

Das Macroseismic Sensor Projekt

The Macroseismic Sensor Project



Ewald Brückl, Peter Carniel, Stefan Mert und Rita Meurers, Wien

Kurzfassung

Nehmen Menschen unerwartet Erschütterungen wahr, wollen sie rasch Auskunft über die Natur und Reichweite der Quelle sowie mögliche Gefährdungen und Schäden. Beschränkt auf das Erdbebengebiet des südlichen Wiener Beckens tragen die Daten des Macroseismic Sensor (MSS) Netzes und deren Nahe-Echtzeit Visualisierung im Internet zur raschen Beantwortung dieser Fragen bei. Die aktuelle seismische Aktivität an den einzelnen Stationen kann auf der MSS-Homepage über Symbole auf einer Karte und ausgewählte Zeitreihen mitverfolgt werden. Möglicherweise fühlbare seismische Ereignisse werden als solche erkannt und archiviert. Unterschiedliche Visualisierungen sind innerhalb einer Minute verfügbar und unterstützen die Klassifizierung dieser Ereignisse als Erdbeben, Steinbruchsprengung oder zufälliges, raumzeitliches Zusammentreffen lokaler Erschütterungen. Der Zusammenhang zwischen den Daten des MSS-Netzes und makroseismisch, auf der Basis von Wahrnehmungsberichten ermittelten Intensitäten (EMS-98) stellt ein zentrales Thema des Projektes dar. Die Messdaten der Bebenserie im südlichen Wiener Becken im Frühjahr 2021 erweitern und festigen diesen Zusammenhang. Weiter modellieren wir die Abhängigkeit von seismischen Amplituden und Laufzeiten von der Entfernung zum Erdbebenherd, lokalisieren Erdbeben auf der Basis dieser Beziehungen und berechnen als Quellstärke die Magnitude MSS_M . Letztere ist mit der Magnitude M_L des Österreichischen Erdbebendienstes an der ZAMG hoch korreliert. Die Lokalisierungen über Laufzeiten sind hinsichtlich ihrer Genauigkeit vergleichbar mit den Lokalisierungen durch die ZAMG. Messdaten und Magnituden von Steinbruchsprengungen haben sowohl bei Anrainer*innen als auch Steinbruchbetreibern Beachtung gefunden. Schwinggeschwindigkeiten an Gebäuden interessieren besonders deren Bewohner*innen, die Kenntnis der Magnitude unterstützt den Steinbruchbetreiber bei der Optimierung eines Sprengschemas hinsichtlich Erschütterungen.

Schlüsselwörter: Frei zugängliches seismisches Netzwerk, Nahe-Echtzeit Visualisierung der Bodenbewegung, PGV-Spitzenbodengeschwindigkeit, makroseismische Intensität, Erdbeben Lokalisierung, Sprengerschütterungen

Abstract

People sensing unexpected ground shaking want swift information about the nature of the source, the extent of the shaking, and about potential damage and hazards. A low-cost seismic sensor network, the Macroseismic Sensor (MSS) network has been established in the southern Vienna basin area with the objective to meet this demand. Network data and near-realtime visualizations accessible in the internet provide a quick response to people left curious or insecure by the ground shaking. The actual ground motions at MSS stations are visualized by station markers on a map, and the ground velocity time series recorded at selected MSS stations from the past 10 minutes may be displayed. Seismic events (e.g. earthquakes or quarry blasts) actually or possibly felt in the area of the MSS network are detected and the relevant data is archived. Different modes of visualization of these events are available within one minute and support the classification of the event as an earthquake, a quarry blast or as a random coincidence of very local disturbances. The relationship between MSS data and macroseismic intensities (EMS-98) derived from reports about felt ground motions and their effects poses a central scientific goal of the MSS project. An exceptionally dense and strong earthquake series occurred in the southern Vienna basin during spring of 2021. This data consolidated and extended the above mentioned relationship significantly. We also modelled the dependence of seismic amplitudes and travel times on hypocentral distances and localized earthquakes in the spring 2021 series, implementing these models. An additional outcome of the localizations based on amplitudes is the magnitude MSS_M , which is linearly dependent on and highly correlated with M_L , the local magnitude determined by the Seismological Service of Austria at ZAMG. The localization accuracy using the MSS travel time data is at the level of the ZAMG localizations. Quarry operators as well as residents in buildings near a quarry developed interest in the MSS project, where the seismic load on their buildings is most relevant for the nearby residents. Quarry operators use the magnitude MSS_M to optimize the blasting pattern with regards to seismic emissions.

Keywords: Public domain seismic network, near real-time ground motion visualization, PGV-peak ground velocity, macroseismic intensity, earthquake localization, blast vibrations

1. Einleitung

Gefühlte Erschütterungen, sei dies in Gebäuden oder im freien Gelände, erregen die Aufmerksamkeit der meisten Menschen und bewirken bei stärkeren Ereignissen häufig Angst und Panik. Die wahrnehmende Person könnte sich oder andere fragen:

- Ich habe etwas gespürt – was war das?
- Handelt es sich um ein Erdbeben oder hat eine andere Quelle die Erschütterungen verursacht?
- Von wo gingen die Erschütterungen aus und wie weit waren diese fühlbar?
- Wurden Menschen gefährdet, gab es Sachschäden?

Inhaltlich sehr ähnliche, wenn auch fachlich präziser formulierte Fragen stellen sich bei entsprechenden Ereignissen Bürgermeister*innen, Zivilschutzbeauftragte und das diensthabende Personal der Feuerwehr oder einer Landeswarnzentrale. Erste Ansprechstelle ist traditionell der Erdbebendienst der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG). Die Lage des Epizentrums, Magnitude und zu erwartende Intensitäten werden rasch an die für den Katastrophenschutz verantwortlichen Stellen weitergeleitet. Von den Erschütterungen betroffene Personen können ihre Wahrnehmungen über eine Handy-App oder ein online Formular im Internet an den Erdbebendienst weiterleiten.

Im vorliegenden Beitrag stellen wir ein Projekt vor, das auf eine zur Methodik des traditionellen Erdbebendienstes komplementäre Weise zur Beantwortung der oben genannten Fragen in Nahe-Echtzeit beiträgt. Die Grundlage bildet ein seismisches low-cost Sensor Netz im südlichen Wiener Becken, dessen Daten in einer intuitiv verständlichen Weise aufbereitet, visualisiert und im Internet öffentlich zugänglich gemacht werden. Wir wollen auch zeigen, welche Informationen die weitergehende seismologische Bearbeitung der Daten dieses Netzes liefern kann. Über dieses Projekt haben die Autoren bereits im Open Access zugänglichen Kapitel „Seismological Data Acquisition and Analysis within the Scope of Citizen Science“ (<https://www.intechopen.com/chapters/74466>) [1] ausführlich berichtet. Wir verzichten daher hier auf eine detaillierte Beschreibung der angewandten Methoden.

Im Frühjahr 2021 fand im südlichen Wiener Becken eine ungewöhnlich intensive Serie fühlbarer Erdbeben statt. Die dabei gewonnenen neuen Da-

ten geben uns eine ausgezeichnete Gelegenheit, Möglichkeiten und Leistungsfähigkeit der gewählten Methodik zu testen.

2. Macroseismic Sensor

Fachkollegen haben uns darauf aufmerksam gemacht, dass der Begriff „Macroseismic Sensor“ einen Widerspruch in sich selbst darstellt. Makroseismik wird jener Bereich der Seismologie genannt, der das Phänomen Erdbeben ausschließlich auf der Basis von Wahrnehmungen und Beobachtungen mit den menschlichen Sinnen beschreibt und analysiert. Die Einführung von Sensoren, insbesondere Seismometern oder Seismographen hingegen führte zur Entwicklung der Instrumentellen Seismologie. Messgeräte und damit erfasste Daten wären demgemäß dieser Disziplin zuzuordnen. Wir bleiben aber beim Begriff „Macroseismic Sensor“, da wir die instrumentell gewonnenen Daten eng mit makroseismischen Daten in Bezug bringen. Im Gegensatz zur Standortwahl für seismische Observatorien positionieren wir Macroseismic Sensoren nahe empfindlicher Infrastruktur und dort, wo sich Menschen als potentielle Beobachter aufhalten. Diese Standortwahl ergibt eine wesentlich höhere seismische Bodenunruhe, als sie für seismische Observatorien akzeptabel ist. Der Einsatz von low-cost Sensoren anstelle von höchst empfindlichen und teuren Seismometern erscheint daher für unsere Zielsetzung gerechtfertigt.

Die Entwicklung des Macroseismic Sensors (im Weiteren MSS) begann im Rahmen des Sparkling Science Projektes „Schools & Quakes“ [2] und des zusätzlichen Citizen Science Moduls „QuakeWatch Austria“ [3]. Lehrer und Schüler des TGM (HTBLuVA Technologisches Gewerbemuseum, Wien) und der HTBLuVA Wiener Neustadt waren und sind zum Teil auch aktuell in die Entwicklung und Fertigung der Geräte involviert. Wir konnten hierbei auf den Erfahrungen der Quake-Catcher Network und Raspberry Shake Projekte [4, 5] aufbauen. Die wesentlichen MSS Komponenten sind zwei orthogonal orientierte Horizontalgeophone, zwei 16bit Analog-Digital Wandler (ADC) und ein Raspberry Pi Einplatinen-Computer (SBC). Diese Komponenten sind in einem robusten Gehäuse untergebracht und werden mit einer einzigen Schraube an einer tragenden Wand befestigt (Abbildung 1). Der SBC steuert die ADCs, formatiert die Daten und stellt die Verbindung zum Internet her. In Abhängigkeit von der programmierbaren Vorverstärkung reicht die Auflösung (LSB) des



Abb. 1: Macroseismic Sensor montiert im Bauamt Bruck an der Leitha (BRUK), gemeinsam mit örtlichen Kontaktpersonen

MSS von $0.28 \mu\text{m/s/count}$ bis $2.24 \mu\text{m/s/count}$. Der Frequenzgang des MSS ist zu niedrigeren Frequenzen hin durch die Eigenfrequenz (4.5 Hz) und kritische Dämpfung der Geophone, nach oben hin durch ein RC-Tiefpass-Filter mit einer Grenzfrequenz von 12.5 Hz bestimmt. Die zeitliche Synchronisierung wird über Network Time Protocol (NTP) sichergestellt. Die seismischen Daten werden im MSEED Format mit 100 Hz Abtastrate, annähernd im 10 s Intervall an den MSS-Server gesandt.

3. MSS-Netz

Das MSS-Netz befindet sich im südlichen Wiener Becken und seiner näheren Umgebung. Dieses Gebiet zählt zu einer Zone relativ hoher Seismizität in Österreich. In Verbindung mit der dichten Bevölkerung und Industrialisierung ergibt sich ein für Menschen und Infrastruktur relevantes seismisches Risiko. Der Grund für die seismische Aktivität ist in der speziellen tektonischen Situation des Wiener Beckens am Ostrand der Alpen zu finden. Das Becken entstand durch die laterale Extrusion des östlichsten Teils der Ostalpen während des Miozäns, verursacht durch die Öffnung des pannonischen Raums innerhalb des Karpatenbogens. Das Becken erreicht eine maximale Tiefe von 6 km und ist von ostalpinem Kristallin, den Nördlichen Kalkalpen und Flysch umgeben. Die Wiener Becken Störung (Vienna Basin Transfer Fault, VBTF) ist die Fortsetzung der Mur-Mürztal-Störung (MMF) und bildet als links-drehende Seitenverschiebung die süd-östliche Grenze des

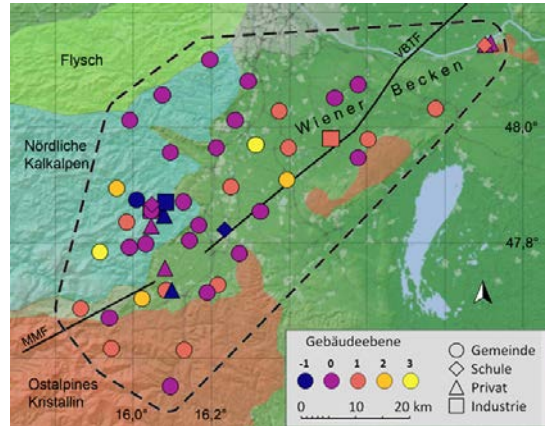


Abb. 2: Projektgebiet südliches Wiener Becken mit geologischen Einheiten, tektonischen Störungen (MMF ... Mur-Mürztal Fault, VBTF ... Vienna Basin Transfer Fault) und Lage der MSS-Stationen (Signatur entsprechend Gebäudeart und Stockwerk)

Beckens [6, 7]. Sie ist noch immer aktiv [8] und stellt den dominierenden, zu Erdbeben in dieser Region führenden Prozess dar.

Der bis 1200 AD zurückreichende Erdbebenkatalog der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik [9] weist in der Region des südlichen Wiener Beckens ungefähr 500 Erdbeben als gefühlte Erdbeben aus, die entsprechend der Europäischen Makroseismischen Skala EMS-98 klassifiziert sind. Die höchsten Intensitäten wurden für die Beben in Schwadorf (VIII, 8. Oktober 1927) und Seebenstein (VII-VIII, 16. April 1972) bestimmt.

Der Aufbau des MSS-Stationsnetzes begann im Jahr 2017 im Umfeld des Steinbruchs Dürnbach / Hohe Wand. Die Auswahl der Stationen fand wesentliche Unterstützung durch den Niederösterreichischen Zivilschutzverband, Bürgermeister*innen und Gemeindebedienstete, Lehrer und Schüler der HTL Wiener Neustadt, Industriebetriebe und Privatpersonen. Bis Ende September 2021 konnten 51 MSS-Stationen in Gemeindeämtern, Schulen, Privathäusern und Industriegebäuden installiert und in Betrieb genommen werden (Abbildung 2). Die MSS wurden nahezu ausschließlich an tragenden Wänden montiert. Grundsätzlich wurde auch versucht, dafür geeignete Orte im Keller, Parterre oder ersten Stock zu finden. An jeder MSS-Station haben wir zumindest eine Ansprechperson, die uns im Fall eines anhaltenden Datenausfalls bei der Fehlerbehebung unterstützt.

4. Seismologische Daten und deren Visualisierung

Zeitreihen der Schwinggeschwindigkeiten im MiniSEED Format, Abtastrate 100 Hz, sowie die Geometrie des MSS-Netzes (Länge, Breite und Höhe der MSS-Stationen, WGS84) sind am Server des MSS-Projektes gespeichert. Abbildung 3 zeigt beispielhaft den Datensatz des Erdbebens von Breitenau, 30. März 2021 16:25 UTC.

Diese Daten bilden die Grundlage der weiteren seismologischen Analyse, sei es mit hoch entwickelten Programmen wie sie von seismologischen Diensten verwendet werden (z.B. Antelope [10]), kostenfrei verfügbaren Programmen (SeisGram [11], NonLinLoc [12]) oder eigenen Entwicklungen (z.B. unter Python+Obspy [13]). Die unter den Kapiteln 6, 7 und 8 beschriebenen Ergebnisse wurden auf dem letztgenannten Weg erzielt.

Den erfahrenen Seismologinnen und Seismologen des Erdbebendienstes ermöglicht bereits der Blick auf ein Seismogramm eine erste Information über die Distanz zur Quelle, sowie deren Art und Stärke. Interessierten Bürger*innen oder in Politik und öffentlichem Dienst tätigen Personen mögen Seismogramme ebenfalls interessant erscheinen, es ist ihnen aber kaum möglich daraus relevante Informationen zu gewinnen. Wir sehen es daher als ein zentrales Ziel des MSS-Projektes, seismologische Daten in Nahe-Echtzeit so zu bearbeiten und zu visualisieren, dass auch ohne seismologische Vorbildung naheliegende Fragen beantwortet werden können. Mit der Einrichtung der MSS-Homepage [<https://www.macroseismic-sensor.at/>] wird versucht diesem Ziel möglichst nahe zu kommen.

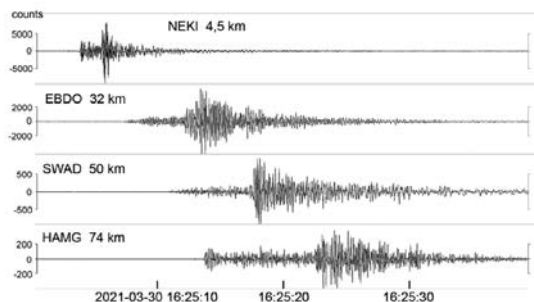


Abb. 3: Seismogramme des Erdbebens von Breitenau, 2021-03-30T16:25 UTC, aufgenommen mit MSS an den Stationen NEKI (Neunkirchen), EBDO (Ebreichsdorf), SWAD (Schwadorf) und HAMG (Hainburg); Darstellung mit SeisGram [11], beide Horizontal-Komponenten übereinander dargestellt, Kilometerangabe entspricht dem Abstand zum Epizentrum, 1 count entspricht $0.56 \mu\text{m/s}$ Schwinggeschwindigkeit

Entsprechend der engen Verbindung des MSS-Projektes zur Makroseismik beschränken wir uns auf seismische Ereignisse, die möglicherweise oder tatsächlich im Gebiet des MSS-Stationsnetzes fühlbar sind. Im Sinne dieser Zielsetzung betrachten wir zunächst nur die Amplituden der seismischen Wellen. Wir verwenden die Peak-Ground-Velocity (PGV) als eine, in der Seismologie zur Bewertung von Schwingungsbelastungen durch Erdbebenwellen eingeführte Größe, wobei wir folgende Unterscheidungen treffen:

PGV	maximale, horizontale Schwinggeschwindigkeit über das Zeitintervall 1 s,
PGV_60	maximale, horizontale Schwinggeschwindigkeit über das Zeitintervall 60 s,
PGV_event	maximale, horizontale Schwinggeschwindigkeit über die Dauer eines seismischen Ereignisses.

Wir beschränken uns bei der Beschreibung der Funktionalität der MSS-Homepage auf einen Überblick. Eine eingehende Beschreibung der vielfältigen Optionen kann auf der MSS-Homepage unter dem Menüpunkt „DOKU“ aufgerufen werden.

4.1 Monitoring der aktuellen seismischen Aktivität

Die aktuelle seismische Aktivität wird auf einer, das MSS-Netz überdeckenden Karte dargestellt (Abbildung 4). Kartographische Darstellungen mit unterschiedlicher Thematik können gewählt und interessante Teilbereiche interaktiv vergrößert werden. Der aktuelle Wert von PGV wird an den MSS-Stationen durch Farbe und Größe der Symbole sichtbar gemacht. Eine erste Information über den zeitlichen Verlauf liefert der Wert PGV_60, der als Symbol mit identischer Kodierung transparent unterlegt ist. Damit lässt sich sehr schnell beurteilen, ob innerhalb dieser 60 Sekunden ein Ereignis stattfand, das auf mehreren Stationen des Netzwerks einen hohen PGV-Wert hervorrief. Der Name einer Station, sowie deren PGV und PGV_60 Werte können mit dem Cursor abgefragt werden.

Erscheint die seismische Aktivität an einer oder mehreren Stationen von besonderem Interesse, können die entsprechenden PGV-Zeitreihen der letzten 10 Minuten aufgerufen werden. Verstärkte Bodenunruhe an einer Station, sei sie nun stochastisch, an- und abschwellend oder langanhaltend

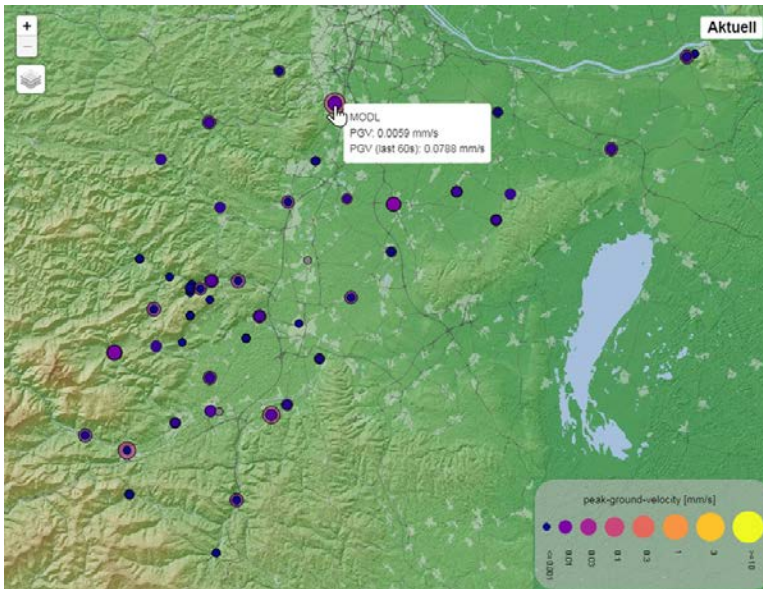


Abb. 4: Kartographische Darstellung der aktuellen seismischen Aktivität mittels Stationssymbolen; Abfrage von PGV und PGV_60 an der Station MODL (Mödling)

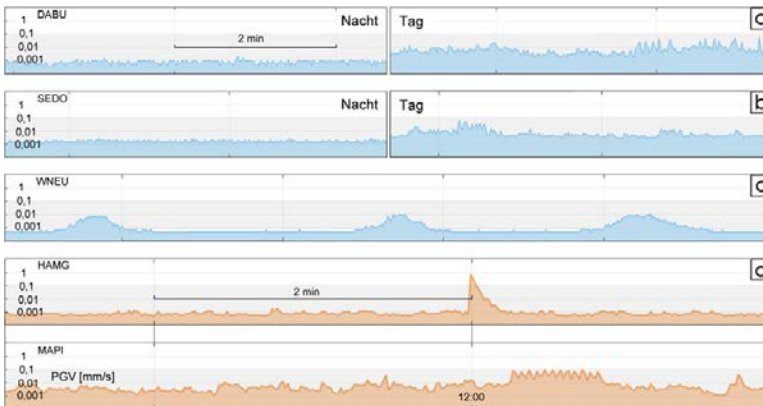


Abb. 5: Zeitreihen von PGV; a) Vergleich von Nacht zu Tag am Schulstandort DABU (Bad Deutsch-Altenburg), b) Vergleich von Nacht zu Tag am Industriestandort SEDO (Seibersdorf), c) nächtlicher Zugverkehr WNEU (HTL Wiener Neustadt), d) Koinzidenz zweier Ereignisse: Sprengung im Steinbruch Pfaffenberg registriert an Station HAMG (Hainburg) und 12 Uhr Läuten der Pfarrkirche in Markt Piesting, registriert an Station MAPI (Gemeindeamt).

tend, kann mit unterschiedlichen lokalen Quellen in Verbindung gebracht werden. Der Vergleich dieser Charakteristik zwischen Tag und Nacht, sowie Wochen- und Feiertag hilft Bürotätigkeit, Schulbetrieb, Verkehr, Bauarbeiten im Nahbereich oder industrielle Produktion als mögliche Quellen der Erschütterungen einzuschränken. Zeitlich vorher-sagbare Quellen bilden u.a. der an einen Fahrplan gebundene Zugverkehr, vom Steinbruchbetreiber

angekündigte Sprengungen, oder als Sonderfall das stündliche Läuten von Kirchenglocken (Abbildung 5).

4.2 Detektion seismischer Ereignisse

In der kartographischen Darstellung der aktuellen seismischen Aktivität reicht die Information über PGV an den MSS-Stationen maximal 60 Sekunden zurück. Die für einzelne Stationen aufrufbaren PGV-Zeitreihen überdecken die vergangenen 10 Minuten. Weiter zurückreichende Information über PGV ist im Modus Aktuell der MSS-Homepage nicht mehr zugänglich. Es besteht daher der naheliegende Wunsch, interessante seismische Ereignisse zu detektieren und deren Visualisierung zu einem späteren Zeitpunkt zugänglich zu machen. Entsprechend der Zielsetzung des MSS-Projektes fordern wir, dass die Detektion und Speicherung jedes potentiell im Bereich des MSS-Netzes fühlbaren Erdbebens gewährleistet ist.

Wie wir in Kapitel 5 zeigen werden, entspricht $PGV = 0.1 \text{ mm/s}$ etwa der Schwelle der Fühlbarkeit von seismisch bedingten Erschütterungen (entspricht dem Wechsel der Farbe der PGV-Zeitreihen von blau auf rosa in Abbildung 5).

Um die sichere Detektion aller, im Bereich des MSS-Netzes fühlbaren Erdbeben sicher zu stellen, muss der Grenzwert für die Detektion deutlich darunter, etwa bei $PGV = 0.01 \text{ mm/s}$ liegen. Wie die Beispiele der aktuellen seismischen Aktivität in Abbildung 5 zeigen, wird diese Schwelle aus den verschiedensten Gründen sehr häufig an einzelnen MSS-Stationen überschritten. Wesentlich seltener ist jedoch das gleichzeitige Auftreten von stärkerer seismischer Bodenunruhe an benach-

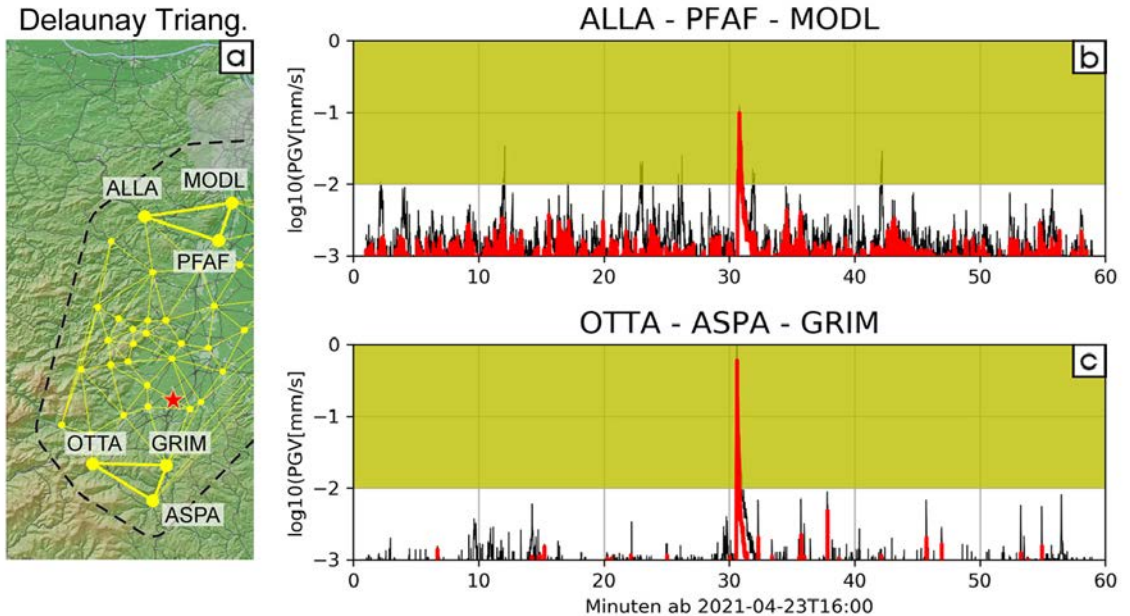


Abb. 6: Detektion eines seismischen Ereignisses (Erdbeben von Grafenbach, 23. April 2021); a) Delaunay Triangulierung des MSS-Netzes, Stern markiert Epizentrum; PGV und PGV_delaunay der Dreiecke b) ALLA-PFAF-MODL und c) OTTA-ASPА-GRIM. (schwarz ...PGV an den MSS-Stationen, rot ...PGV_delaunay).

barten MSS-Stationen. Wir machen uns diese Beobachtung zunutze, um einerseits die Detektion aller fühlbaren Erdbeben zu gewährleisten und auf der anderen Seite die Fehldetektionen, ausgelöst durch lokale Störgeräusche, möglichst gering zu halten.

Wir triangulieren das Netz der MSS-Stationen, fassen jeweils die drei, zu einem Delaunay Dreieck gehörenden Stationen zusammen und definieren „PGV_delaunay“ als das Minimum der drei PGV-Werte des Delaunay Dreiecks. Sobald PGV_delaunay den Grenzwert überschreitet, wird ein seismisches Ereignis definiert und die PGV-Zeitreihen aller MSS-Stationen diesem Ereignis zugeordnet. Entsprechend der Laufzeit seismischer Wellen über das MSS-Netz werden die Detektionen in anderen Delaunay Dreiecken ebenfalls zu diesem Ereignis gezählt und schließlich alle PGV-Zeitreihen inklusive einer Vorlaufzeit und einer nachfolgenden „listening time“ als Ereignis abgespeichert. Abbildung 6 veranschaulicht die Detektion des Erdbebens vom 23. April 2021 16:30 UTC über PGV_delaunay in den Dreiecken der Stationen OTTA – ASPA – GRIM und ALLA – PFAF – MODL. Während PGV an den stark durch lokale Erschütterungen gestörten Stationen PFAF und MODL etliche Male über der Detektionsschwelle von 0.01 mm/s liegt, überschreitet PGV_delaunay diesen Wert nur während des Erdbebens.

4.3 Klassifikation detektierter Ereignisse

Nach der Detektion eines seismischen Ereignisses sind die PGV-Zeitreihen aller MSS-Stationen für die Dauer des Ereignisses, sowie PGV_event auf der MSS-Homepage über den Ansichtsmodus „Archiv“ zugänglich. Im Falle eines Bebens, einer wahrgenommenen Sprengung oder eines fühlbaren seismischen Ereignisses – zunächst unbekannter Ursache – sollen öffentliche Stellen oder interessierte Personen rasch über den Herd, sowie die räumliche Ausdehnung und Intensität der Erschütterungen Auskunft erhalten. Die MSS-Homepage stellt folgende Varianten der Visualisierung von PGV_event und der PGV-Zeitreihe eines gesamten seismischen Ereignisses zur Verfügung:

- PGV_event: Stationsmarker gleich wie im Aktuell Modus
- PGV_event/SA: Farbcodierung der Voronoi-Zellen, die den MSS-Stationen zugeordnet sind
- PGV_event/SA: Konturlinien
- PGV-Zeitreihe: Animation des zeitlichen Verlaufs der Stationsmarker
- PGV/SA-Zeitreihe: Animation des zeitlichen Verlaufs der farbcodierten Voronoi-Zellen

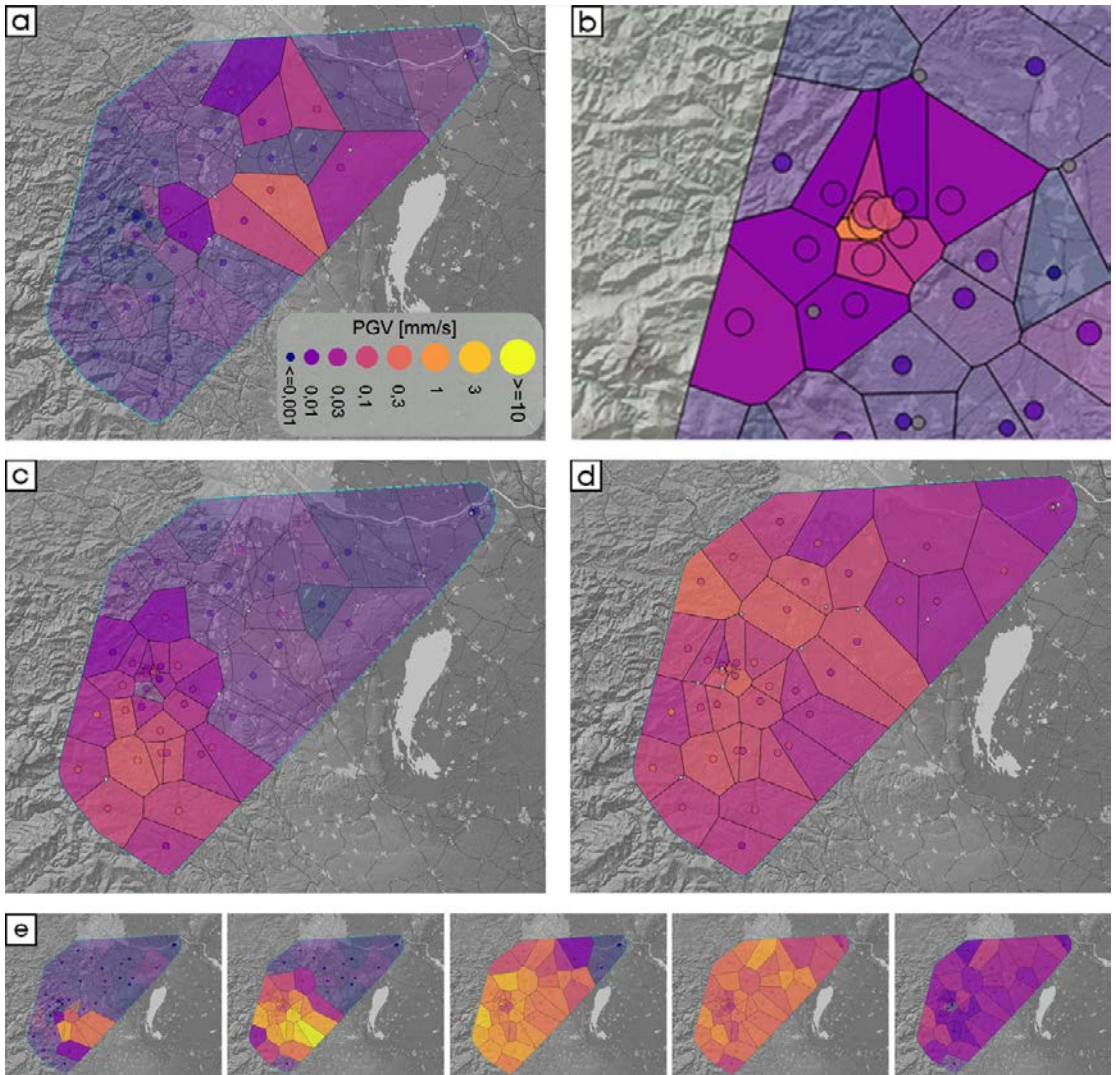


Abb. 7: Ereignisklassen seismischer Ereignisse, dargestellt über Stationsmarker und farbkodierte Voronoi-Zellen; a) zufällige Koinzidenz von lokal verstärkter Bodenunruhe; b) Steinbruchsprengung (Dürnbach, 2021-09-01 11:55 UTC); c) Erdbeben lokal (Gloggnitz, 2021-08-03 12:31 UTC); d) Erdbeben regional / fern (Admont, 2021-01-20 07:30 UTC); e) zeitlicher Verlauf eines lokalen Erdbebens (Breitenau, 2020-03-30 16:26 UTC)

Bei der Farbkodierung der Voronoi-Zellen und der Berechnung der Konturlinien korrigieren wir PGV_{event} mit dem Stationsverstärkungsfaktor SA. Die Bedeutung und Ermittlung von SA wird in Kapitel 6 im Zusammenhang mit der Modellierung der PGV-Herddistanz Beziehung besprochen. Bislang klassifizieren wir mit Hilfe der angebotenen Visualisierungen folgende Typen seismischer Ereignisse:

- zufällige Koinzidenz verstärkter lokaler Bodenunruhe

- Steinbruchsprengung (Dürnbach / Hohe Wand oder Pfaffenberg / Hundsheimer Berge)
- lokale Erdbeben (Epizentrum im Bereich des MSS-Netzes)
- Erdbeben regional / fern (Epizentrum außerhalb des MSS-Netzes)

Die Abbildungen 7a-d zeigen Beispiele für die genannten Ereignistypen in der Visualisierung durch Stationsmarker und Voronoi-Zellen. Die Verfolgung des zeitlichen Verlaufes (Abbildung 7e) kann die Klassifizierung sehr unterstützen. Wir

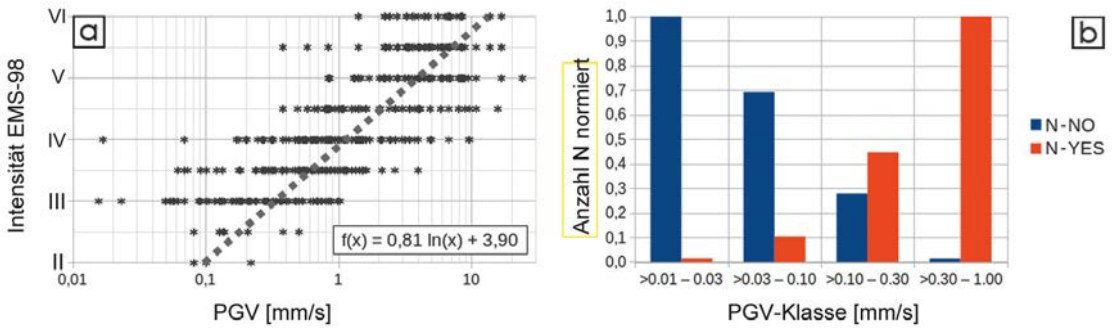


Abb. 8: Beziehung zwischen PGV und Intensität; a) Intensität EMS-98 über PGV (Abstand Intensität-Datenpunkt zu MSS-Station < 5 km); b) Festlegung der Fühlbarkeitsgrenze (Intensität II) über die Häufigkeit von Erdbeben mit Wahrnehmungsmeldung (N-YES) und dem Ausbleiben von Meldungen (N-NO) in PGV-Klassen

sind überzeugt, dass auch seismologisch nicht ausgebildete Personen rasch die Fähigkeit erlangen können, seismischen Ereignissen die genannten Typen zuzuordnen.

5. PGV und Intensität

In diesem und allen weiteren Kapiteln dieses Beitrags betrachten wir nur mehr PGV_event und verstehen unter PGV diesen Wert. Die Korrelation von PGV mit den aus Wahrnehmungsmeldungen nach EMS-98 ermittelten Intensitäten stellt ein zentrales Thema des MSS-Projektes dar. Die vielen einzelnen Meldungen werden bei der makroseismischen Bearbeitung zu einem einzigen Intensitätswert für die nächstliegende Gemeinde, einem sogenannten makroseismischen Datenpunkt, zusammengefasst und auf die Koordinaten des Gemeindeamtes bezogen. Wir erstellen PGV-Intensität Paare, wenn zu einem makroseismischen Datenpunkt im Umkreis von 5 km eine PGV-Messung einer MSS-Station vorliegt. Bisher wurden 647 Wertepaare für 19 Erdbeben im Bereich des MSS-Netzes, beginnend mit dem Erdbeben Schottwien, 17. Oktober 2017, $M_L = 3.0$ (M_L ...lokale Magnitude nach ZAMG) und abschließend mit dem Erdbeben Breitenau, 19. April 2021, $M_L = 4.4$ ermittelt.

Abbildung 8a zeigt ein Diagramm dieser Wertepaare. Es fällt auf, dass der Intensität III auch sehr niedrige PGV-Werte (bis herab zu $PGV = 0.05$ mm/s) zugeordnet wurden. Auf der anderen Seite wurde bei einigen Beben auch $PGV \sim 1$ mm/s gemessen, ohne dass es zu einer Wahrnehmungsmeldung kam. Zur Abschätzung der Fühlbarkeitsschwelle, bzw. von PGV bei der Intensität = II teilen wir PGV in 4 Klassen von $>0.01 - 0.03$ mm/s bis $>0.30 - 1.00$ mm/s. Wir

bestimmen für jede Klasse die Anzahl der PGV-Werte, bei denen es beim jeweiligen Erdbeben zu keinen Meldungen kam (N_NO) und jene, bei denen Meldungen vorliegen (N_YES). N_NO und N_YES sind in Abbildung 8b normiert auf das jeweilige Klassenmaximum dargestellt. Für die unteren beiden Klassen gilt $N_{NO} > N_{YES}$, für die beiden oberen $N_{YES} > N_{NO}$. Wir legen daher $PGV = 0.1$ mm/s als Fühlbarkeitsschwelle bzw. den Wert für Intensität = II fest. Die in Abbildung 8a eingetragene Trendlinie ist bei Intensität = II auf $PGV = 0.1$ mm/s fixiert.

Bei näherer Betrachtung von Abbildung 8a fällt auf, dass PGV von der Intensität V zur Intensität VI kaum bzw. nicht mehr ansteigt. Mit der Magnitude von Erdbeben verschiebt sich die obere Grenzfrequenz des Spektrums zu niedrigeren Werten. Es wäre daher zu prüfen, ob nicht die 4.5 Hz Eigenfrequenz der MSS-Geophone und die damit

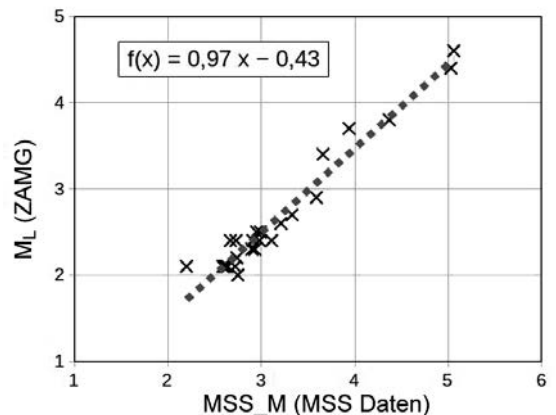


Abb. 9: Relation der Magnituden MSS_M (MSS Daten) zu M_L (ZAMG)

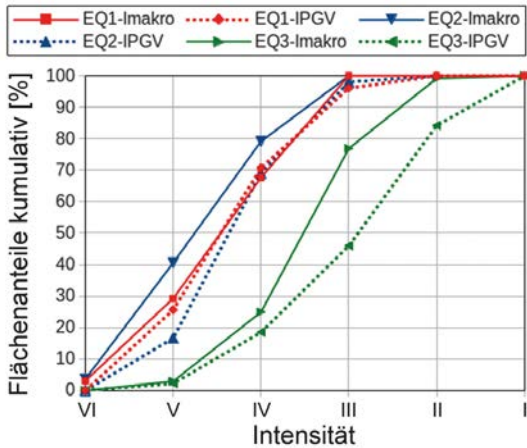


Abb. 11: kumulative Flächenanteile der Intensitäten I bis VI, ermittelt aus Makroseismik (Imakro) und MSS-Daten (IPGV) für EQ1, EQ2 und EQ3 (siehe Abbildung 10)

Wahrnehmungsmeldungen langen ebenfalls in diesem Zeitintervall an der ZAMG, der Landeswarnzentrale, oder Gemeindeämtern ein und können mit den über die MSS-Homepage bereitgestellten Informationen in Beziehung gebracht und möglicherweise besser bewertet werden.

6. Modellierung der Entfernungabhängigkeit von PGV und der P-Wellen Laufzeit Tp

Beginnend mit dem Erdbeben Schottwien, 17. Oktober 2017, bis zum Erdbeben Wiener Neustadt, 31. Mai 2021, wurde für insgesamt 90 Erdbeben mit dem Programm SeisGram und den 100 Hz Zeitreihen der Ereignisse interaktiv ein Datensatz für PGV und die P-Wellen Laufzeit Tp erstellt. Im Folgenden stellen wir eine sehr einfache, aber effektive Modellierung der Abhängigkeiten von PGV und Tp von der Hypozentraldistanz vor. Die Herdkoordinaten [Länge, Breite, Herdtiefe] entsprechen den Lokalisierungen der ZAMG [14].

PGV-Distanz Modell:

$$PGV_{e,i} = A0_e \cdot r_{e,i}^{expo} \cdot SA_i \tag{1}$$

$$\log 10(PGV_{e,i}) = \log 10(A0_e) + expo \cdot \log 10(r_{e,i}) + \log 10(SA_i) \tag{2}$$

Tp-Distanz Modell:

$$Tp_{e,i} = T0_e + 1/Vp \cdot r_{e,i} + SDp_i \tag{3}$$

PGV_{e,i} PGV des Erdbebens e, gemessen an der Station i

A0_e Quellstärke des Erdbebens e

r_{e,i} Hypozentraldistanz von Erdbeben e zu MSS-Station i

expo Exponent im PGV-Distanz Modell

SA_i Stationsverstärkungsfaktor der MSS-Station i

Tp_{e,i} P-Wellen Laufzeit von Hypozentrum e zu Station i

T0_e Herdzeit des Erdbebens e

Vp Longitudinalwellengeschwindigkeit

SDp_i lokale Verzögerung der P-Wellen Ankunft bei Station i

Der Berechnung von SA_i liegt als erster Schritt die Schätzung des Quotienten SA_{i1}/SA_{i2} mittels der aus Gl. (1) folgenden Gl. (4) zugrunde [15].

$$SA_{i1}/SA_{i2} = \text{MITTELWERT} (PGV_{e,i1}/PGV_{e,i2} \cdot (r_{e,i2}/r_{e,i1})^{expo}) \tag{4}$$

Die Indizes i1 und i2 überdecken dabei alle Kombinationen unter den MSS-Stationen. Die Bildung des Mittelwerts erfolgt über alle Erdbeben (Index e). Der Logarithmus von Gl. (4) bildet ein lineares Gleichungssystem, das unter der zusätzlichen Bedingung SUMME(log10(SA_i)) = 0 nach den einzelnen log10(SA_i) und damit auch SA_i aufgelöst werden kann. Die Berechnung von SDp_i erfolgt analog, entsprechend der formalen Ähnlichkeit von Gl. (2) und (3).

Weiter berechnen wir eine Magnitude MSS_M und die Herdzeit T0 für jedes Erdbeben nach den Gl. (5) und (6).

$$MSS_M_e = \text{MITTELWERT} (\log 10(PGV_{e,i}) - expo \cdot \log 10(r_{e,i}) - \log 10(SA_i)) \tag{5}$$

$$T0_e = \text{MITTELWERT} (Tp_{e,i} - 1/Vp \cdot r_{e,i} - SDp_i) \tag{6}$$

Die Einheiten in Gl. (5) sind [nm/s] für PGV und [°] für die Hypozentraldistanz r. Die Bildung des Mittelwerts erfolgt über den Index i.

Abbildung 12 zeigt die PGV- und Tp-Distanz-Daten sowie die entsprechenden Fehlerverteilungen bezogen auf die Modelle nach Gl. (2) und (3). PGV ist hierbei auf MSS_M = 3.0 und Tp auf T0 = 0 bezogen. Die durch die Anwendung der Korrekturen SA und SDp erzielbare Reduktion der Streuung gegenüber den Modellen wurde durch die Variation von expo und Vp erfasst. Als optimierte Werte wurden expo = -2.1 und Vp = 5800 m/s gewählt. Uneingeschränkt wäre dieser Methode der Vorzug zu geben, wenn die Epizentren der Erdbeben gleichmäßig über das gesamte MSS-

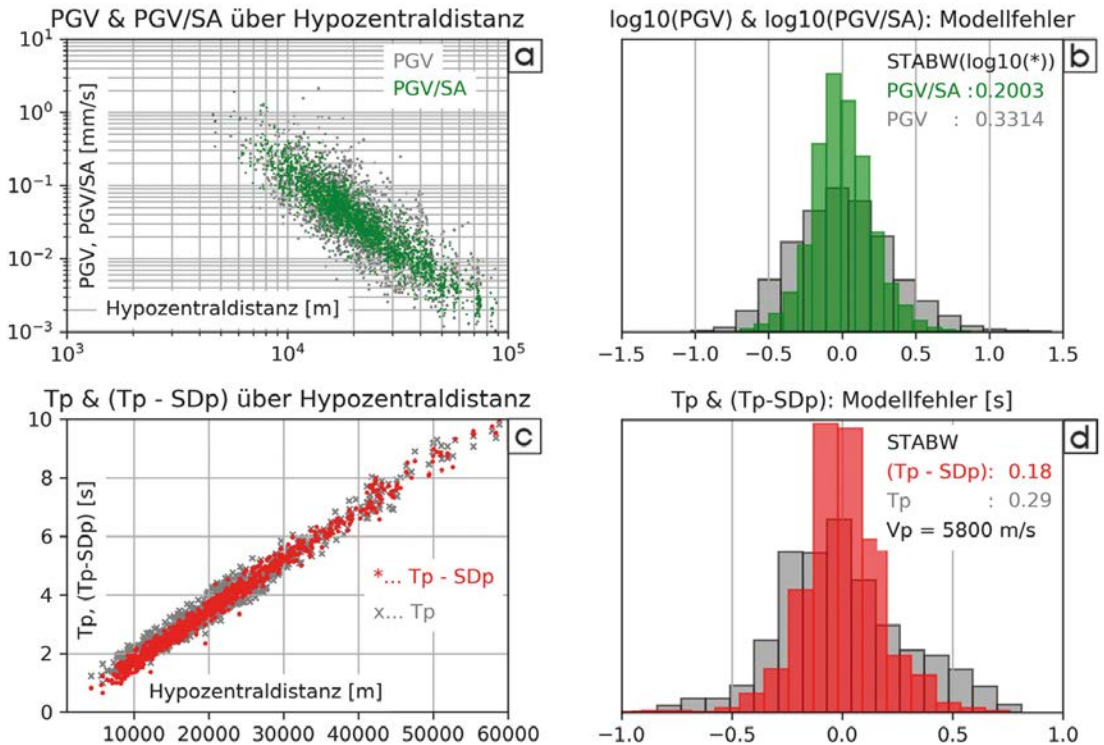


Abb. 12: PGV- und Tp-Modelle; a) PGV und PGV/SA über Herddistanz, c) Tp und (Tp - SDp) über Herddistanz; b) und d) Fehlerverteilungen zu a) und c)

Netz verteilt wären. Sind jedoch im extremen Fall alle Epizentren am selben Ort, könnten die Daten allein mit SA_i und SDp_i beschrieben werden, wobei $expo = 0$ und $Vp = \infty$ gesetzt werden kann. Aktuell häufen sich die Bebenherde in der südlichen Hälfte des MSS-Netzes. Bei der Festlegung der Parameter $expo$ und Vp fanden daher die Streuungen sowohl von PGV/SA und (Tp - SDp), als auch PGV und Tp um die jeweiligen Modellwerte Berücksichtigung.

7. Lokalisierung der Erdbebenserie März-April 2021 im südlichen Wiener Becken

In [1] haben wir zwei Methoden zur Lokalisierung von Erdbeben, basierend auf Amplituden und vier klassische, basierend auf den Laufzeiten der P- und S-Wellen, bzw. deren Laufzeitdifferenz vorgestellt. Die Nutzung der Amplituden erscheint für das MSS-Projekt besonders attraktiv, da diese Information einschließlich der für die Lokalisierung erforderlichen Geometrieinformation (Länge, Breite, Höhe der MSS-Stationen) und der Ver-

Datensatz	Name	Suche des Hypozentrums in 3D-Grid [k,l,m] als:	Referenz
PGV	Kanamori	MIN STABW($\log_{10}(A_{0,i})$)	[16]
PGV	Apollonius	MAX Superposition: Apollonius Kreise	[15]
Tp	Geiger	MIN STABW($T_{0,i}$)	[17]
Tp	Hyperbola	MAX Superposition: $(T_{p_i} - T_{p_j}) \cdot V_p$ Hyperbeln	[18]
Ts - Tp	Hopkins	MIN ABS($T_{0,i}$)	[19]
Ts - Tp	PS-Circle	MAX Superposition: $(T_{s_i} - T_{p_i}) \cdot V_{sp}$ Kreise	[20]

Tab. 1: Im Rahmen des MSS-Projektes realisierte Methoden der Lokalisierung

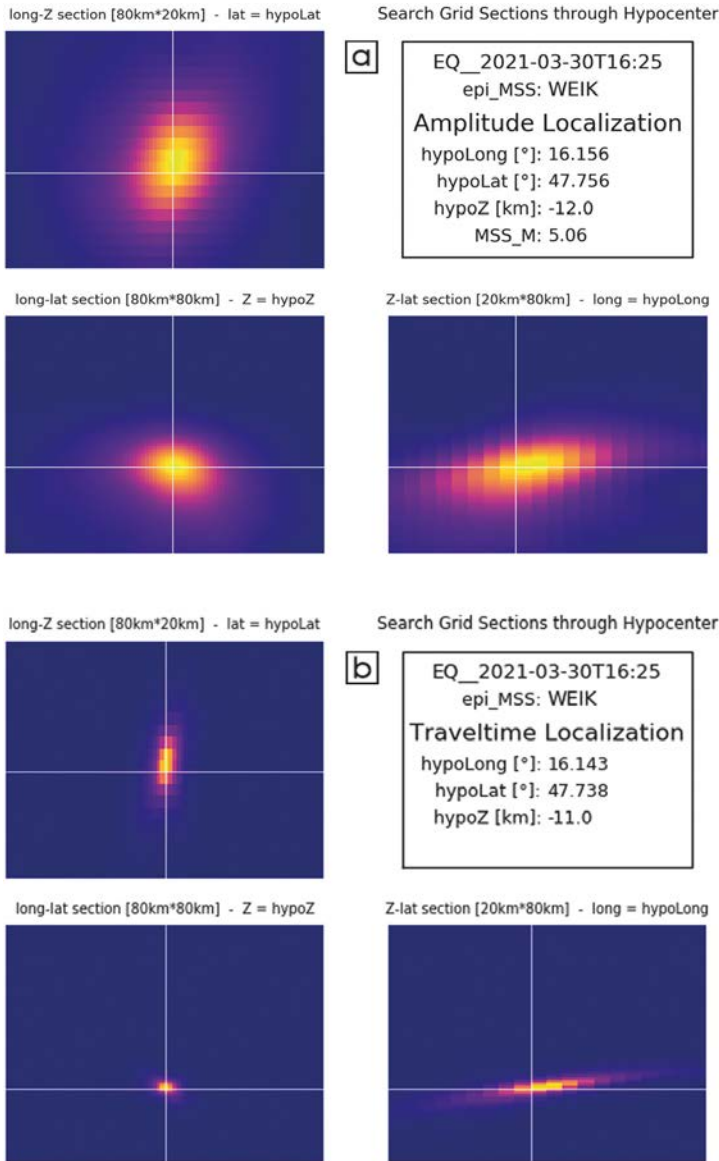


Abb. 13: Lokalisierung des Bebens von Breitenau, 2021-03-30 16:25 UTC über a) PGV/SA mit der Kanamori & Apollonius Methode und b) ($T_p - S D_p$) mit der Geiger & Hyperbola Methode; gezeigt sind in a) und b) drei orthogonale Schnitte durch den Such-Raster in der Lage des Hypozentrums

stärkungsfaktoren SA von der MSS-Homepage heruntergeladen werden kann (siehe Archiv / Zusatzdaten / PGV-Stationsmarker). Tabelle 1 gibt einen Überblick über alle sechs Methoden. Sie basieren auf der Suche des Hypozentrums als MIN oder MAX einer Zielgröße in einem 3D-Grid.

Die Größen $\log_{10}(A_{0i})$ und T_{0i} werden für alle Rasterpunkte [k, l, m] des 3D-Grids als mögliche Erdbebenherde und alle Stationen i aus

PGV_i, bzw. T_{pi} über Gl. (2) und (3) berechnet. Apollonius Kreise bzw. Kugelflächen sind durch das Verhältnis PGV_i / PGV_j an den Stationen i und j gegeben. Die Laufzeitdifferenzen der P-Wellen ($T_{pi} - T_{pj}$) an den Stationen i und j definieren nach der Multiplikation mit V_p Hyperboloide als Orte möglicher Hypozentren. Die Laufzeitdifferenzen ($T_{si} - T_{sj}$) multipliziert mit der aus diesen Laufzeitdifferenzen folgenden Geschwindigkeit V_{sp} definieren Kreise bzw. Kugelflächen um die Stationen i als Orte möglicher Hypozentren. Die geometrischen Methoden sind an 1D Modelle für die Beschreibung der Entfernungabhängigkeit von Amplitude und Laufzeit gebunden. Die Methoden Apollonius und Hyperbola benötigen darüber hinaus konstante Parameter $expo$ und V_p entsprechend Gl. (1) und (3). Die Methoden Kanamori, Geiger und Hopkins könnten prinzipiell auf 3D Modelle für die Entfernungabhängigkeit von Amplituden und Laufzeiten erweitert werden. Das frei verfügbare Programmpaket NonLinLoc [12] ist hinsichtlich Laufzeiten hierfür ein Beispiel.

Die in Tabelle 1 angeführten und im Rahmen des MSS-Projektes umgesetzten Lokalisierungsmethoden stellen eine bewusst auf leichte Verständlichkeit und Programmierung ausgerichtete Auswahl dar. Es erscheint dennoch interessant, Lokalisierungen auf Basis der Daten des MSS-Netzes und der beschriebenen einfachen

Methoden mit den, dem „state of the art“ gerecht werdenden Lokalisierungen der ZAMG zu vergleichen. Die Erdbebenserie März-April 2021 im südlichen Wiener Becken bietet dafür hervorragende Daten.

Aus der genannten Erdbebenserie wählen wir die 5 stärksten Erdbeben ($3.4 \leq M_L \leq 4.6$) und 20 weitere Erdbeben mit Magnituden $M_L \geq 2.0$ aus. Die Amplitudendaten (PGV) für diese Erdbeben

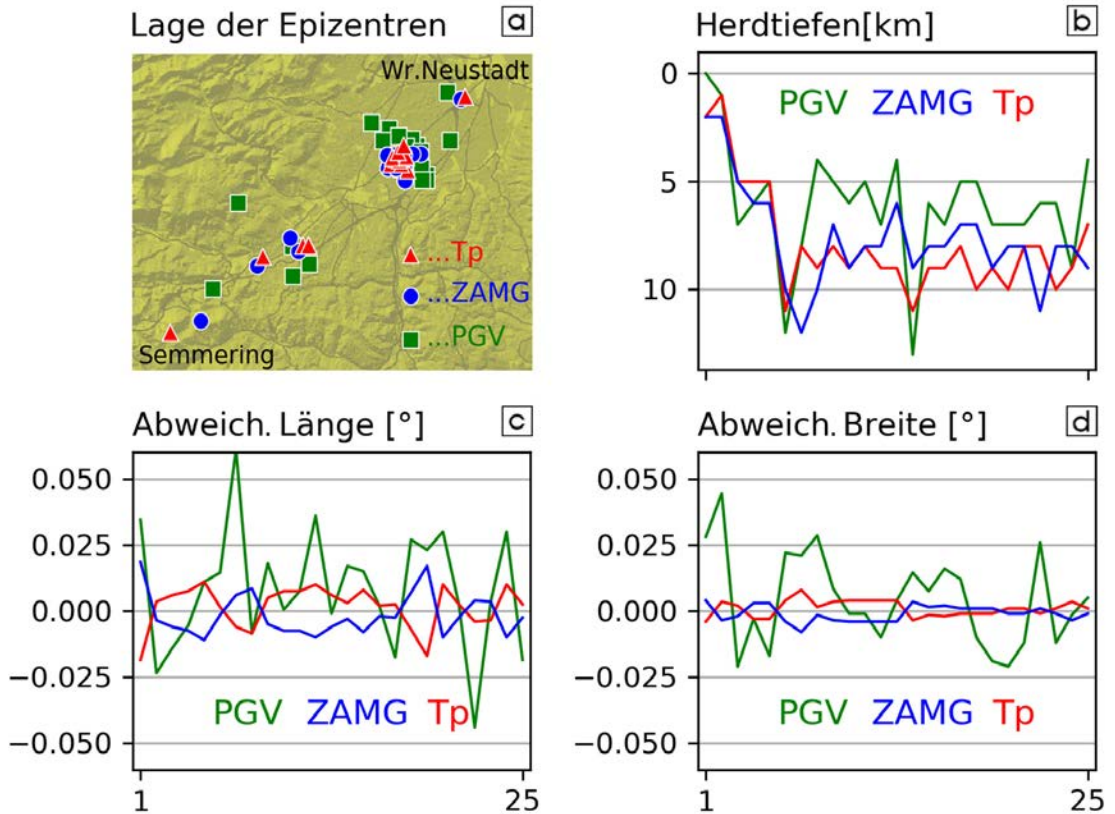


Abb. 14: Vergleich der Lokalisierungen von 25 Erdbeben der Serie März – April 2021 im südlichen Wiener Becken mit den Methoden Kanamori & Apollonius (PGV), Geiger & Hyperbola (Tp) und der ZAMG. Die Abweichungen in Länge und Breite sind auf die Mittelwerte von Tp und ZAMG bezogen.

wurden über die MSS-Homepage heruntergeladen. Die Laufzeitdaten (Tp) wurden – wie in Kapitel 6 bereits beschrieben – von den 100 Hz MSEED Dateien mittels SeisGram manuell abgelesen. Wir lokalisieren die 25 Erdbeben der Serie mit den Amplituden basierten Methoden Kanamori und Apollonius (PGV bzw. PGV/SA) sowie den Laufzeit basierten Methoden Geiger und Hyperbola (Tp bzw. Tp – SDp). Entsprechend Kapitel 6 gilt für den Amplitudenparameter $expo = -2.1$ und den Laufzeit-Parameter $Vp = 5800$ m/s.

Die beiden Amplituden- und Laufzeit-Methoden werden kombiniert, indem die Zielgrößen an den Rasterpunkten des 3D-Grids nach Apollonius bzw. Hyperbola durch das Quadrat der Raster-Werte nach Kanamori bzw. Geiger dividiert werden. Bei Daten, die exakt den Modellen nach Gl. (1) und (3) entsprechen, würden die Maximalwerte des Apollonius bzw. Hyperbola Grids exakt mit den Minimalwerten des Kanamori bzw. Geiger Grids zusammentreffen. Die beiden geometrischen

Methoden (Apollonius und Hyperbola) gewichten jedoch die Daten anders als die MIN(STABW) Methoden (Kanamori und Geiger), sodass bei Abweichungen der Daten vom Modell die ermittelten Hypozentren differieren. Die Kombination in der beschriebenen Form erscheint gerechtfertigt, solange dadurch nicht zwei oder mehrere Extrema entstehen. Abbildung 13 zeigt jeweils 3 orthogonale Schnitte durch den Suchrastrer in der Lage des Hypozentrums nach Apollonius & Kanamori und Hyperbola & Geiger. Beide Verfahren ergeben ein eindeutiges Maximum, die unterschiedliche Auflösung der auf Amplituden bzw. Laufzeiten basierten Methoden ist jedoch klar erkennbar.

Die Lage der Epizentren und gegenseitigen Abweichungen in Länge, Breite und Herdtiefe, ermittelt mit den Methoden Kanamori & Apollonius, Geiger & Hyperbola und den Lokalisierungen der ZAMG sind in Abbildung 14 dargestellt. Auf eine seismo-tektonische Interpretation verzichten wir hier und betrachten lediglich die aus diesen

	gegenseitiger Abstand der Epizentren [km]			Differenz der Herdtiefen [km]		
	PGV-Tp	PGV-ZAMG	Tp-ZAMG	PGV-Tp	PGV-ZAMG	Tp-ZAMG
MEDIAN	2.1	2.2	1.2	-2.0	-2.0	0.5
MITTELWERT	2.3	2.4	1.2	-1.8	-1.6	0.2
STABW	1.4	1.3	0.6	2.1	2.3	1.7

Tab. 2: Erdbebenserie März – April 2021 im Wiener Becken; gegenseitige Differenzen von Epizentren und Herdtiefen, ermittelt mit Apollonius & Kanamori (PGV), Geiger & Hyperbola (Tp) und nach ZAMG

Ergebnissen ableitbaren, mittleren Lokalisierungsfehler der drei Methoden. Klar erkennbar ist die wesentlich größere räumliche Streuung der Epizentren bestimmt mit der Amplituden basierten Methode Kanamori & Apollonius gegenüber den Laufzeit basierten Methoden Geiger & Hyperbola und ZAMG. In Tabelle 2 sind Median, Mittelwert und Standardabweichung der gegenseitigen Abstände der Epizentren und Differenzen der Herdtiefen zusammengestellt. Für die Methoden Geiger & Hyperbola (Tp) und ZAMG können aus diesen Daten Fehler in der Lage des Epizentrums von 1 km und in der Herdtiefe von ± 1.5 km abgeschätzt werden. Der Lagefehler der Methode Kanamori & Apollonius (PGV) liegt bei 2.0 bis 2.5 km. Die Herdtiefen nach Kanamori & Apollonius sind um den Faktor 0.8 geringer im Vergleich zu Geiger & Hyperbola und der ZAMG. Mit einer entsprechenden Korrektur beträgt der Fehler in der Herdtiefe ± 2.5 km. Eine schlüssige Erklärung für die systematische Abweichung der auf Amplituden basierten Herdtiefen (Kanamori & Apollonius) gegenüber den Laufzeit basierten Herdtiefen (Geiger & Hyperbola und ZAMG) konnten wir bislang nicht finden.

8. Monitoring von Sprengerschütterungen

Die wirtschaftliche Produktion von Massenrohstoff in Steinbrüchen erfordert Sprengungen, die festes Gestein mit einem Volumen in der Größenordnung von 10^4 m^3 zu einem transportierbaren und zur weiteren Verarbeitung geeigneten Haufwerk verwandeln. In benachbarten Gebäuden zulässige Sprengerschütterungen sind in der ÖNORM S 9020 geregelt und Sprengschemata werden daraufhin dimensioniert. Obwohl gelegentlich durch Gutachter*innen und routinemäßig auch vom jeweiligen Betrieb Messungen vorgenommen werden, haben Anrainer*innen, Bürgermeister*innen und z.T. auch der Steinbruchbetreiber selbst Interesse daran gefunden, die Sprengerschütterungen im Umfeld eines Steinbruchs mit dem MSS-Netz kontinuierlich,

in Nahe-Echtzeit und öffentlich zugänglich zu erfassen. Entsprechend dem implementierten Trigger-Kriterium (Kapitel 4.2) müssen mindestens 3 MSS-Stationen im Nahbereich des Steinbruchs in Funktion sein, damit die automatische Detektion und Archivierung auf der MSS-Homepage gewährleistet ist. Bislang ist diese Voraussetzung bei den Steinbrüchen Dürnbach / Hohe Wand und Pfaffenberg / Hundsheimer Berge (Abbildung 15a, c) gegeben.

Nach der Detektion und Archivierung einer Sprengung in den Steinbrüchen Dürnbach oder Pfaffenberg als seismisches Ereignis treffen wir – derzeit noch interaktiv – die Klassifikation „Sprengung im Steinbruch Dürnbach/Pfaffenberg“. Danach können die entsprechenden Daten und Visualisierungen vom Archiv der MSS-Homepage aufgerufen werden. Außerdem berechnen wir die Magnitude MSS_M der Sprengung nach Gl. (4). Den Ort der Sprengung schätzen wir mit der Lokalisierungsmethode nach Kanamori & Apollonius, wobei sich der grid search auf einen 2D-Raster in der Ausdehnung des jeweiligen aktiven Abbaubereiches und dessen mittlere Höhe beschränkt. Den zeitlichen Ablauf von PGV an benachbarten Stationen, sowie MSS_M führen wir in Diagrammen für Dürnbach und Pfaffenberg nach und stellen diese Daten Interessent*innen monatlich zu Verfügung (Abbildung 15b, d).

Für die Anrainer*innen, die Sprengerschütterungen deutlich spüren, sind die an den jeweiligen MSS-Stationen gemessenen Schwinggeschwindigkeiten, im Speziellen PGV von besonderem Interesse. Nach der ÖNORM S 9020 „Erschütterungsschutz für ober- und unterirdische Anlagen“ werden resultierende Schwinggeschwindigkeiten $VR \leq 2.5 \text{ mm/s}$ als bautechnisch irrelevant angesehen. PGV, gemessen mit einem MSS an einer tragenden Wand, kann mit hinreichender Genauigkeit (Fehler $< 10\%$) zur Schätzung von VR, gemessen mit einem exakt der Norm entsprechenden Gerät, herangezogen werden [21].

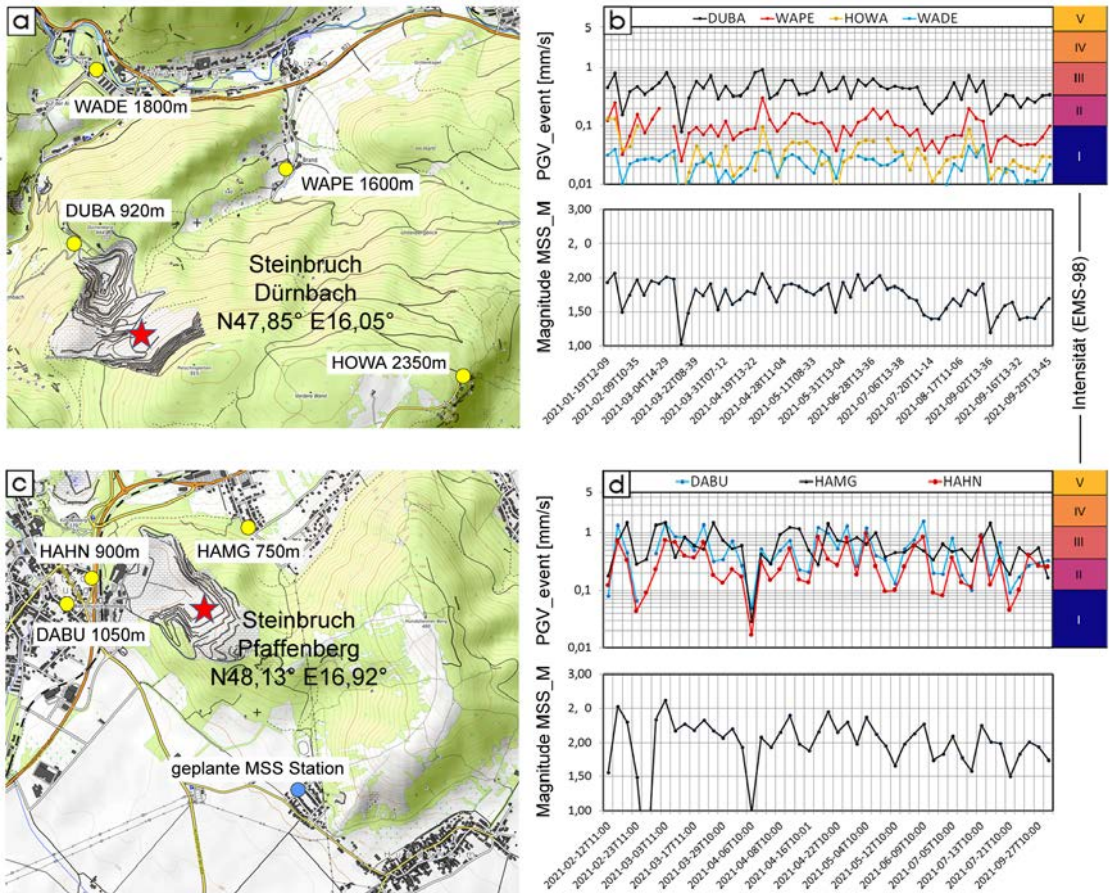


Abb. 15: Monitoring von Sprengerschütterungen mit Stationen des MSS-Netzes; a) und c) nächste MSS-Stationen mit Entfernung zu mittleren Sprengorten (rote Sterne) der Steinbrüche Dürrnbach (Hohe Wand) und Pfaffenberg (Hundsheimer Berge); b) und d) zeitliche Verläufe von MSS_M und PGV der nächstliegenden MSS-Stationen

PGV < 2.5 mm/s sollte unbedingt eingehalten werden. Die Korrelation von PGV mit der Intensität nach EMS-98 (Abbildung 8a) ergab, dass Erdbeben ab PGV = 1.1 mm/s bereits die Intensität IV zugeordnet wird. Dies deckt sich mit Meldungen von Anrainern des Steinbruchs Pfaffenberg, die Sprengerschütterungen ab PGV ~ 1 mm/s als deutlich fühlbar, und eventuell mit Fensterklirren oder Türwackeln verbunden, schildern. Die Sorge um die Unversehrtheit des eigenen Hauses wird daher verständlich, auch wenn diese bautechnisch nicht begründet ist. Das Bemühen des Steinbruchbetreibers, mit Sprengerschütterungen möglichst wenig in den Bereich der Intensität IV zu gelangen, unterstützt sicher deren Akzeptanz durch betroffene Anrainerninnen.

Neben der Bestimmung von PGV einer Sprengung, beobachtet an den einzelnen MSS-Stationen, ist die Ermittlung deren Quellstärke A_0 (Gl. 1),

bzw. der Magnitude (MSS_M) sinnvoll. Zum einen erlaubt deren Kenntnis die Abschätzung von PGV im gesamten Umfeld mittels Gl. (1), zum anderen stellen diese Größen ein Maß dar, das zur Optimierung von Sprengerschemata hinsichtlich der Minderung von Sprengerschütterungen herangezogen werden kann.

9. Zusammenfassung und Ausblick

Dem Macroseismic Sensor (MSS) Projekt liegt die Motivation zugrunde, Personen nach der Wahrnehmung von Erschütterungen rasch Auskunft geben zu können, ob es sich hierbei um ein Erdbeben, eventuell eine Sprengung oder nur eine örtliche, in der Reichweite sehr begrenzte seismische Quelle handelt. Wir haben versucht, diesem Ziel durch den Aufbau eines low-cost Sensor Netzes (MSS-Netz) und die Nahe-Echtzeit Visualisierung der Daten im Internet über die

MSS-Homepage (<https://www.macroseismicssensor.at/>) möglichst nahe zu kommen. Das MSS-Netz ist auf das südliche Wiener Becken und sein nahes Umfeld in Niederösterreich beschränkt und umfasst im Oktober 2021 51 MSS-Stationen. Als Maß für die aktuelle seismische Aktivität an den einzelnen Stationen wählten wir PGV (Peak Ground Velocity), den Maximalwert der Horizontalgeschwindigkeit über ein definiertes Zeitintervall. PGV wird auf einer Karte durch Stationsmarker visualisiert und kann an ausgewählten Stationen als Zeitreihe 10 Minuten lang beobachtet werden. Ein spezieller Detektionsalgorithmus gewährleistet die Speicherung seismischer Ereignisse, denen im Gebiet des MSS-Netzes fühlbare Erdbeben zugeordnet werden könnten, ohne jedoch zu häufig unkorrelierte seismische Störsignale zu detektieren. Nach weniger als einer Minute ab Beginn des Ereignisses können kartographische Visualisierungen der PGV-Werte in der Form von Symbolen, farbcodierten Voronoi-Zellen des Stationsnetzes oder PGV-Konturlinien aus einem Online-Archiv abgerufen werden. Nach einiger Befassung mit der MSS-Homepage sollte es allen interessierten Personen möglich sein, mit Hilfe der angebotenen Visualisierungen die zu Beginn der Einleitung (Kapitel 1) genannten Fragen zumindest teilweise zu beantworten.

Im Frühjahr 2021 wurde das südliche Wiener Becken ungewöhnlich häufig von zum Teil stark fühlbaren Erdbeben erschüttert. Die dabei gewonnenen neuen Daten erweiterten unsere Zuordnungen von PGV zu Intensitäten nach EMS-98 wesentlich. Die auf dieser soliden Datenbasis beruhende Beziehung zwischen PGV, gemessen an den MSS-Stationen, und der makroseismischen Intensität erachten wir als das wichtigste seismologische Ergebnis des MSS-Projektes. Weiters modellierten wir die Abhängigkeit von PGV und der P-Wellen Laufzeit T_p von der Hypozentraldistanz. Ortsspezifische Stationskorrekturen spielten dabei eine wesentliche Rolle. Schließlich nutzten wir die PGV- und T_p -Datensätze zur Lokalisierung der jüngsten, fühlbaren Erdbeben im südlichen Wiener Becken. Die Lokalisierungen über T_p sind hinsichtlich ihrer Genauigkeit vergleichbar mit den Lokalisierungen durch den Erdbebendienst der ZAMG. Die Lokalisierung über PGV führte auch zur Berechnung der Magnitude M_{SS_M} , die in einem hoch korrelierten, linearen Zusammenhang mit der Magnitude M_L , angegeben von der ZAMG, steht.

Im Sinne von Citizen Science erfolgte der Aufbau des MSS-Netzes mit wesentlicher Unterstützung aus den Bereichen von Schulen, der Politik und öffentlichen Verwaltung, des Zivilschutzes, der Industrie, sowie engagierter Privatpersonen. In der niederösterreichischen Landeswarnzentrale in Tulln leistet das MSS-Netz über die Integration in deren Infoscreen einen Beitrag zur Meldung aktuell möglicher Gefahren. Besondere Bedeutung haben die Daten des MSS-Netzes und deren Visualisierungen auf der MSS-Homepage für das Monitoring von Steinbruchsprengungen sowohl für Anrainer*innen als auch für Steinbruchbetreiber gewonnen.

Trotz der angesprochenen Wahrnehmung des MSS-Projektes und insbesondere der MSS-Homepage können wir mit der bisher erreichten Außenwirkung noch nicht zufrieden sein. Folgende Aktionen stehen für uns als nächstes auf dem Programm:

- Von den bisher 51 installierten MSS-Stationen befinden sich 37 in Gemeindeämtern. Ein Link von deren Websites zur neuen MSS-Homepage könnte für etliche Gemeinden im Sinne von Citizen Science attraktiv erscheinen.
- Die MSS-Homepage ermöglicht eine sehr lebendige und intuitiv verständliche Wahrnehmung der seismischen Aktivität. Lehrpersonen aus den unterschiedlichsten Fachbereichen sollten daher mit den Möglichkeiten der MSS-Homepage im Bildungsbereich vertraut gemacht werden.
- Das MSS-Projekt begann 2014 im Rahmen von „QuakeWatch Austria“ gemeinsam mit der Entwicklung einer neuen App zum raschen Melden von Erdbebenwahrnehmungen über ein Handy. Mittlerweile wurde diese Entwicklung unter der Leitung der ZAMG abgeschlossen und die App steht der Bevölkerung zur Verfügung. (<https://www.zamg.ac.at/cms/de/forschung/geophysik/forschung-erdbeben/quake-watch>). Die MSS-Homepage ermöglicht die rasche Information über aktuelle seismische Ereignisse an Bürgerinnen und Bürger. Über die App bzw. das online-Wahrnehmungsformular auf der Homepage der ZAMG hingegen können Informationen aus derselben Personengruppe zurück an den seismologischen Dienst fließen. Es liegt nahe diesen in beide Richtungen möglichen Informationsfluss als sich gegenseitig ergänzend für interessierte Personen im Internet auf den entsprechenden Homepages sichtbar zu machen.

Schlussendlich hoffen wir, dass die vorliegende Arbeit zu einer Wahrnehmung des MSS-Projektes im Bereich der Geodäsie und Geoinformation beiträgt. Wir danken der vgi-Schriftleitung uns diese Gelegenheit gegeben zu haben.

Danksagung

Die Entwicklung des Macroseismic Sensors erfolgte in Kooperation mit Lehrern und Schülern des TGM (HTL Technologisches Gewerbemuseum, Wien) und wurde vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung, der Österreichischen Akademie der Wissenschaften und dem Naturhistorischen Museum, Wien finanziert. Förderungen des Landes Niederösterreich ermöglichten den Aufbau und Ausbau des Macroseismic Sensor Netzes gemeinsam mit Lehrern und Schülern der HTL Wiener Neustadt. Weitere finanzielle und logistische Unterstützung kam von der Baumit GmbH. Die aktuelle Visualisierung im Internet wurde von der Förderaktion netidee im Rahmen des Projekts MSS Outreach ermöglicht. Die kartographischen Darstellungen beruhen auf der Verwendung von OpenStreetMap (www.openstreetmap.org, © OpenStreetMap-Contributors), OE3D (www.oe3d.at, © Rechenraum e.U.) und BEV (www.bev.gv.at, © BEV 2020). Besonders danken wir Personen des öffentlichen Lebens, in Gemeinde- und Schulverwaltung, sowie engagierten Privatpersonen für ihre Unterstützung in ideeller, organisatorischer und sachlicher Hinsicht.

Referenzen

- [1] *Brückl E, Carniel P, Mertl S, Meurers R. (2021)*: Seismological Data Acquisition and Analysis within the Scope of Citizen Science in Earthquakes – From Tectonics to Buildings, Editor W. Salazar, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.95273, <https://www.intechopen.com/chapters/74466>
- [2] *Brückl E, Köberl C, Lenhardt W, Mertl S, Rafeiner-Magor W, Stark A, Stickler G, Weber R. (2015)*: Scientific goals of SCHOOLS & QUAKES. Geophysical Research Abstracts, Vol. 17, EGU2015-3401-4, EGU General Assembly 2015
- [3] *Lenhardt W. (2016)*: QuakeWatch Austria. <https://www.zamg.ac.at/cms/de/forschung/geophysik/forschung-erdbeben/quake-watch>, [zugegriffen 2021-10-10]
- [4] *Cochran ES, Lawrence J, Christensen C, Jakka RS. (2009)*: The Quake-Catcher Network: Citizen science expanding seismic horizons. Seismological Research Letters, 2009, 80:1, 26–30, DOI: 10.1785/gssrl.80.1.26
- [5] *Anthony RE, Ringler AT, Wilson DC, Wolin E. (2018)*: Do low-cost seismographs perform well enough for your network? An overview of laboratory tests and field observations of the OSOP Raspberry Shake 4D. Seismological Research Letters, 2018, 90:1, 219–228, DOI:10.1785/02200220180251
- [6] *Allen PA, Allen JR. (1990)*: Basin Analysis Principles and Applications, Oxford. Blackwell Science, 1990, 451 p; ISBN 0-632-02422
- [7] *Ratschbacher L, Frisch W, Linzer H-G, Merle O. (1991)*: Lateral extrusion in the Eastern Alps, Part 2: Structural analysis. Tectonics, 1991, 10:2, 257–271.

- [8] *Umnig E, Brückl E, Maras J, Weber R. (2015)*: Monitoring Tectonic Processes in Eastern Austria based on GNSS-derived site velocities. Vermessung & Geoinformation 2015/2+3, 198 – 207.
- [9] *AEC (2021)*: Austrian Earthquake Catalogue, Computer-Datei. Erdbebendienst der ZAMG, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien.
- [10] *Antelope – Environmental Monitoring Software*. <https://kinemetrics.com/wp-content/uploads/2017/04/datasheet-software-antelope.pdf>, [zugegriffen 2021-10-10]
- [11] *Lomax A. (2014)*: SeisGram2K Seismogram Viewer, <http://alomax.free.fr/seisgram/SeisGram2K.html>, [zugegriffen 2021-10-10]
- [12] *Lomax A. (2017)*: NonLinLoc-Probabilistic, non-linear, global-search earthquake location in 3D media. <http://alomax.free.fr/nlloc/> [zugegriffen: 2021-10-10]
- [13] *Krischer et al. (2015)*: ObsPy: a bridge for seismology into the scientific Python ecosystem, Comput. Sci. Discov. 8 014003
- [14] *Bulletin ZAMG (2021)*: Preliminary Bulletin of Regional and Telesismic Events Recorded with ZAMG-Stations in Austria. Erdbebendienst der ZAMG, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien.
- [15] *Brückl E. (2019)*: Graphical Location of Seismic Sources Based on Amplitude Ratios. Seismological Research Letters, 2019; 90:22, 784–789. DOI: 10.1785/0220180216
- [16] *Kanamori H. (1993)*: Locating earthquakes with amplitude: Application to real-time seismology. Bull. Seismol. Soc. Am. 1993; 83, 264–268
- [17] *Geiger L. (1912)*: Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only. Bull. St. Louis Univ. 1912; 8, 60-71
- [18] *Mohorovičić A. (1916)*: Die Bestimmung des Epizentrums eines Nahbebens. Gerlands Beitr. zur Geophysik, 1916; 14, 199-20
- [19] *Hopkins W. (1848)*: Report on the geological theories of elevation and earthquakes. Report of the British Association for the Advancement Of Science, 1848; 21, 33–92
- [20] *Richter Ch. (1958)*: Elementary Seismology. W.H. Freeman and Co. San Francisco, 1958, p. 768
- [21] *Brückl E, Filz K, Hochwartner R, Mertl S, Stickler G, Zöhling S. (2019)*: Monitoring von Sprengerschütterungen mit seismischen „low-cost“ Sensoren. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 2019; 164:10, 431-437. DOI: 10.1007/s00501-019-00892-z

Anschrift der Autoren

Em. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Ewald Brückl, Department für Geodäsie und Geoinformation, Technische Universität Wien, Wiedner Hauptstraße 8, 1040 Wien.

E-mail: Ewald.Brueckl@geotuwien.ac.at

Ing. Peter Carniel, Sandleitengasse 9-13/2/18, 1160 Wien
E-mail: peter.carniel@utanet.at

Dr. Stefan Mertl, Mertl Research GmbH, Kienmayergasse 22, c/o Adhocpad Coworking Space, 1140 Wien.
E-Mail: stefan@mertl-research.at

Mag. Rita Meurers, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Hohe Warte 38, 1190 Wien.

E-Mail: rita.meurers@zamg.ac.at