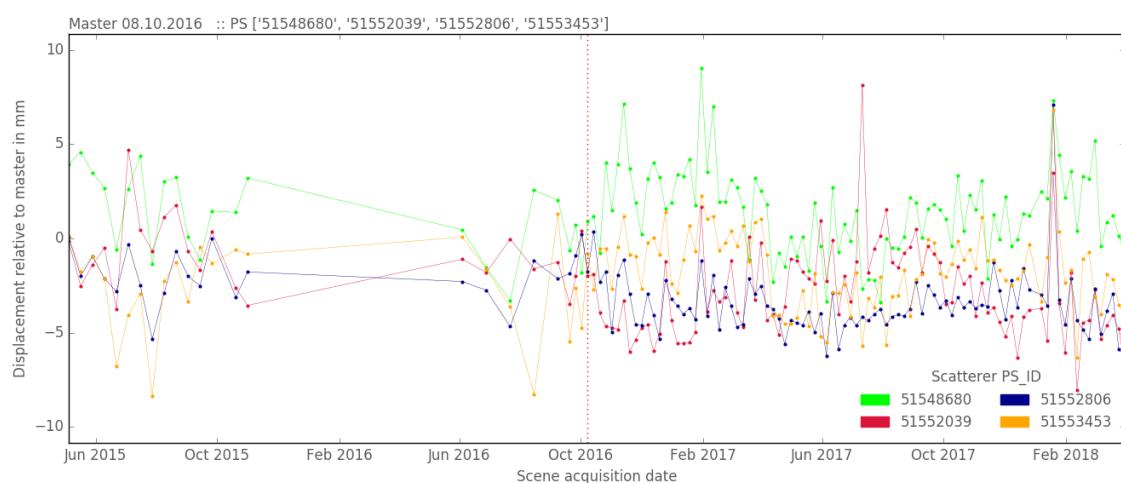


Abbildung 44: AOI Bad Segeberg, Zeitreihen der möglichen lokalen Referenzpunkte im Stapel 117_01

Allen Zeitreihen möglicher Referenzpunkte ist gemein, dass sie einen unerwartet dynamischen Verlauf sowie durchaus einen unerwartet hohen Wertebereich (i.d.R. zwischen -5 mm und +5 mm) mit einzelnen Wertespitzen aufweisen. Die Zeitreihen der möglichen Referenzpunkte eines AOI zeigen untereinander eine hohe Ähnlichkeit.

Die endgültige Festlegung auf einen einzigen lokalen AOI Referenzpunkt erfolgte über einen Vergleich der Deformationsparameter der ermittelten möglichen Referenzpunkte, hauptsächlich über optimale Mean_Velo und RMSE.

Tabelle 6: Referenzpunkte mit Deformationsparametern

AOI	Stapel	PS_ID	MeanVelo	TempCoh	SCR	VarMeanV	VarCos	VarSin	RMSE
BSEG	117_01	51552806	-0,628	0,970	8,163	0,047	0,053	0,037	1,834
BSEG	044_01	22237902	0,017	0,981	22,858	0,009	0,018	0,013	1,053
GFBEK117_01		50031698	-0,051	0,976	14,776	0,033	0,036	0,025	1,389
GFBEK044_01		21824568	-0,073	0,985	26,834	0,007	0,014	0,010	0,937
Eutin	117_01	51629210	0,117	0,977	13,553	0,033	0,036	0,026	1,365
Eutin	044_01	22338920	-0,039	0,980	22,584	0,010	0,019	0,014	1,145
Leck	117_01	50862552	-0,704	0,964	13,971	0,046	0,051	0,036	1,830

Das gelieferte shape der Deformationsparameter beinhaltet auch die von der DLR für die einzelnen Stapel verwendeten Referenzpunkte. Abbildung 45 zeigt exemplarisch die Kurve des Mean_Velo für Stapel 044_01, welche den Stand nach erfolgter Kalibrierung darstellt. Die Kurve weist noch einen Trend sowie eine Zyklizität (Jahresgang) auf, d.h. diese wurden durch die Kalibrierung sinnvoller Weise nicht aus den Daten herausgerechnet.

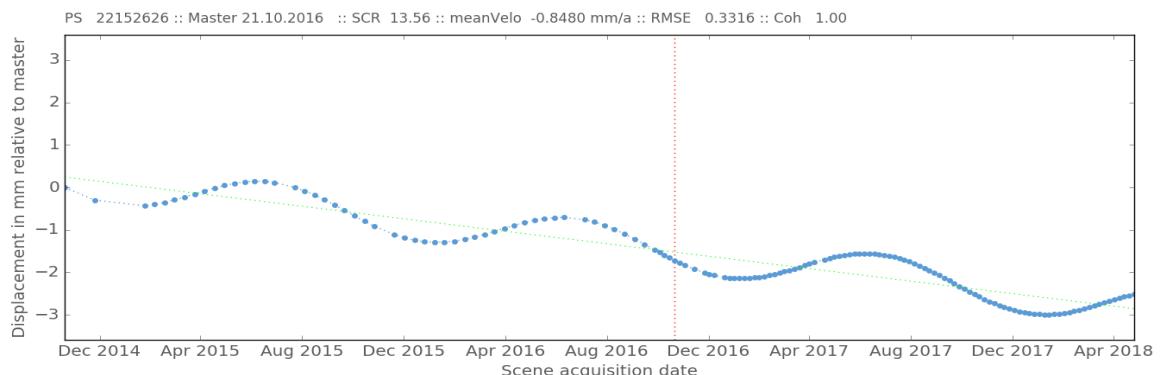


Abbildung 45: Zeitreihe des DLR Referenzpunkts für Stapel 044_01

Die empfohlene Kalibrierung mittels eines lokalen Referenzpunkts umfasst die Subtraktion der Deformationsparameter sowie der Zeitreihenwerte (jeweils Datenpunkt minus Referenzpunkt). Dies stellt eine Normierung aller Messwerte eines AOI auf den Referenzpunkt dar, für den lokalen Referenzpunkt entsteht durch die Kalibrierung dann eine Nulllinie. Hierbei werden Trend und Zyklizität jedoch nicht berücksichtigt („geschützt“), so dass diese im AOI für alle Datenpunkte mit abgezogen werden. Dies wäre nur dann gerechtfertigt, wenn die Zeitreihe des lokalen Referenzpunkts keinen Trend und keine Zyklizität aufweist. Hier liegt nach unserer Ansicht eine Schwäche in dem empfohlenen Verfahren einer lokalen Kalibrierung.

9.1.4 Kalibrierung

Die Unterschiede in den Daten vor und nach erfolgter Kalibrierung fallen in den AOI verschieden aus, wobei sich im jeweiligen Gesamtbild kaum etwas ändert (Abb. 46). In den Karten der AOI werden die Daten über Symbolisierungsintervalle dargestellt und man muss sie schon sehr genau betrachten, um Veränderungen in einzelnen Rückstreuern zu identifizieren.

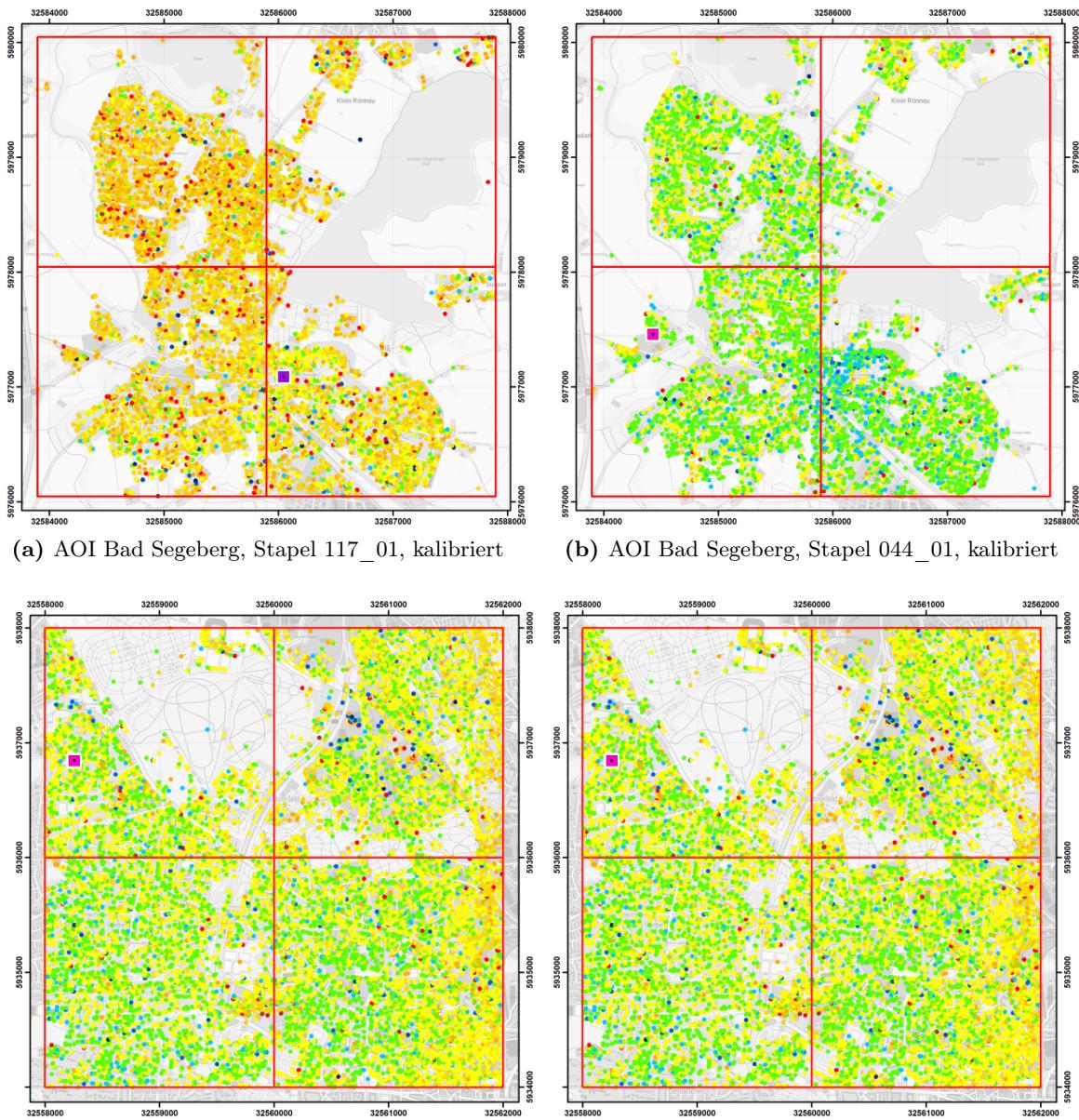


Abbildung 46: Kalibrierungsergebnisse über den AOIs Bad Segeberg und Gross Flottbeck

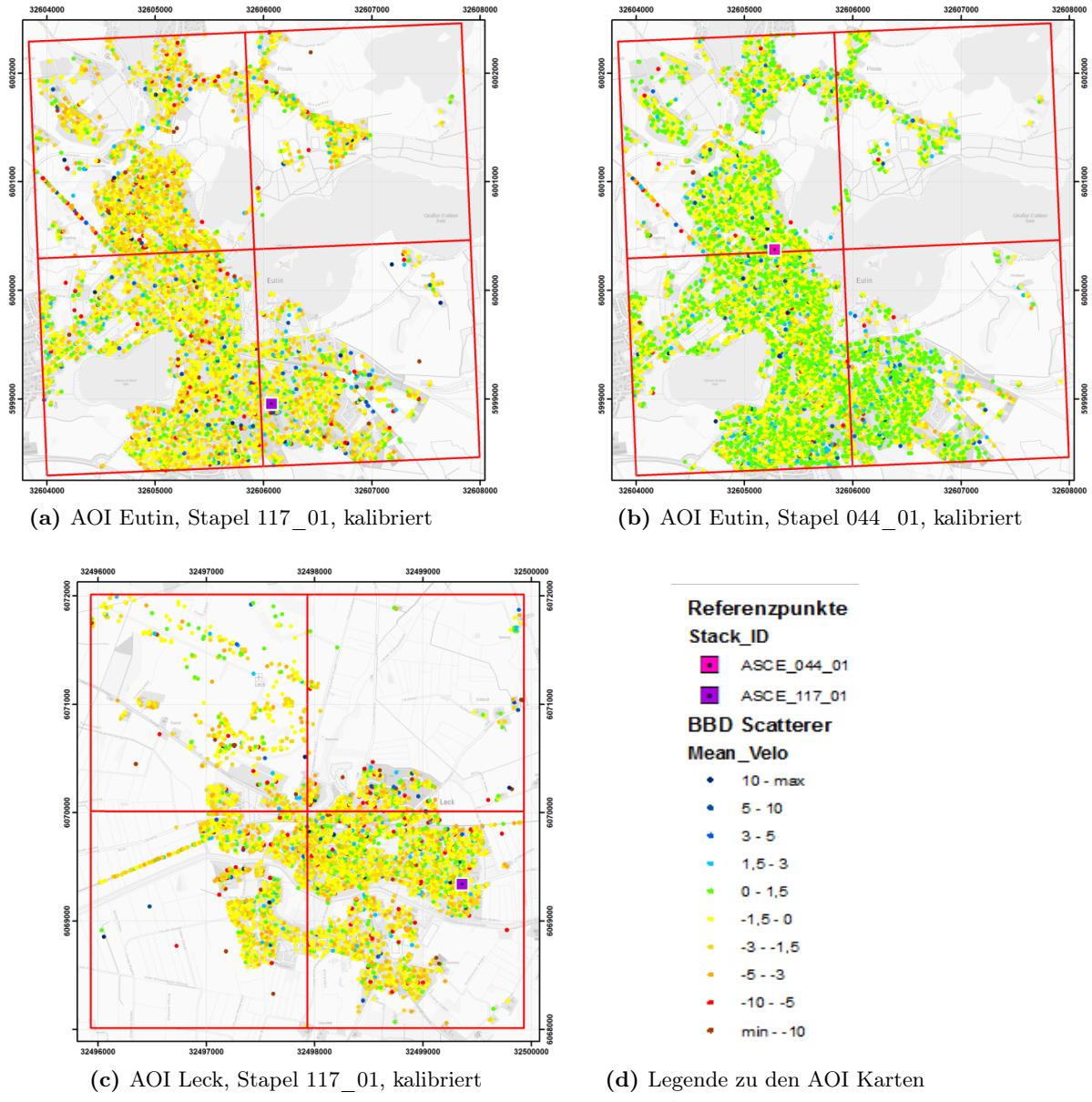


Abbildung 47: Kalibrierungsergebnisse über den AOIs Eutin und Leck.

Eine für das Verständnis der Kalibrierung bessere Visualisierung als über die Karten erfolgt über Histogramme bzw. einzelne Zeitreihen der AOI. In Abbildung 48 werden die mittleren Geschwindigkeiten (Mean_Velo) vor und nach der Kalibrierung mittels lokalem Referenzpunkt in solchen Histogrammen gezeigt. Für Stapel 044_01 sind die Histogramme nahezu deckungsgleich, es sind nur marginale Unterschiede festzustellen. Für Stapel 117_01 gilt dies auch für Gross Flottbek und Eutin, während sie in Bad Segeberg und Leck deutlicher ausfallen. Zeitreihen einzelner Rückstreuer vor und nach der Kalibrierung mittels lokalem Referenzpunkt sind in den Abbildungen 49, 50 und 51 gezeigt. Erwählt wurden hier zunächst alternative Referenzpunkt-Kandidaten, gezeigt in den Abbildungen 46 und 47 (oben). Abbildung 51 zeigt Zeitreihen zweier Rückstreuer mit erheblicher mittlerer Geschwindigkeit (Mean_Velo) im AOI Bad Segeberg vor und nach der Kalibrierung mittels Referenzpunkt.

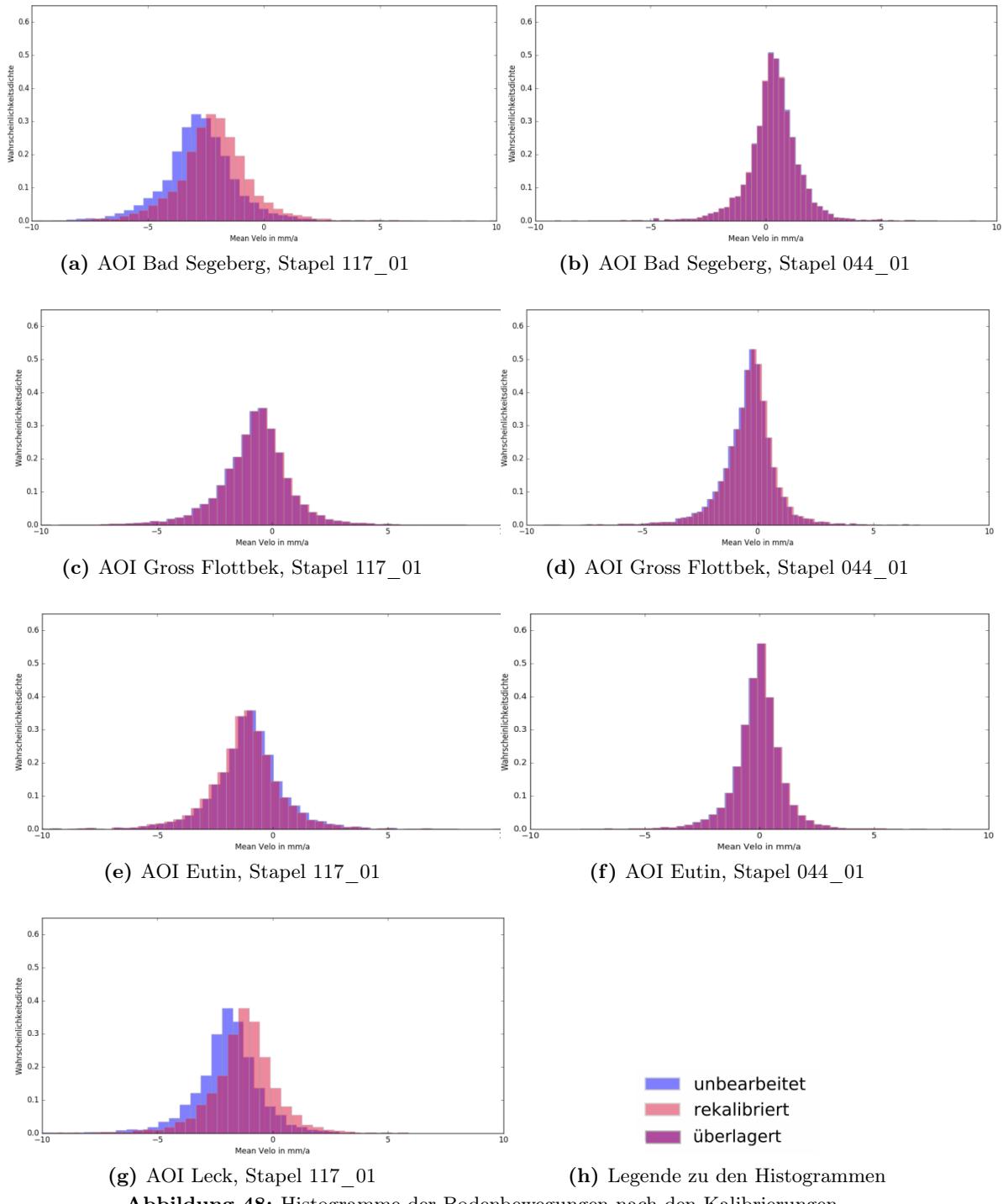


Abbildung 48: Histogramme der Bodenbewegungen nach den Kalibrierungen.

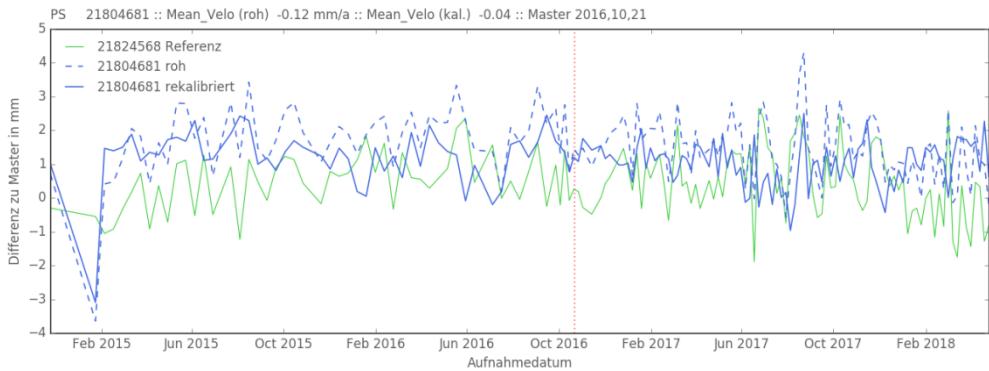


Abbildung 49: Zeitreihe eines Rückstreuers im AOI Gross Flottbek, Stapel 044_01

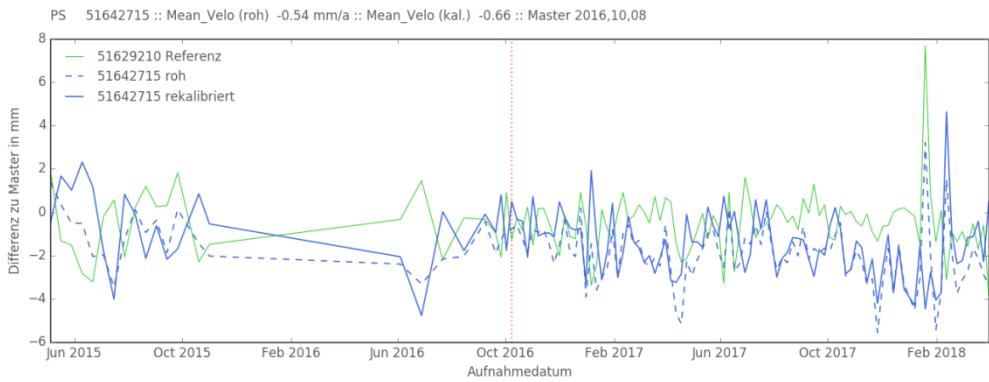


Abbildung 50: Zeitreihe eines Rückstreuers im AOI Eutin, Stapel 117_01

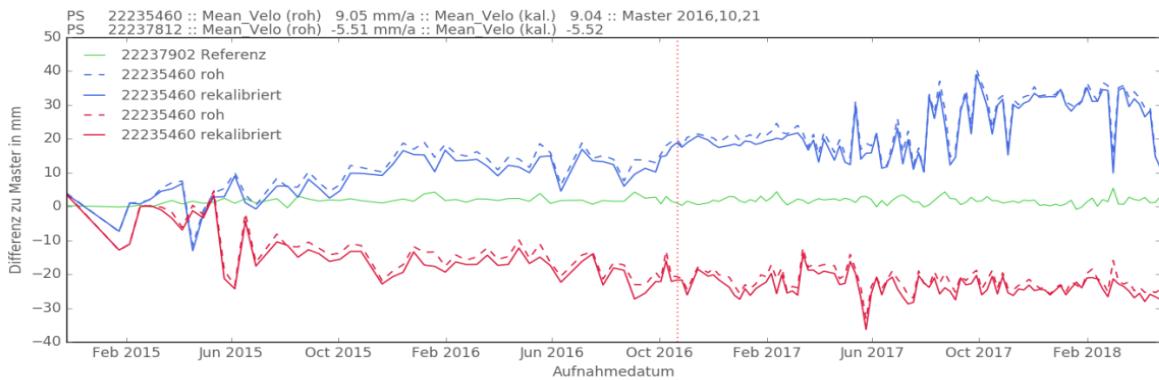


Abbildung 51: Zeitreihen zweier Rückstreuer im AOI Bad Segeberg, Stapel 044_01

9.1.5 Varianzen

Der technische Schritt einer Neuberechnung der Varianzen nach der Kalibrierung trägt nicht zu einer Datenverbesserung bei, sondern liefert lediglich ein neues Qualitätsmerkmal. Aufgrund des hohen Aufwands einer vom Abstand zum lokalen Referenzpunkt abhängigen Berechnung wurde dieser Schritt nicht durchgeführt.

9.1.6 Ergebnis der Kalibrierungen

Die Rekalibrierung der gelieferten Daten in räumlich begrenzten Gebieten mittels lokaler Referenzpunkte stellt einen nicht unerheblichen Aufwand dar – insbesondere dann, wenn dies landesweit für viele lokale AOI auszuführen ist. Es hat sich gezeigt, dass die Unterschiede vor und nach der Kalibrierung oft nicht sehr groß sind und sich der räumliche Charakter der Daten nicht wahrnehmbar ändert. Bei Zeitreihen, die selber kaum Bewegungen aufweisen, wird der Verlauf der Zeitreihe punktuell massiv beeinflusst; im Gesamtbild lokaler Bodenbewegungen kommt diesen Zeitreihen jedoch eine untergeordnete Rolle zu, so dass dieser Effekt zu vernachlässigen ist.

Eine wesentliche Änderung durch die vorgeschlagene Kalibrierung ist andererseits auch nicht zu erwarten. Denn eine Voraussetzung für einen Referenzpunkt ist schließlich, dass er eine geringe Bewegung zeigt, woraus sich eine nur geringe Korrektur ergibt. Dieses Vorgehen kann also nur in Gebieten sinnvoll sein, wo der Mittelwert der Bewegungen bei etwa Null ist. In Abbildung 41a über Bad Segeberg wird jedoch deutlich, dass der Mittelwert über dem AOI deutlich unter Null liegt. Die gewählten Referenzpunkte, die eine vermeintlich niedrige Geschwindigkeit aufweisen, sind daher gerade Punkte, die vom Mittelwert abweichen und bewegte Gebiete anzeigen. In der relativen Betrachtung von Geschwindigkeiten macht das keinen Unterschied, jedoch nähert man sich so nicht einer Vergleichbarkeit der Daten verschiedener Tracks. Möglicherweise ist es ratsam, vor jeder Kalibrierung zunächst den Geschwindigkeitsmittelwert für die Zeitreihen des jeweiligen Track über dem AOI auf Null zu setzen, bevor mit der Suche nach Referenzpunkten begonnen wird.

Für die Vergleichbarkeit der Zeitreihen verschiedener Tracks über einem AOI ist es zudem wichtig, dass die jeweiligen Referenzpunkte der unterschiedlichen Tracks räumlich möglichst nahe beieinander liegen. Bei mehreren Kandidaten sollten nahe Nachbarn gewählt werden. Berücksichtigt werden muss weiterhin, dass die LOS Bewegungen in unterschiedlichen Tracks nicht hundertprozentig vergleichbar sind. Durch die unterschiedlichen Einfallsinkel, z.B. über Bad Segeberg ein flacheres Einfallen bei Track 117_01 und ein steileres Einfallen bei Track 44_01, werden vertikale Bewegungen unterschiedlich abgebildet (siehe auch Kapitel 9.2). Die Anleitungen der DLR zu der Findung von Referenzpunkten sollten daher zur Klarheit durch die in kursiv gesetzten Punkte ergänzt werden:

- Eingrenzung auf ein reduziertes Untersuchungsgebiet
- *Mittelwert der mittleren Geschwindigkeiten über AOI auf Null setzen*
- Auswahl mehrerer lokaler Referenzpunktandidaten
- *Wenn mehrere Track verglichen werden, müssen die Referenzpunkte der jeweiligen Tracks sich räumlich sehr nahe liegen*
- Kalibrierung der Messungen auf lokalen Referenzpunkt im AOI
- Berechnung der Varianz im AOI

9.2 Auswertung von ascending (TL2) und descending (TL1) Daten bezüglich vertikaler und horizontaler Bewegungen (CAU Kiel)

Mit den Daten der Teillieferungen 1 und 2 des Bodenbewegungsdienstes ergab sich für einen Teil des Untersuchungsgebiets die glückliche Situation, dass dort Daten von zwei aufsteigenden (ascending) Sentinel-1 Orbits und einem absteigenden (descending) Orbit vorlagen. Mithilfe von Vektoraddition konnte daraus der vertikale Bewegungsanteil berechnet werden und, unter Vernachlässigung von Nord-Süd-Bewegungen, auch der Ost-West-gerichtete Bewegungsanteil. Wir untersuchten damit, ob die beobachtete Hebung in Bad Segeberg auch mit horizontalen Bewegungsanteilen verknüpft ist. Die Untersuchungen wurden entlang eines Nord-Nordost Süd-Südwest Profils vorgenommen (Abb.52) und nur Scatterer mit einer zeitlichen Kohärenz von mindestens 0,87 wurden berücksichtigt.

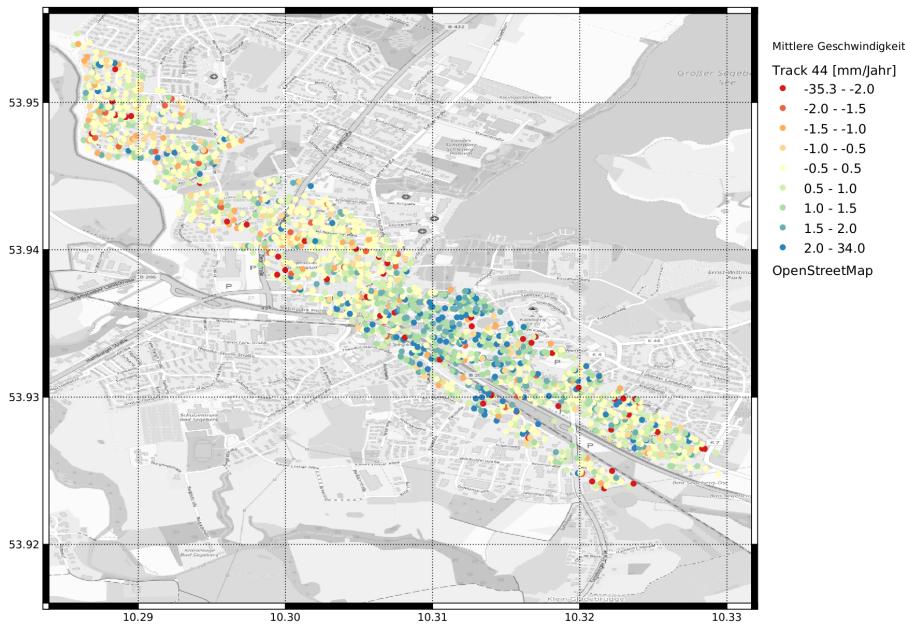


Abbildung 52: Profillage über Bad Segeberg, Beispiel Track 44

Für diese Untersuchung wurde zunächst die Umrechnung von line-of-sight (LOS) gemessenen Geschwindigkeiten in den vertikalen Bewegungsbeitrag, welche mit der Annahme von vernachlässigbaren horizontalen Bewegungen in den gelieferten Daten vorgenommen wurde, rückgängig gemacht. Das geschah mit einer einfachen Multiplikation der mittleren Geschwindigkeit der Scatterer (“Mean_Velo”) mit der vertikalen LOS Vektorkomponente (“LOS_up” , etwa 0,767 mm/Jahr für absteigend BBD TL1, 0,735 mm/Jahr für aufsteigend Track 117 und 0,822 mm/Jahr für aufsteigend Track 44). Die mittleren LOS-Geschwindigkeiten der Scatterer wurden dann über die Profilbreite und entlang des Profils trackweise etwa alle 250 m gemittelt und es wurde ein Referenzpunkt willkürlich festgelegt (Abb. 53).

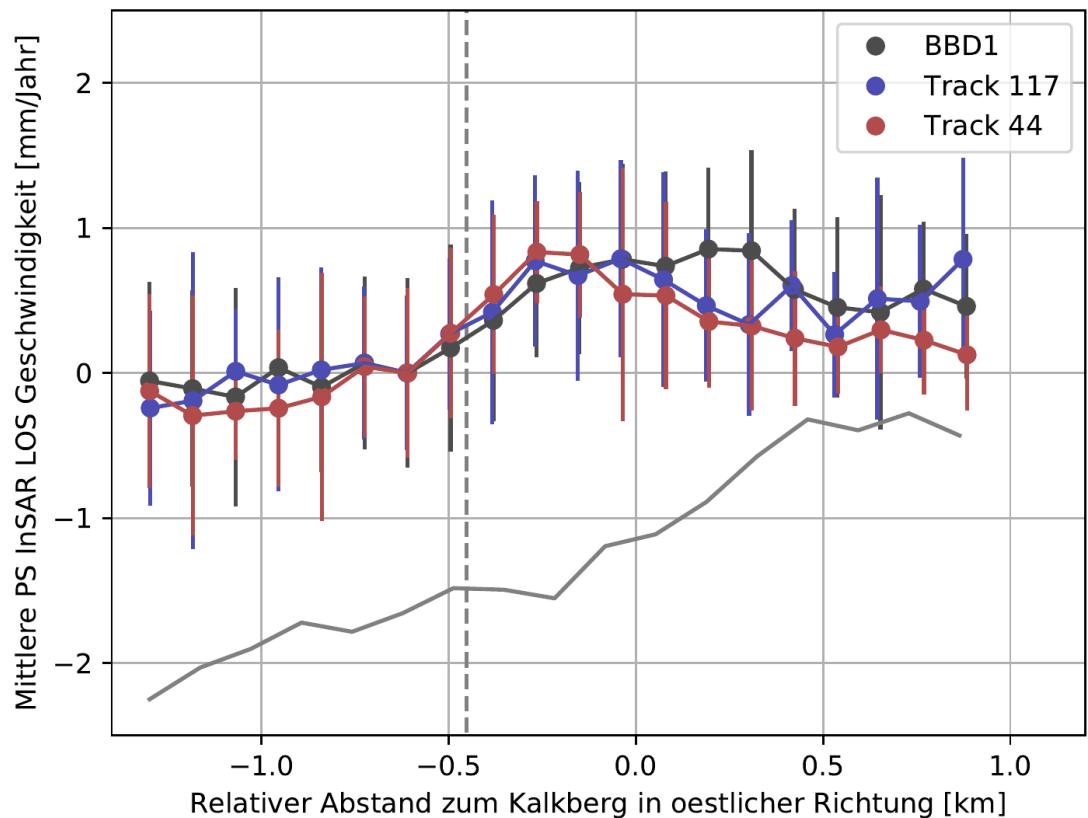


Abbildung 53: Gemittelte und referenzierte line-of-sight Geschwindigkeiten (Referenzpunkt bei etwa 0,6 km) entlang der ONO-WSW Profile (Abb. 37) von drei Tracks (aufsteigend: Track 44, 117, absteigend BBD TL1). Die graue Linie zeigt die gemittelte Höhe der Scatterer.

Track 44 hat die Aufnahmegeometrie mit dem am steilsten einfallenden Inzidenzwinkel und damit der höchsten Sensitivität für vertikale Bewegungen. Gegenläufige Trends in den LOS-Geschwindigkeiten zwischen aufsteigenden und absteigenden Profilen deutet auf Ost-West gerichtete Bewegungen hin. Das ist zum Beispiel im Profil zwischen 0 bis 0,5 km zu erkennen (Abb. 53).

Für die Zerlegung der LOS Geschwindigkeiten in vertikale und Ost-West gerichtete Komponenten wird eine gewichtete Vektorsummation von aufsteigenden und absteigenden LOS Geschwindigkeiten vorgenommen. Es werden hier die gemittelten Profil-Daten verwendet und je aufsteigendem Track (44 und 117) eine Zerlegung durchgeführt. Die getrennte Berechnung für Track 44 und Track 117 erlaubt eine grobe Einschätzung der Daten-Konsistenz.

Die Vektorzerlegung basiert auf der Überlegung, dass Ost-West gerichtete Bewegungen in Messungen von aufsteigenden und absteigenden Orbits jeweils verschiedene Vorzeichen haben, vertikale Bewegungen hingegen gleichermaßen abgebildet werden. Daraus folgt, dass bei etwa gleichem Einfallswinkel von Messungen in aufsteigenden und absteigenden Orbits eine Addition der Werte in eine gegenseitige Auslöschung der Ost-West Anteile resultiert (Abb. 54 links). Bei einer Differenzbildung, verschwinden die vertikalen Komponenten (Abb. 54 rechts).

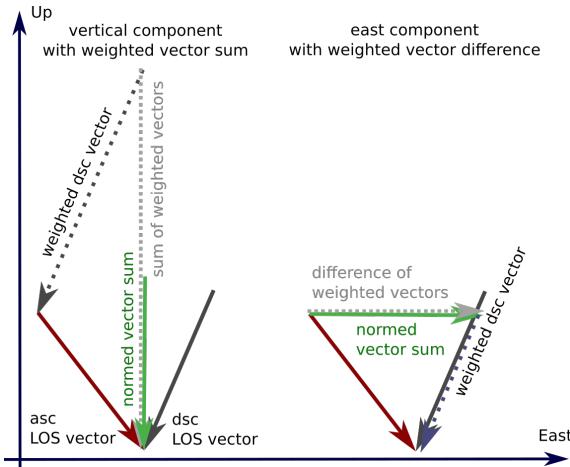


Abbildung 54: Grafische Darstellung der Vektorzerlegung von line-of-sight nach Ost und vertikal.

Die Ergebnisse skalieren mit den Summen der z-, bzw. e-Komponente, die also noch zu berücksichtigen sind. Sind die Einfallswinkel der Aufnahmen von aufsteigenden und absteigenden Orbits verschieden (der allgemeine Fall), muss eine wie folgt beschriebene Gewichtung erfolgen. Es seien $\overrightarrow{n_{asc}}$ und $\overrightarrow{n_{dsc}}$ LOS Einheitsvektoren in Ost-Hoch Richtung, unter Vernachlässigung der Nord-Süd-Komponente:

$$\begin{aligned}\overrightarrow{n_{asc}} &= (n_{e,asc}, n_{z,dsc}), \\ \overrightarrow{n_{dsc}} &= (-n_{e,dsc}, n_{z,dsc}),\end{aligned}$$

wobei n_z "LOS_up" entspricht und n_e aus n_z berechnet werden kann, mit $n_e = \sin(\arccos(n_z))$.

Seien die LOS Bewegungen von aufsteigenden und absteigenden Orbits v_{asc} und v_{dsc} .

Zur Bestimmung der vertikalen oder Ost-West Bewegungskomponente wird eine gewichtete Addition oder Subtraktion der Geschwindigkeiten vorgenommen:

$$v_z = \frac{v_{asc} + |\frac{n_{e,asc}}{n_{e,dsc}}| v_{dsc}}{n_{e,asc} + |\frac{n_{e,asc}}{n_{e,dsc}}| n_{z,dsc}}, \quad v_e = \frac{v_{asc} - |\frac{n_{z,asc}}{n_{z,dsc}}| v_{dsc}}{n_{e,asc} + |\frac{n_{e,asc}}{n_{e,dsc}}| n_{z,dsc}}$$

Die Ergebnisse der Vektorzerlegung sind in den Abbildungen 55 und 56 dargestellt. Für die vertikale Komponente ergibt sich ein klares Maximum an der Flanke zu erhöhten Lagen im östlichen Bad Segeberg und die Werte sinken nach Osten hin nicht auf null ab. Die Ost-West-Bewegung hat eine deutlich kleinere Amplitude bei wesentlich unverändertem Fehler. Das Signal muss prinzipiell als nicht signifikant eingestuft werden. Die Auswertung mit Daten des Track 44 und Track 117 zeigen leichte Unterschiede. Es ist interessant, dass sich westlich vom Maximum der vertikalen Bewegung eine leichte Tendenz einer westwärts gerichteten Bewegung zeigt und östlich eine leicht ostwärts gerichtete Bewegung. Das entspräche dem Signal einer Aufwölbung dieses Bereiches mit vom Zentrum nach oben und außen gerichteten Bewegungen. Das Signal ist daher zwar statistisch insignifikant, aber es könnte den vorliegenden Prozess in sinnvoller Art abbilden.

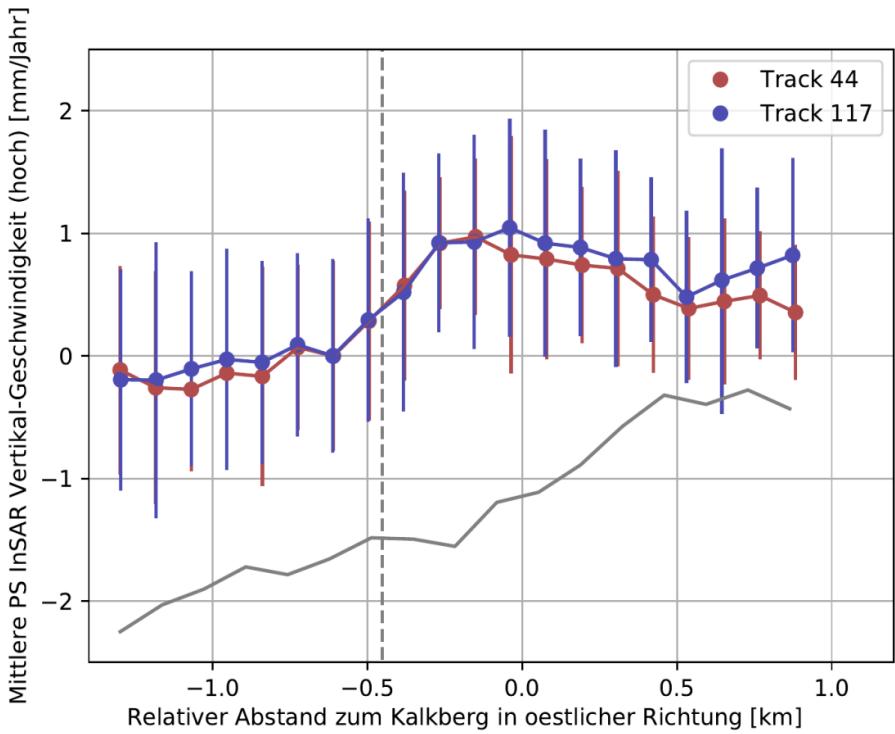


Abbildung 55: Vertikale Komponente der Geschwindigkeiten.

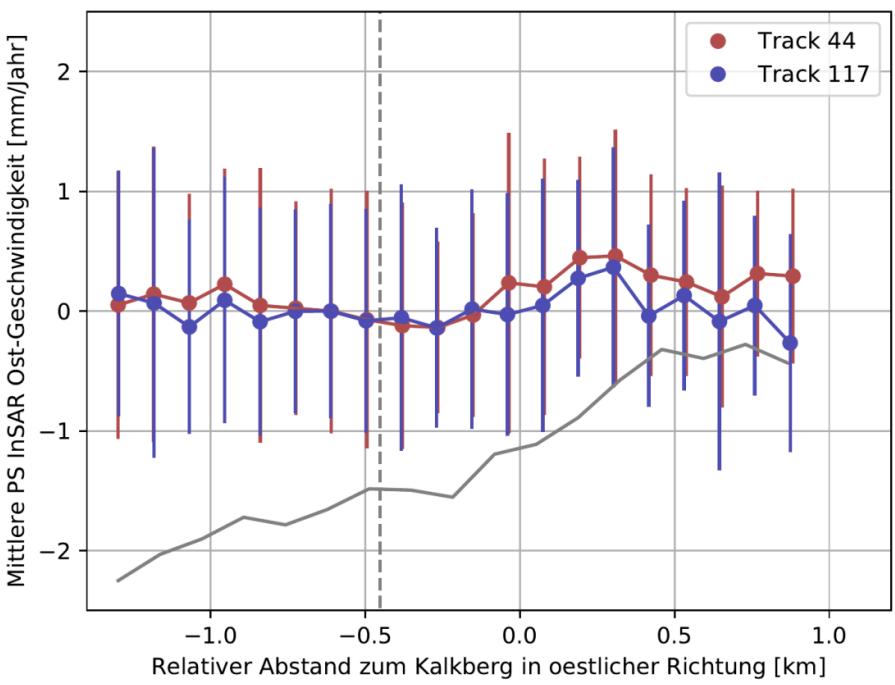


Abbildung 56: Ost-Komponente der Geschwindigkeiten.

9.3 Auswertung von Signalen an einem Kavernenspeicher

Die Aktivität von Bewegungen über Gaspeicher-Kavernen wird in den Bodenbewegungsdaten ersichtlich. (Abb. 57 und Abb. 58). In Kiel-Rönne wird ein Kavernenspeicher betrieben, welcher mit drei aus einem Salzstock gespülten Kammern ein Volumen von mehr als 500 m^3 bereitstellt. Dieses Volumen erlaubt die Speicherung von mehr als 80 Mio. m^3 komprimiertem Gas (www.swkiel-speicher.de). Die Bodenbewegungen über den Kavernen zeichnet sich hauptsächlich durch ein lokales Senkungssignal. Durch die geringe lithologische Kompetenz des Salzes schließen sich die Kammern unter dem lithostatischen Druck langsam, was eine Oberflächenabsenkung mit sich bringt [Wei et al. (2016)]. Die Verpressung von Gas mit Gaszufuhren und -entnahmen während des Betriebes sollte zudem im darüber liegenden Gebiet für Schwankungen von Bodenhebungen und Bodenabsenkungen führen.

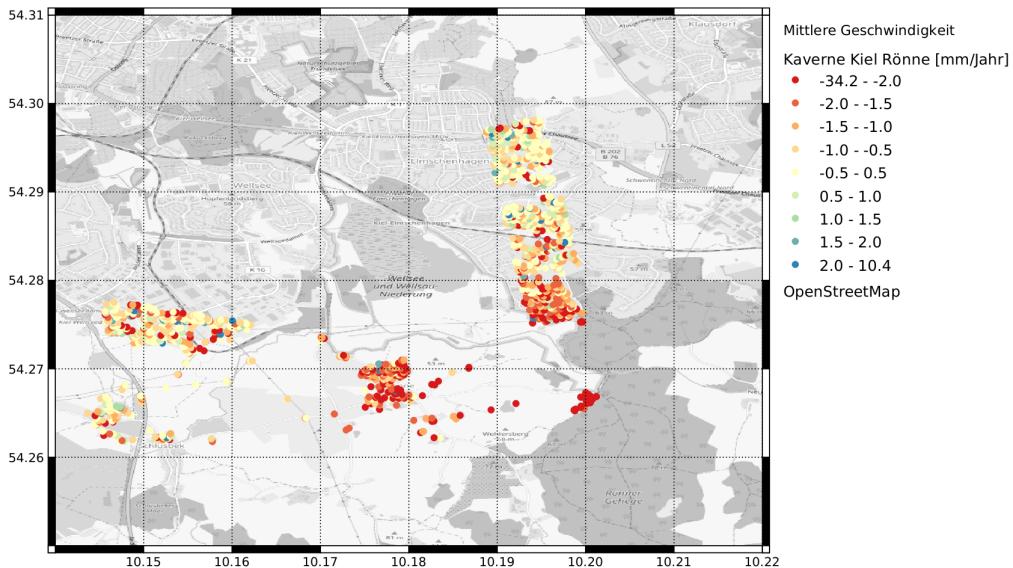


Abbildung 57: Mittlere Bodenbewegungen in der Nähe einer Gaspeicher-Kaverne in Kiel-Rönne. Es handelt sich um bis zu drei Einzelkavernen in einem Salzstock, die von den Gebäuden aus betrieben werden, die ganz im Südosten Scatterer stellen.

Der Einflussbereich der induzierten Bodenbewegungen um die Speicherkaverne herum ist kreisförmig, mit einem Einflussradius von mindestens zwei Kilometern (Abb. 57 und 58). Die bestimmten mittleren Geschwindigkeiten im Untersuchungszeitraum der TL2 zeigen Absenkungen an mit Werten von bis zu 6 mm/Jahr in der unmittelbaren Nähe der Kaverne und unterliegen den normalen Schwankungen von 1 mm/Jahr bis 2 mm/Jahr. Dieses Signal scheint also vom langsamen Schließprozess der Kavernen dominiert zu sein.

Eine Betrachtung der Zeitreihen direkt an den Gebäuden des Kavernenbetriebes, welche 20 stabile Scatterer im Stapel des Track 44 stellen, zeigt Schwankungen (Abb. 59, links). Bei aufeinander folgenden Aufnahmen werden Verschiebungsdifferenzen von bis zu 20 mm gemessen und insgesamt haben die Abweichungen eine große Standardabweichung von 4,5 mm/Jahr. Zehn der Scatterer haben eine temporäre Kohärenz größer als 0,9 und diese weisen deutlich geringere Schwankungen zwischen Aufnahmen von maximal 10 mm

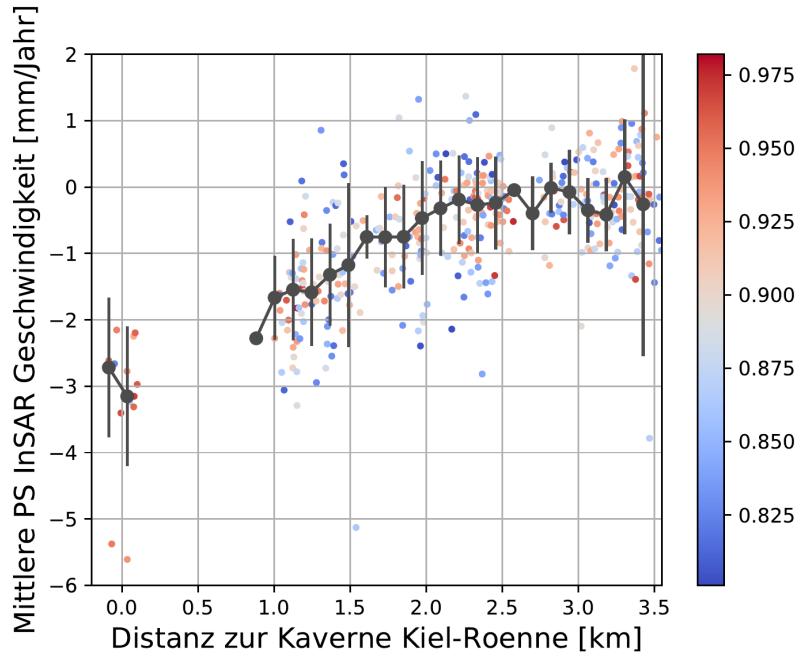


Abbildung 58: Mittlere Geschwindigkeiten des Nord-Süd-Profils (Abb. 57) als farbige Punkte, wobei die Farbe die temporäre Kohärenz der Punkte angibt. Die schwarze Kurve zeigt Mittelwerte der Geschwindigkeiten entlang des Profils und in 250 m Abständen mit ihrer Standardabweichung.

auf (Abb. 59, oben).

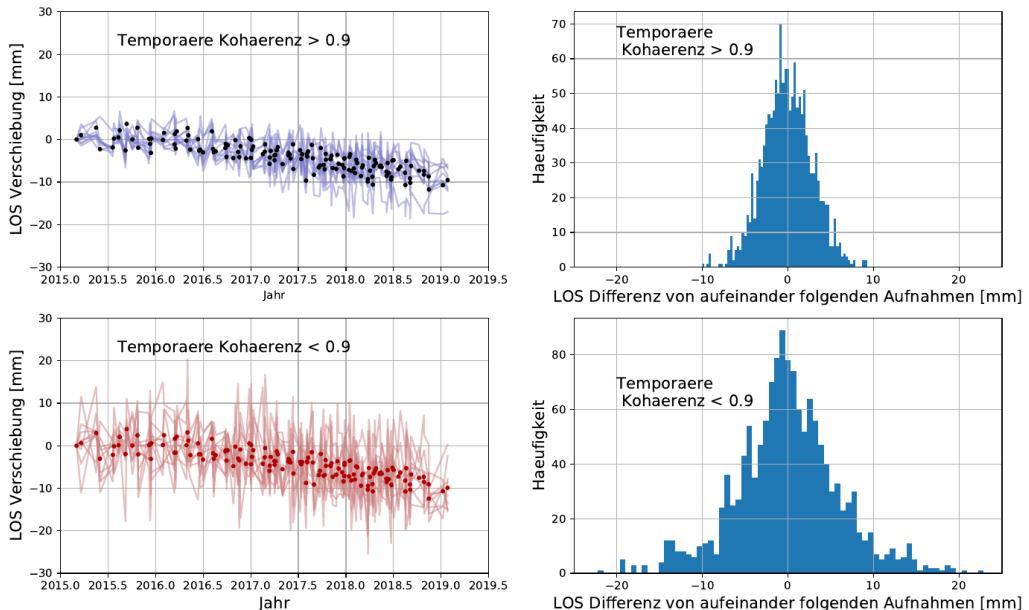


Abbildung 59: Links: Zeitreihen der einzelnen Scatterer auf dem Kavernengelände bei Kiel-Rönne als Linien für Punkte mit hoher Kohärenz (links oben) und kleinerer Kohärenz (links unten). Der Mittelwert der Verschiebung der 20 Scatterer für jede Aufnahme ist mit Punkten markiert. Rechts: Histogramme der Positionsänderungen zwischen aufeinander folgenden Akquisitionen (Sprünge in den Zeitreihen) für hoch- und niedrig-kohärente Punkte.

Vergleicht man die Histogramme von Scatterern mit hoher und niedriger Kohärenz, dann fällt bei Rückstreuern mit niedriger Kohärenz eine leichte Erhöhung der Häufigkeit

von Aufnahme-zu-Aufnahme Verschiebungen bei etwa 14 mm auf. Dabei könnte es sich um ein Artefakt durch fehlerhaftes Unwrapping handeln, denn 14 mm entspricht einer Zwei-Wege-Phasenverschiebung von 28 mm, was wiederum der Hälfte der Radarwellenlänge entspricht. Bei eventuell sehr starken anthropogenen Bodenverschiebungen innerhalb von 6 Tagen von nahe oder mehr als 14 mm auf engem Raum, werden die Annahmen der PSI Methode von kleinen Bewegungen (strikt kleiner als ein Viertel der Wellenlänge in LOS-Richtung) verletzt. Welche Größenordnung die Bodenbewegungen über der Kaverne etwa haben, könnte mit geophysikalischen Modellierungen untersucht werden.

An einem Kavernenspeicher ist zu erwarten, dass sich langsame Prozesse und schnelle Bewegungen überlagern. Es besteht eine langsame Oberflächenabsenkung durch das Zusammenfließen des Salzes und allmählicher Schließung der Kavernenhohlräume. Zusätzlich erwartet man Fluktuationen von Hebung und Senkung des Bodens durch wechselnden Gasdruck in den Kavernen, der durch unregelmäßige, bedarfsgesteuerte Einfüllung und Entnahme von Gas entsteht. Diese Fluktuationen würden eine Korrelation mit den Speicherfülldaten zeigen, die uns zurzeit nicht vorliegen. Möglicherweise haben die Fluktuationen eine saisonale Komponente, da im Winter wahrscheinlich mehr Gas entnommen wird. Die Abschätzungen der saisonalen Amplitude aus den Zeitreihen zeigt jedoch keine sichtbare Abhängigkeit mit der Distanz zur Kaverne (Abb. 60).

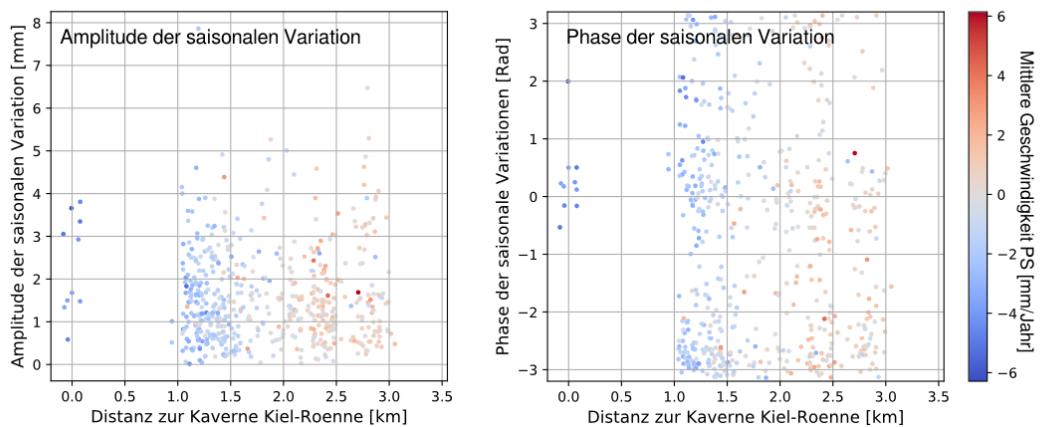


Abbildung 60: Amplitude und Phase der saisonalen Variationen als Funktion des Abstandes zur Kaverne entlang des Profils (Abb. 57). Die Farbkodierung zeigt die mittlere Geschwindigkeit der Streupunkte (Abb. 58).

9.4 Profilschnitte entlang der Flensburg-Sieverstedter Störungszone

Untersuchungen der BBD Sentinel-1 Daten entlang der Witzhave-Segeberg-Plön Verwerfungszone, die vom Geologischen Dienst SH im LLUR durchgeführt wurden, zeigen über Bad Segeberg Hinweise auf langsame tektonische Bewegungen (siehe auch Bericht 2018, Kapitel 6.4). Unter Verwendung von ähnlichen Methoden untersuchten wir mehrere Bereiche hinsichtlich langsamer, tektonischer Bewegungen an der Flensburg-Sieverstedter Störungszone (Abb. 61).

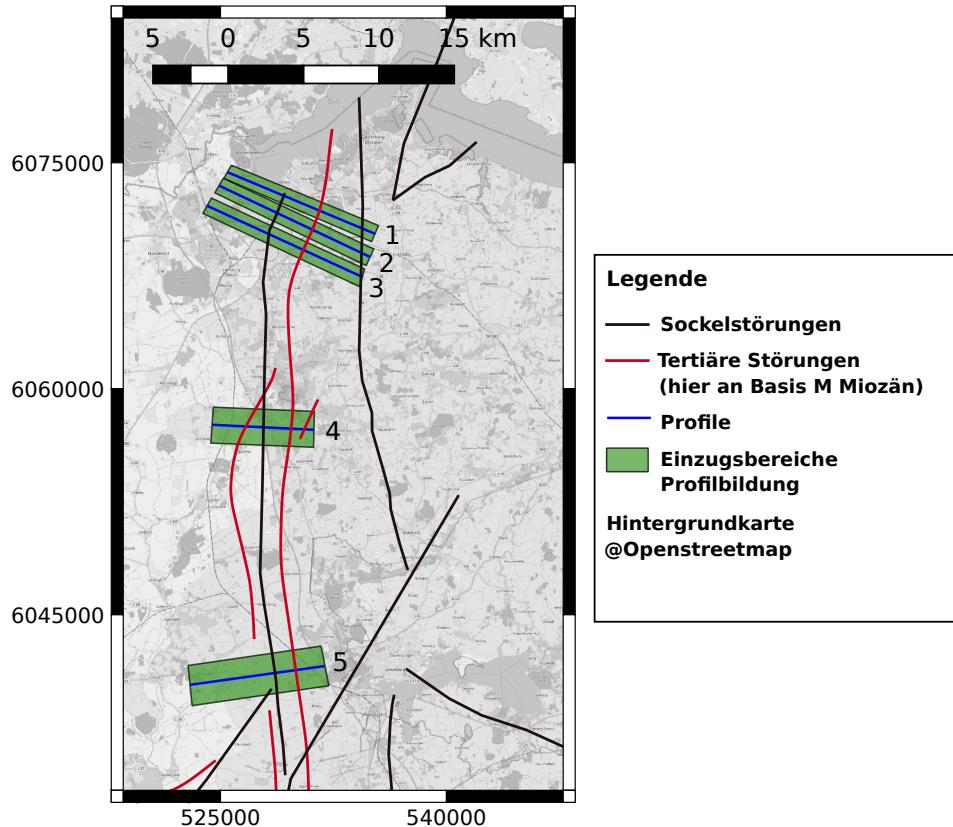


Abbildung 61: Übersicht über die Lage der ausgewerteten Profile entlang der Flensburg-Sieverstedter Störungszone. Markiert sind die Sockelstörungen des oberen Perm in schwarz und im Tertiär aktive Störungen mit ihrer Lage an der Basis des mittleren Miozäns in rot.

In den vorhergehenden Arbeiten des SGD konnte gezeigt werden, dass an der Witzhave-Segeberg-Plön Verwerfungszone die Mittelwerte der Bodenbewegungen östlich und westlich signifikante Differenzen zeigen. Die Mittelwertbildung über viele Einzelmessungen von Geschwindigkeitsraten an den stabilen Streupunkten gleicht die bekannten Schwankungen dieser zum Teil aus (siehe auch Bericht 2018, Kapitel 6.3, Abb. 48). Das erhöht die Stabilität der Analyse und die Fähigkeit langsame Bewegungen zu detektieren. Der nun verwendete Ansatz unter der Verwendung von Profilen ist ähnlich und wird folgend beschrieben.

Die Profile sind senkrecht zu den kartierten Störungslinien orientiert und überspannen diese mit einer Länge von 7 km und länger (Abb. 61). Die Bodenbewegungsgeschwindigkeitswerte an den Streupunkten innerhalb der Profilbereiche werden gemittelt: quer zum Profil in einem Abstand von etwa 1 km bis 2.5 km und entlang des Profils in Abständen von eini-

gen hundert Metern. Da in städtischen Räumen die Streupunktdichte hoch ist, verwenden wir hier Mittelungen quer zum Profil von 1 km und entlang des Profils in Abständen von 400 m (Profile 1 bis 3). Im ländlichen Raum mit geringerer Streupunktdichte wird über größere Bereiche gemittelt, über 2.5 km quer zu den Profilen und 600 m entlang der Profile (Profile 4 und 5). Die Mittelwerte selbst werden mit Bodengeschwindigkeitswerten gebildet, die einen Kohärenzwert größer 0.87 haben. Des weiteren gewichten wir Punkte mit hoher Kohärenz stärker als Punkte mit niedriger Kohärenz. Diese Gewichtungsfunktion ist linear und resultiert bei relativ niedriger Kohärenz um 0.87 in einen Gewichtungsfaktor von etwa 0.5, und bei hoher Kohärenz von 0.98 in einen Gewichtungsfaktor von etwa 1.6. In anderen Worten, ein Geschwindigkeitswert mit sehr hoher Kohärenz geht in die Mittelwertbildung mit einem etwa doppelten Gewicht ein, im Vergleich zu Geschwindigkeitswerten mit mittlerer Kohärenz, und mit einem etwa vierfachen Gewicht, im Vergleich zu Geschwindigkeitswerten mit sehr niedriger relativer Kohärenz.

Im nördlichsten Profil über die Flensburger Förde kann man einen leichten Anstieg der Bodenbewegungsgeschwindigkeiten von Westen nach Osten beobachten (Abb. 62). Signifikante Änderungen der Bewegungsraten werden jedoch nur entlang der zwei südlicheren Profile in der Region Flensburg beobachtet (Abb. 63 und 64). Von Westen nach Osten nehmen die Bewegungsraten um etwa 1 mm/Jahr zu. Bei einer Vernachlässigung von horizontalen Bewegungen entspricht das einer ähnlich starken Hebung östlich der Flensburg-Sieverstedter Störungszone. Die Bewegungsraten ändern sich dabei nicht abrupt, sondern graduell über eine Länge von etwa 5 km. Diese Störungszone ist in der Höhe der Profile 1 bis 3 eine westlich und listrisch einfallende Abschiebung, welche die tertiären Schichten um variierende Beträge von mehreren Zehnermetern bis mehreren hundert Metern gegeneinander versetzt. Das Signal ist damit durchaus konsistent zur Tektonik, aber trotz des relativ schwachen Signal-Rausch-Verhältnisses ist die relative Änderung von 1 mm/Jahr viel schneller, als die Bewegungen, die es an dieser Störung während des Tertiärs gab. Für die Basis der quartären Schichten ist kein Versatz an der Störung nachgewiesen.

Das Bodenbewegungssignal ist konsistent in den drei übereinander liegenden Profilen. Da jedoch keine Korrelation mit der Topographie besteht (Abb. 62 bis 66), sind atmosphärische Artefakte unwahrscheinlich. Ein Vergleich mit den Nivellementdaten (siehe Kapitel 7) ist hier nicht ohne weiteres möglich, da es keine konsistenten Messlinien über die Störungszone hinweg gibt (Abb. 26 und 27).

In den Profilen 4 und 5 südlich von Flensburg (Abb. 65 und 66) sind Unterschiede in den Bewegungsraten nur schwach ausgeprägt. Über Tarp (Abb. 65, Profil 4) sind keine Tendenzen zu erkennen, die sich mit Störungen im Untergrund in Verbindung bringen lassen. Über Silberstedt und Schuby (Abb. 66, Profil 5) gibt es eine schwache, nicht signifikante Tendenz. Hinweise darauf, ob hydrologische Effekte bei der Bestimmung der mittleren Bewegungsraten eine Rolle spielen und starke Artefakte verursachen, könnten die saisonalen Werte geben, die bisher nicht näher untersucht wurden.

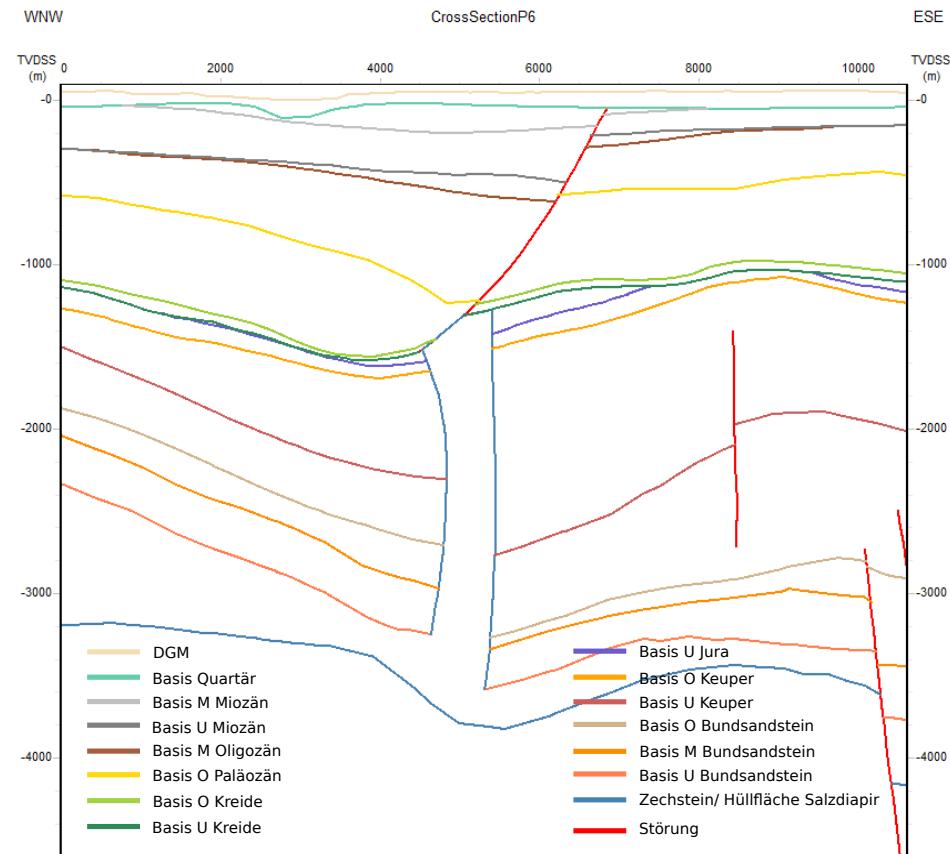
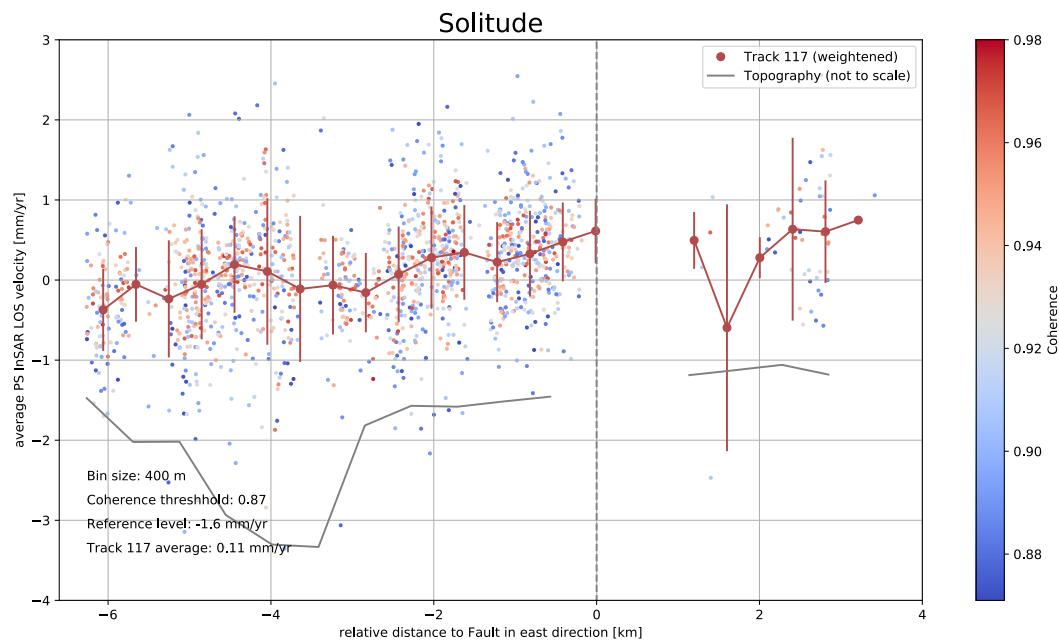


Abbildung 62: Bodenbewegungsprofil 1 über Flensburg mit zugehörigem Profiltiefenschnitt. Oben: Bodenbewegungsraten der Streupunkte (farbige Punkte) und Mittelwerte (rot) innerhalb des Schnittpolygons Flensburg, Höhe Solitude (Abb. 61, Profil 1) als Funktion der Lage entlang des Profils relativ zur Position von im Tertiär aktiven Störungen (hier Basis des mittleren Miozäns) nach dem Geotektonischen Atlas von Nordwest-Deutschland [Baldschuhn et al. (2001)]. Die Farbkodierung der Punkte basiert auf dem Kohärenzwert und Punkte mit einer Kohärenz unter dem Schwellwert von 0.87 sind in grau dargestellt. Die senkrechten Linien an den Mittelwerten zeigen die 68% Vertrauensintervalle des Mittelwerts. Die graue Linie zeigt den Verlauf der Topografie. Unten: Zugehöriger Profil-Tiefenschnitt des geologischen Untergrundes aus dem 3D Strukturmodell SH 2016 (Dr. Fabian Hese, SGD).

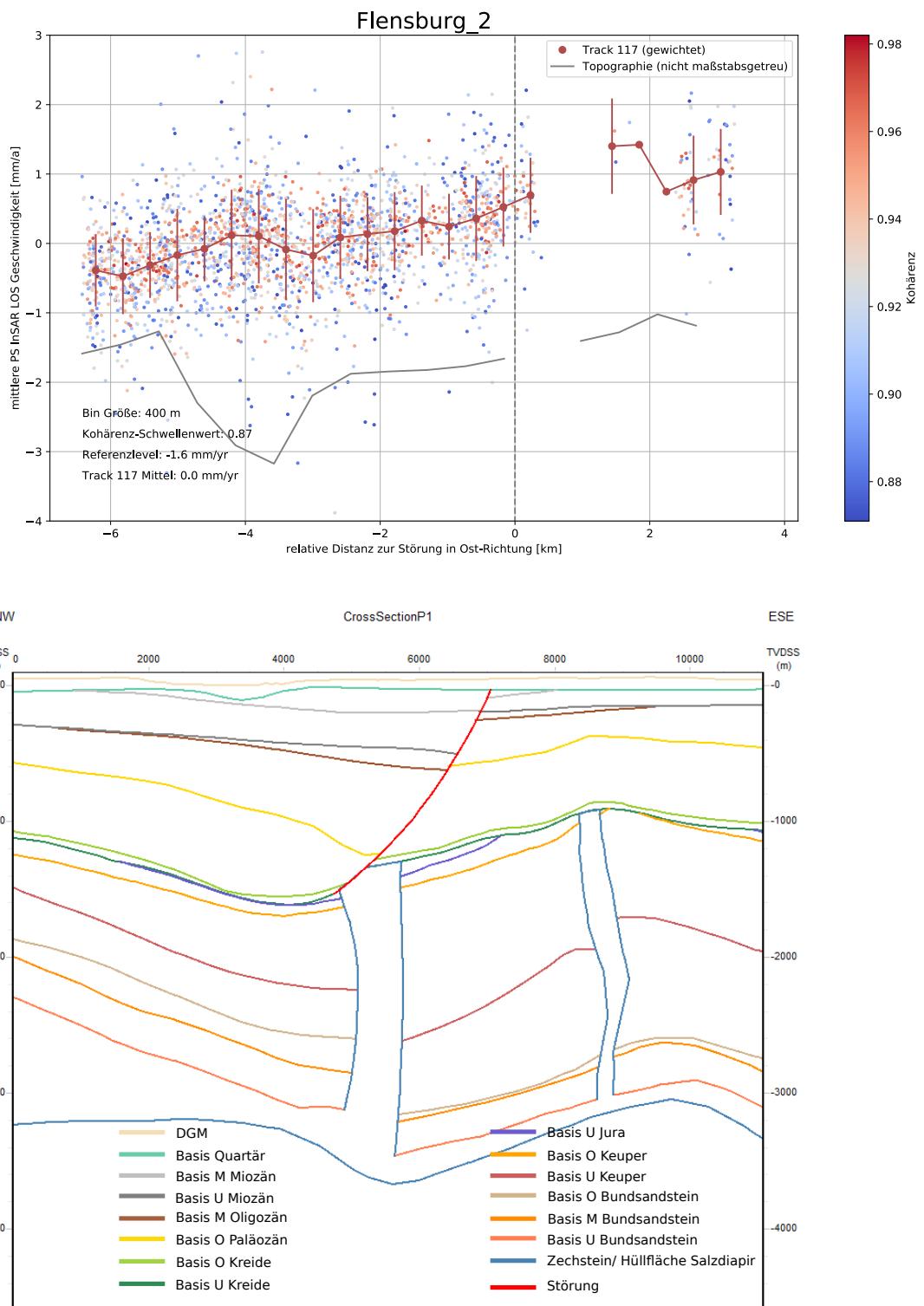


Abbildung 63: Bodenbewegungsprofil 2 über Flensburg, nördliches Stadtgebiet, mit zugehörigem Profiltiefenschnitt (Abb. 61, Profil 2). Detailbeschreibung zur Abbildung siehe Abb. 62

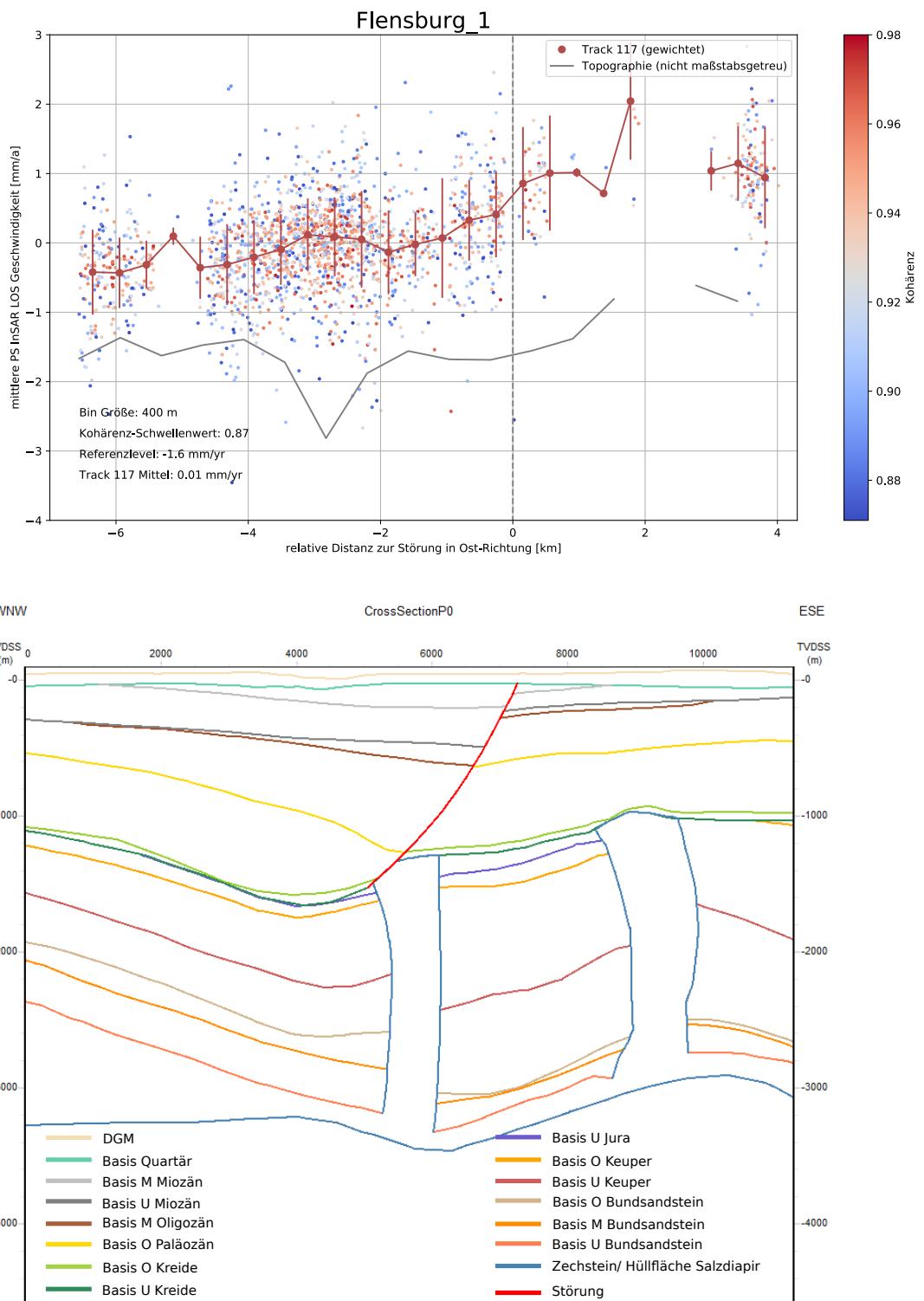


Abbildung 64: Bodenbewegungsprofil 3 über Flensburg, südliches Stadtgebiet, mit zugehörigem Profiltiefenschnitt (Abb. 61, Profil 3). Detailbeschreibung zur Abbildung siehe Abb. 62

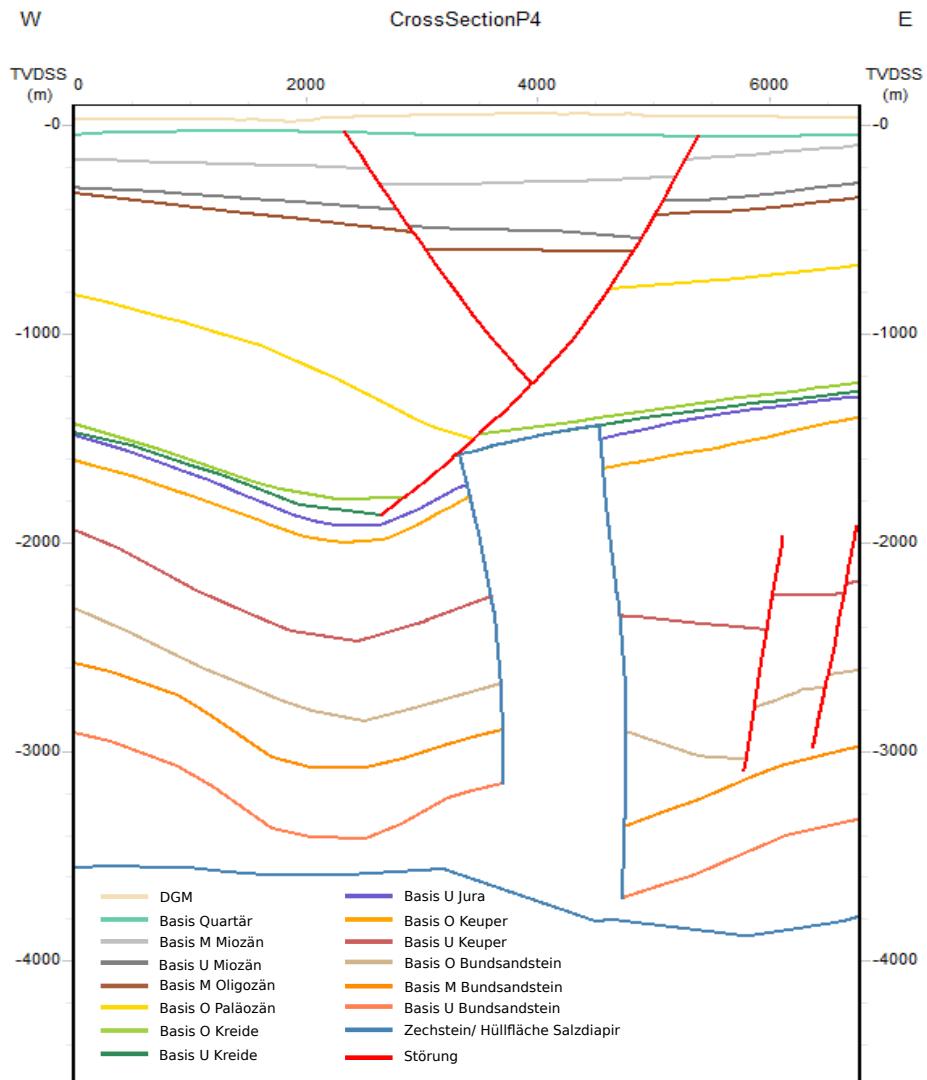
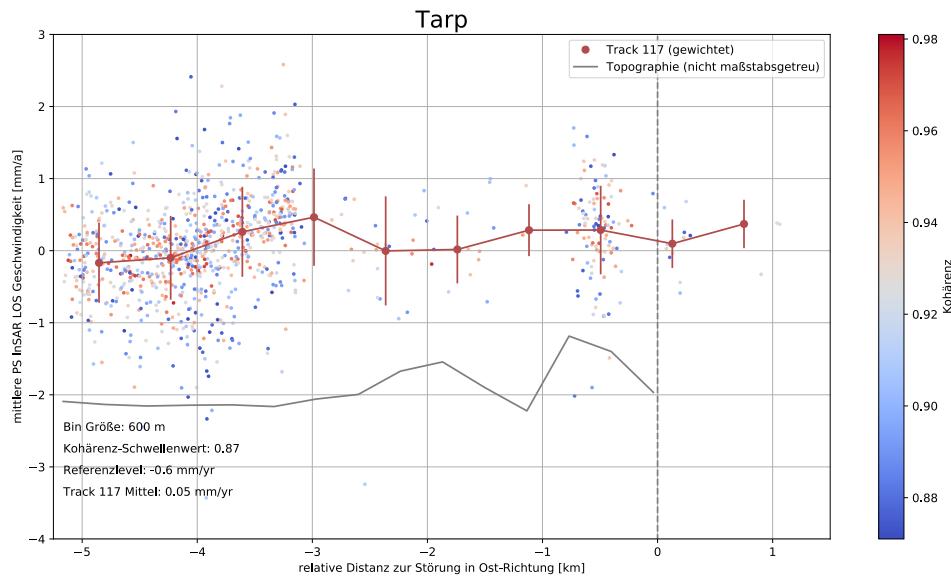


Abbildung 65: Bodenbewegungsprofil 4 über Tarp mit zugehörigem Profiltiefenschnitt (Abb. 61, Profil 4). Detailbeschreibung zur Abbildung siehe Abb. 62

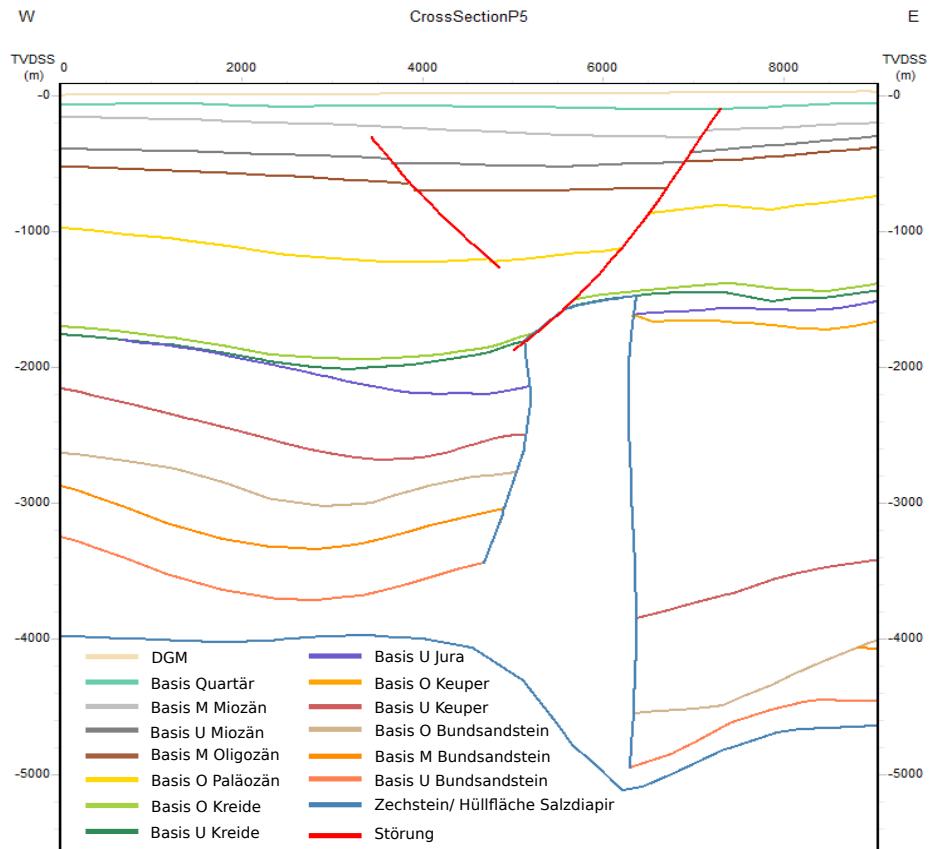
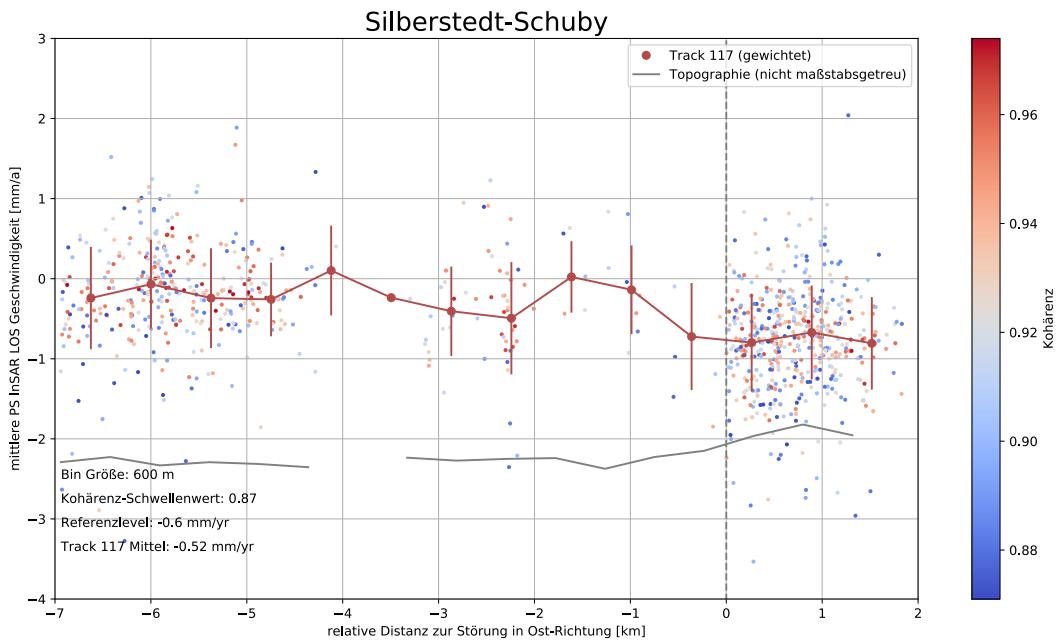


Abbildung 66: Bodenbewegungsprofil 5 über Schuby, Silberstedt, mit zugehörigem Profiltiefenschnitt (Abb. 61, Profil 5). Detailbeschreibung zur Abbildung siehe Abb. 62

10 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Zusammenarbeit zwischen dem Geologischen Dienst SH (SGD) im Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (LLUR) und dem Institut für Geowissenschaften (IfG) der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel wurden auch im Jahr 2019 wichtige Fortschritte in der systematischen Überwachung der Seismizität in Schleswig-Holstein und im Verständnis über die Ursachen vergangener und aktueller seismische Ereignisse erzielt.

Das seismologische Stationsnetz umfasst mittlerweile 16 permanente und temporäre Stationen. Während das permanente Netz als Teil des GRSN in Echtzeit an die BGR in Hannover angebunden ist, operieren die meisten temporären Stationen "offline". Daraus ergibt sich, daß die Daten regelmäßig lokal abgeholt und manuell ins Archiv eingepflegt werden müssen. Darüberhinaus bleiben eventuelle technische Probleme über längere Zeiträume unbemerkt, was zu größeren Datenausfällen führen kann. Deshalb wurde in 2019 begonnen, auch temporäre Stationen mit LTE-Routern zu erweitern und die Daten dieser Stationen in Echtzeit am IfG zu erfassen und archivieren. Der Vorteil ist hierbei zweierlei: erstens können die Daten in Echtzeit verarbeitet und in die Routineauswertung am IfG eingehehen; zweitens können technische Probleme an einzelnen Stationen schnell identifiziert und häufig aus der Ferne gelöst werden. Sollte letzteres nicht möglich sein, kann ein Besuch an einzelnen Stationen bedarfsgerechter erfolgen und somit Zeit- und Personalaufwand einsparen.

Ein weiterer Ausbau des Stationsnetzes in Schleswig-Holstein ist auch zukünftig zu empfehlen und wurde mit der Einrichtung einer Testinstallation im Dänischen Wohld in 2019 begonnen.

Ein wesentlicher Fortschritt im Jahr 2019 ist die Aufnahme einer regelmäßigen und systematischen Datenauswertung aller in Echtzeit zur Verfügung stehenden Daten am IfG. Hierzu wurde das in 2018 begonnene Datenakquisitions- und -auswertesystem zunächst ausgebaut, auf neue Hardware umgesetzt und wird seit 1. Juni 2019 im Regelbetrieb ausgewertet. Neben der automatischen Detektion von Erdbeben weltweit steht dabei die manuelle Nachbearbeitung einzelner Ereignisse mit direktem Bezug zu Schleswig-Holstein im Mittelpunkt. Häufig werden kleinere Ereignisse in SH - meist Sprengungen - von der Automatik noch nicht erfasst, weshalb die manuelle Durchsicht der Wellenformen bis auf weiteres unerlässlich bleibt. Von einer zukünftigen Station im Dänischen Wohld (s.o.) sollte eine automatische Detektion zumindest von Ereignissen in der südwestlichen Ostsee profitieren. Als Ergebnis der seit 1. Juni durchgeführten, systematischen manuellen Auswertung wurde erstmalig ein Ereigniskatalog für Schleswig-Holstein erstellt. Dieser übersteigt die Anzahl an Ereignissen in überregionalen Katalogen deutlich und soll zukünftig als Grundlage zur Beschreibung seismischer Ereignisse in Schleswig-Holstein dienen.

In 2018 wurden erstmals natürliche seismische Ereignisse am lokalen Bad Segeberg Netz nachgewiesen ([Weidle et al. (2019)]). Diese wurden nun ausführlich ausgewertet und ein natürlicher, höchstwahrscheinlich aber nicht tektonischer Ursprung nachgewiesen. In zwei mehrtägigen Zeiträumen Anfang und Ende Februar 2018 wurden knapp 350 Ereignisse in den Wellenformen der Stationen BSEG im Kalkberg und BSEA1 in Stipsdorf identifiziert. Die stärksten Ereignisse erreichten dabei eine geschätzte Magnitude von ca. 0.

Auslöser der Ereignisse waren zwei Perioden starken Frosts, welche zu Frostspiegelungen im flachen Untergrund geführt haben. Auch wenn ein tektonischer Ursprung somit unwahrscheinlich ist, so zeigt die Beobachtung und Auswertung dieser Ereignisse, daß schwache Ereignisse im Magnitudenbereich von etwa -1 und größer vom lokalen Bad Segeberg Netz erfasst werden sollten.

Neben der Auswertung von instrumentellen Wellenformdaten wurde 2019 auch die Beobachtung historischer Ereignisse im südwestlichen Ostseeraum wieder aufgenommen. Hierzu wurden Kataloge aus Skandinavien beschafft und mit dem historischen Erdbebenkatalog für Deutschland nach [Leydecker (2011)] verglichen. Es zeigt sich einerseits eine hohe Konsistenz zwischen den Katalogen, andererseits aber bei Ereignissen aus präinstrumenteller Zeit (etwa vor 1900) Unsicherheiten in den Zeitangaben, bei Ereignissen aus instrumenteller Zeit Unsicherheiten in der ursächlichen Bewertung - Sprengung oder tektonisch - einzelner Ereignisse.

Eine detaillierte Aufarbeitung und Homogenisierung der Kataloge für den südwestlichen Ostseeraum wäre mittelfristig erstrebenswert, allerdings auch mit erheblichem Aufwand verbunden. Eine Vielzahl an Ereignissen müsste manuell abgeglichen, ggf. Wellenformen von Ereignissen beschafft und ausgewertet und nach möglichen Ursachen - Sprengung oder tektonisch - kategorisiert werden.

Die im Berichtsjahr im Fokus stehenden methodischen Entwicklungen zur Verbesserung der Analyse von InSAR Zeitreihendaten tragen maßgeblich dazu bei, dass wir die relativen Bodenbewegungsraten zunehmend besser herausarbeiten und bewerten können. Ein wichtiges Ergebnis ist, dass die Beobachtung von großräumigen, sich über mehrere Zehner-kilometer spannende Veränderungen von Bodenbewegungsraten mit den hier betrachteten Methoden nicht immer möglich ist. So eignen sich die historischen Nivellementdaten nicht für Bodenbewegungsuntersuchungen auf großem Raum (siehe Kapitel 7) und bei den InSAR Zeitreihen Produkten steigen die Unsicherheiten mit größer werdenden Distanzen (siehe Kapitel 8 und 9). Auf kleinem Raum mit Distanzen weniger als 20 km lassen sich allerdings stabile Ergebnisse erzielen. Bodenbewegungsmuster und -raten, zum Beispiel in Bad Segeberg, den Marschen und der Lübecker Altstadt, ähneln sich stark in den historischen InSAR Zeitreihen der ERS-Satelliten-Missionen und den rezenten InSAR Zeitreihen aus Aufnahmen der Sentinel-1 Satellitenmethoden (siehe Abb. 46b und 55 für Bad Segeberg und Abb. 40 für Lübeck). Die Aufarbeitung historischer Nivellementdaten zeigte für Bad Segeberg ebenfalls eine Übereinstimmung des Hebungsmusters am Kalkberg, weist

aber deutlich größere Unterschiede in den Bewegungsraten auf (siehe Abb. 30 und Abb. 55). Probleme bei der Beobachtung von Bewegungen sind weiterhin die fehlende Anbindung der InSAR-Daten an ein hochpräzises GNSS-gestütztes Höhennetz und eine oft geringe Punktdichte. So sind nur Untersuchungen von relativen Bodenbewegungen möglich und diese teilweise nur sehr lückenhaft.

In zukünftigen Arbeiten sind weitere kleinräumige Untersuchungen an Orten mit auffälligen Bewegungsmustern vorgesehen, mit den historischen und den neuen Datenlieferungen des BBD. Wir werden dabei unter anderen auch regional-spezifische Auswerteverfahren testen und Auflösungsgrenzen bestimmen. Die erzielten Ergebnisse sollen dann bezüglich möglicher Ursachen mit vorhanden geologischen Informationen abgeglichen werden.

Zur verbesserten Beobachtung der Bodenbewegung in Gefährdungsgebieten, zum Beispiel für ein Monitoring an Deichen mit schwacher Dichte von stabilen Streupunkten, würde der Einsatz passiver oder aktiver Radar-Reflektoren (sogenannte Corner-Reflektoren oder Radar-Transponder) helfen. Diese Installationen sorgen für ein starkes und stabiles Rückstreuignal der von Sentinel-1 ausgesandten Radarwellen. Diese künstlichen Installationen könnten mit GNSS Antennen kombiniert werden, was eine eindeutige Position gewährleisten würde und die eindeutige Einbindung in das Positionsnetzwerk, auch über dünn bebautem Gebiet.

In Gebieten mit kleinräumiger auffälliger Bodenbewegung könnte weiterhin eine Ergänzung der Sentinel-1 Daten mit Zeitreihen anderer höher auflösender SAR Satellitenmissionen, zum Beispiel TSX vom DLR, Cosmo-Skymed der italienischen Raumfahrtagentur, angestoßen werden. Diese Daten können bei kommerziellen Diensten bestellt und erworben werden, z.B. Infoterra von Airbus Defense und SkyGeo.

Insgesamt stellt der Datenumfang und die Vielfältigkeit der sich überlagernden Signale eine Herausforderung für die Untersuchungen dar. Visuelle Einschätzungen sind sehr aufwendig. Einige der hier gefundenen nützlichen Parameter zur Einschätzung der Qualität und der Signifikanz von Bodenbewegungssignalen (siehe Kapitel 8) könnten für die neuen vollständigeren BBD Zeitreihen bestimmt werden und mit weiteren Attributen versehen einen Trainingsdatensatz für den Einsatz von maschinellem Lernen bilden.

Literatur

- [Ahjos & Uski (1992)] Ahjos, T. and Uski, M.; Earthquakes in northern Europe in 1375–1989; Tectonophysics; Elsevier BV; 1992; 207; pp. 1-23.
- [AdV und AK-Niv6 (1995)] Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland, AdV, Arbeitskreis Höhenfestpunktfeld und Schwerefestpunktfeld, AK Niv6; Deutsches Haupthöhennetz 1992 (DHHN 92), Bayrisches Landesvermessungsamt, München, 1995.
- [Baldschuhn et al. (2001)] Baldschuhn, R. and Binot, F. and Fleig, S. and Kockel, F.; Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor: Strukturen, Strukturentwicklung, Paläogeographie; Geol. Jb., Reihe A 153, Hannover (BGR), 2001.
- [Bateson et al. (2010)] Bateson, Luke and Novali, Fabrizio and Cooksley, Geraint; A guide to the use and understanding of Persistent Scatterer Interferometry in the detection and monitoring of terrain-motion, GMES TerraFirma, ESA GMES Project Publication, 2010, doi: 10.13140/RG.2.2.16889.88161.
- [Brandes et al. (2015)] Brandes, C., Steffen, H., Steffen, R. and Wu, P.; Intraplate seismicity in northern Central Europe is induced by the last glaciation; Geology; Geological Society of America; 2015; 43; pp. 611-614.
- [Bungum et al. (2009)] Bungum, H., Pettenati, F., Schweitzer, J., Sirovich, L. and Faleide, J. I.; The 23 October 1904 MS 5.4 Oslofjord Earthquake: Reanalysis Based on Macroseismic and Instrumental Data; Bulletin of the Seismological Society of America; Seismological Society of America (SSA); 2009; 99; pp. 2836-2854.
- [EMSC] European-Mediterranean Seismological Centre, <https://www.emsc-csem.org>.
- [FENCAT] Fennoscandian Earthquake Catalogue, basierend auf [Ahjos & Uski (1992)], <https://www.helsinki.fi/en/institute-of-seismology/bulletins>.
- [Dänischer Katalog] Auszug aus dem dänischen Erdbebenkatalog, persönliche Kommunikation T. Dahl-Jensen, GEUS, Dänemark, 2019.
- [GEOFON] Erdbebeninformationen des GEOFON Programms des GeoForschungsZentrums Potsdam: <https://geofon.gfz-potsdam.de>.
- [Grube (2019)] Grube, A; Palaeoseismic structures in Quaternary sediments, related to an assumed fault zone north of the Permian Peissen-Gnuzt salt structure (NW Germany) – Neotectonic activity and earthquakes from the Saalian to the Holocene; Geomorphology; Elsevier BV; 2019; 328; pp. 15–27.
- [Grünthal et al. (2008)] Grünthal, G. and Stromeyer, D. and Wylegalla, K. and Kind, R. and Wahlström, R. and Yuan, X. and Bock, G.; The Mw 3.1–4.7 earthquakes in the

southern Baltic Sea and adjacent areas in 2000, 2001 and 2004; Journal of Seismology; 2008; 12; 3; pp. 413–429.

[Hoffmann & Reicherter (2012)] Hoffmann, G. and Reicherter, K.; Soft-sediment deformation of Late Pleistocene sediments along the southwestern coast of the Baltic Sea (NE Germany); International Journal of Earth Sciences; Springer Science and Business Media LLC; 2011; 101; 1; pp. 351–363.

[Hoogestraat (2019)] Dieter Hidde Hoogestraat; Auswertung von Zeitreihen stabiler Streupunkte (persistent scatterer) aus InSAR-Satellitenaufnahmen hinsichtlich Bodenbewegungen im Raum Hamburg und Schleswig-Holstein, Bachelorarbeit an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2019.

[Leydecker (2011)] Leydecker, G., Erdbebenkatalog fuer Deutschland mit Randgebieten fuer die Jahre 800 - 2008 (Earthquake catalogue for Germany and adjacent areas for the years 800 to 2008). – Geol. Jb., E 59; 198 S., 12 Abb., 5 Tab., 9 Anh., 1 CD; BGR Hannover; Vertrieb: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart

[Meier & Omlin (2015)] Meier, T. und Omlin, A.; Wellenformkatalog für seismische Ereignisse in Schleswig-Holstein und Umgebung; 2014

[Meier & Omlin (2017)] Meier, T. und Omlin, A.; Bericht über die Kooperation 2016 zur Seismizität in Schleswig-Holstein

[Meier & Omlin (2018)] Meier, T. und Omlin, A.; Bericht zur Kooperation 2017 - Verdichtung und Qualitätskontrolle des Stationsnetzes in Schleswig-Holstein

[Ortmann (2020)] Ortmann, A. K., Private Wetterstation Bad Segeberg <http://wetterstation-badsegeberg.de/>, zugegriffen am 14.01.2020

[Peterson (1993)] Peterson, J.: Observations and Modeling of Seismic Background Noise, U.S. Geological Survey open-file report 93-322, Albuquerque, N.M., 1993, <https://doi.org/10.3133/ofr93322>

[Pyrocko] Heimann, S.; Kriegerowski, M.; Isken, M.; Cesca, S.; Daout, S.; Grigoli, F.; Juretzek, C.; Megies, T.; Nooshiri, N.; Steinberg, A.; Sudhaus, H.; Vasyura-Bathke, H.; Willey, T.; Dahm, T. (2017): Pyrocko - An open-source seismology toolbox and library. V. 0.3. GFZ Data Services. [http://doi.org/10.5880/GFZ.2.1.2017.001](https://doi.org/10.5880/GFZ.2.1.2017.001)

[Seiscomp3] SeisComP is a seismological software for data acquisition, processing, distribution and interactive analysis that has been developed by [GEOFON] and gempa GmbH. <https://www.seiscomp3.org>

[Voss et al. (2009)] Voss, P. H. and Larsen, T. B. and Ottemoller, L. and Gregersen, S.; Earthquake in southern Sweden wakes up Denmark on 16 December 2008; Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin; 2009; 17; pp. 9–12.

[Wei et al. (2016)] Liu Wei, Li Yiping, Yang Chunhe, Jiang Deyi, J. J. K. Daemen, Chen Jie und Kong Junfeng; A new method of surface subsidence prediction for natural gas storage cavern in bedded rock salts, Environ Earth Sci (2016) 75:800, 2016, doi: 10.1007/s12665-016-5611-8.

[Weidle et al. (2019)] Weidle, C., Sudhaus, H., Meier, T. und Omlin, A.; Bericht zur Kooperation 2018 - Status der Erdbebenüberwachung für Schleswig-Holstein und Umgebung - erste Ergebnisse des seismischen Netzes bei Bad Segeberg

Abbildungsverzeichnis

1	Übersichtskarte der Permanent-Seismometer in Schleswig-Holstein und ausgewählter Stationen in der Umgebung.	4
2	(links) Außenansicht des Gutshauses auf Gut Birkenmoor. Das Seismometer ist im vorderen Bereich im Keller installiert. (rechts) Standort des Seismometers in einem abgelegenen Kellerraum.	5
3	Spektrale Leistungsdichte an der Station Birkenmoor.	5
4	Spektrale Leistungsdichte der Vertikalkomponente im Jahr 2019 an den GRSN Stationen in Schleswig-Holstein. Abbildungen von K. Stammler (BGR).	7
5	Spektrale Leistungsdichte der Vertikalkomponente im Jahr 2019 an benachbarten GRSN Stationen Hamburg, Zarrentin, Garlstedt, Rügen und Löcknitz. Abbildungen von K. Stammler (BGR).	7
6	Übersicht seismischer Stationen in Norddeutschland. Permanentstationen (kreisförmige Marker) in SH und MV [dunkelgrün], in NDS und HH [hellgrün], GEOFON Station Rügen [orange], geplant in MV ["?"]; vom IfG betriebene temporäre Stationen (Marker) des Bad Segeberg Netzes und Helgoland-Arrays [orange] und einzelne, temporäre Stationen in SH und MV [blau]. Karte: Google Maps.	9
7	Verteilung aller in 2019 am IfG im [Seiscomp3]-System detektierten Ereignisse. Der überwiegende Anteil sind global verteilte Ereignisse mit Magnituden > 4.5 , welche vollautomatisch vom System prozessiert wurden.	11
8	Ereignisse um Schleswig-Holstein im Jahr 2019, Quelle: [EMSC].	12
9	Übersichtskarte der in 2019 am IfG detektierten und manuell nachbearbeiteten Ereignisse in Schleswig-Holstein und Umgebung.	13
10	Meteor über SH, aufgezeichnet am 12. September 2019 gegen 14.55 Uhr MESZ an den seismischen Stationen auf Helgoland und um Bad Segeberg. Darstellung mit [Pyrocko].	15
11	Verteilung der Detektionen des STA/LTA Detektors über zwei Jahre	19
12	Wellenformbeispiele in den Ereignisschwärmen	19
13	Methodenvergleich: Anzahl der Ereignisse in den Schwärmen	20
14	Zeitliches Auftreten der Ereignisse in den Schwärmen	21
15	Amplituden der Ereignisse in den Schwärmen	22
16	Länge der Ereignisse in den Schwärmen	22
17	Ähnlichkeitsanalyse der Ereignisschwärme	23
18	Beispielhaftes Spectrogramm für ein Ereignis des Schwarms. Dargestellt ist das Spectrogramm für die Vertikalkomponente an der Station BSEA1. Die Wellenform dieses Ereignisses ist in Abbildung 12a gezeigt.	24
19	Vergleich zwischen Tagesmitteltemperatur von Bad Segeberg und der Anzahl der Detektionen über jeweils 5 Tage.	25

20	Ausschnitt aus Abbildung 19. Vergleich zwischen Tagesmitteltemperatur 5 cm über dem Boden gegen die Anzahl der Detektionen über 3 Tage im Zeitraum der beiden Ereignisschwärme Anfang Februar und Anfang März 2018.	25
21	Vergleich historischer Erdbebenkataloge bis einschliesslich 1899	28
22	Vergleich historischer Erdbebenkataloge bis einschliesslich 1959	29
23	Vergleich historischer Erdbebenkataloge bis einschliesslich 1979	30
24	Vergleich historischer Erdbebenkataloge bis einschliesslich 1989	30
25	Vergleich historischer Erdbebenkataloge bis einschliesslich 1999	30
26	Festpunkte der Landesvermessung Schleswig-Holstein mit mindestens einer Wiederholungsmessung. Die Farbkodierung gibt das Jahr der ersten Messung an.	34
27	Festpunkte der Landesvermessung Schleswig-Holstein mit mindestens einer Wiederholungsmessung. Die Farbkodierung gibt das Jahr der zweiten Messung an.	34
28	Festpunkte der Landesvermessung Schleswig-Holstein mit mindestens einer Wiederholungsmessung. Die Farbkodierung gibt die Zeitspanne zwischen den Wiederholungsmessungen an.	35
29	Aus Nivellementdaten mit sehr unterschiedlichen Messbedingungen abgeleitete vertikale Bodenbewegungsgeschwindigkeiten über SH	36
30	Abgeleitete Bodenbewegungsgeschwindigkeiten aus Nivellementdaten von jeweils homogenen Messkampagnen über Bad Segeberg	37
31	Vergleich der Verteilungen von Verschiebungsraten pro Track	39
32	Aufnahmetage der ERS-Daten	40
33	Unverbundene Zeitreihe	41
34	Beispiel einer Korrelation zwischen Kohärenz und RMSE der Zeitreihen . .	41
35	Korrelation zwischen Kohärenz und RMSE nach Bereinigung	42
36	Gesamtdarstellung Streupunkte	42
37	Verschiebungsraten entlang der Elbmarschen	43
38	Gipstreiben am Kalkberg in Bad Segeberg	44
39	Subsidenz Tollerort, Brunsbüttel, Brockdorf	44
40	Lübecks Altstadt in ERS- und Sentinel-Daten	45
41	Verschiebungsraten, unkalibriert, in den AOI Bad Segeberg und HH Groß Flottbek	48
42	Verschiebungsraten, unkalibriert, in den AOI Eutin und Leck	49
43	Histogramme der Mean_Velo Werte der beiden Stapel 044_01 und 117_01, für 117_01 eingeschränkt auf die Ausdehnung von 044_01	50
44	AOI Bad Segeberg, Zeitreihen der möglichen lokalen Referenzpunkte im Stapel 117_01	50
45	Zeitreihe des DLR Referenzpunkts für Stapel 044_01	51
46	Kalibrierungsergebnisse über den AOIs Bad Segeberg und Gross Flottbeck .	52

47	Kalibrierungsergebnisse über den AOIs Eutin und Leck.	53
48	Histogramme der Bodenbewegungen nach den Kalibrierungen	54
49	Zeitreihe eines Rückstreuers im AOI Gross Flottbek, Stapel 044_01	55
50	Zeitreihe eines Rückstreuers im AOI Eutin, Stapel 117_01	55
51	Zeitreihen zweier Rückstreuer im AOI Bad Segeberg, Stapel 044_01	55
52	Profillage über Bad Segeberg. Beispiel Track 44	57
53	Gemittelte und referenzierte line-of-sight Geschwindigkeiten (Referenzpunkt bei etwa 0,6 km) entlang der ONO-WSW Profile (Abb. 37) von drei Tracks (aufsteigend: Track 44, 117, absteigend BBD TL1). Die graue Linie zeigt die gemittelte Höhe der Scatterer.	58
54	Grafische Darstellung der Vektorzerlegung von line-of-sight nach Ost und vertikal.	59
55	Vertikale Komponente der Geschwindigkeiten.	60
56	Ost-Komponente der Geschwindigkeiten.	60
57	Mittlere Bodenbewegungen in der Nähe einer Gasspeicher-Kaverne in Kiel-Rönne	61
58	Mittlere Geschwindigkeiten des Nord-Süd-Profil (Abb. 57)	62
59	Zeitreihen einzelner Scatterer auf dem Kavernengelände bei Kiel-Rönne	62
60	Amplitude und Phase der saisonalen Variationen als Funktion des Abstandes zur Kaverne entlang des Profils (Abb. 57)	63
61	Profilübersicht der Schnitt entlang von Störungszonen	64
62	Bodenbewegungsprofil 1 über Flensburg mit zugehörigem Profilschnitt	66
63	Bodenbewegungsprofil 2 über Flensburg, nördliches Stadtgebiet mit zugehörigem Profiltiefenschnitt	67
64	Bodenbewegungsprofil 3 über Flensburg, südliches Stadtgebiet mit zugehörigem Profiltiefenschnitt	68
65	Bodenbewegungsprofil 4 über Tarp mit zugehörigem Profiltiefenschnitt	69
66	Bodenbewegungsprofil 5 über Schuby, Silberstedt, mit zugehörigem Profiltiefenschnitt	70

Tabellenverzeichnis

1	Signifikante Erdbeben im Jahr 2019 (EMSC)	12
2	Seismische Ereignisse in Schleswig-Holstein (BGR)	13
3	Seismische Ereignisse in Schleswig-Holstein und Umgebung (IfG)	16
3	Seismische Ereignisse in Schleswig-Holstein und Umgebung (IfG)	17
4	Einstellungen des STA/LTA Detektors	18
5	Anzahl der Detektionen mit den unterschiedlichen Methoden	20
6	Referenzpunkte mit Deformationsparametern	51