

Kärnten bebt(e) –

Neue Fragen und Aspekte
zur Archäoseismologie

Beiträge zum Symposium
im kärnten.museum am 24.11.2023

72. Sonderheft zur Carinthia II
Naturwissenschaftliche Beiträge zur Heimatkunde Kärntens

Verlags- und Redaktionsadresse:
Naturwissenschaftlicher Verein für Kärnten
Museumgasse 2, 9020 Klagenfurt am Wörthersee, Österreich
T: +43 (0)50 536-30574
E: nwv@landesmuseum.ktn.gv.at
H: www.naturwissenschaft-ktn.at
Gedruckt mit der Unterstützung des Landes Kärnten



LAND  KÄRNTEN
Kunst und Kultur



Herausgeber: Alexander Budsky, Landesmuseum für Kärnten und
Naturwissenschaftlicher Verein für Kärnten

Redaktion: Alexander Budsky

Umschlag, Layout, Satz und Repro: Alice Burger Grafik+Typografie, 9020 Klagenfurt am Wörthersee
Druck: Florjančič Tisk d.o.o, Perhavčeva ulica 44, SI-2000 Maribor, Slowenien

Umschlagbild: Sujet zur Erlebnis.Sonderschau: Kärnten bebt(e), 10.11.2023–19.02.2024
im kärnten.museum, Klagenfurt am Wörthersee

Auflage: 500

Schrift: Adobe Garamond Pro

Zitervorschlag: Budsky, A. (Hrsg.) 2025: Kärnten bebt(e) – Neue Fragen und Aspekte zur
Archäoseismologie. Beiträge zum Symposium im Kärnten.Museum am 24.11.2023.

Verlag des naturwissenschaftlichen Vereins für Kärnten, 72. Sonderheft, Klagenfurt am Wörthersee, 176 S.

Beiträge im Sonderheft:

Daxer *et al.*, 2025: Kärntner Seen als natürliche Seismografen liefern neue Erkenntnisse über prähistorische
Erdbebenegeschichte und Erdbebengefährdung, 15 – 19.

In: Budsky, A. (Hrsg.) 2025: Kärnten bebt(e) – Neue Fragen und Aspekte zur Archäoseismologie.
Beiträge zum Symposium im Kärnten.Museum am 24.11.2023.

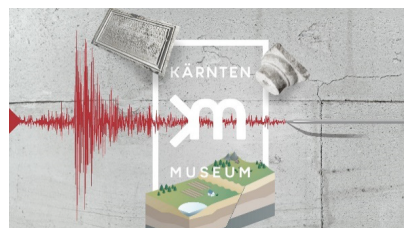
Verlag des Naturwissenschaftlichen Vereins für Kärnten, 72. Sonderheft, Klagenfurt am Wörthersee, 176 S.

ISBN: 978-3-85328-109-3

Klagenfurt am Wörthersee, Juni 2025

Alle Rechte vorbehalten und Autoren sind für die Inhalte verantwortlich.

Datum	17.11.2023
Abteilung	Erdwissenschaften
Auskünfte	Dr. Alexander Budsky
Telefon	+43 (0)664 7864 3005
E-Mail	alexander.budsky@kaernten.museum
Örtlichkeit	Seminarraum des kärnten.museum



Symposium am 24.11.2023: Kärnten bebt(e) – Neue Fragen und Aspekte zur Archäoseismologie

Führung durch das Programm: A. Budsky

09:00	Begrüßung	W. Muchitsch, H. Dolenz und C. Dojen
09:15	Unterseeische Naturseismometer: Was wir aus Schlammlagerungen in Kärntner Seen über die historische und prähistorische Erdbeben- geschichte, sowie die heutige Erdbebengefährdung lernen können?	M. Strasser (Universität Innsbruck)
10:00	Starke Erdbeben in den Alpen und wie man sie datiert	C. Grützner (Universität Jena)
10:45	<i>Kaffeepause</i>	
11:00	Seismisch aktive Störungen in Kärnten und die Lage und Mechanismen der rezenten Erdbeben	H. Hausmann, E. Hintersberger, C. Iglseder, R. Schuster (GeoSphere Austria)
11:45	Alpine archaeoseismology	Miklós Kázmér (Eötvös University, Budapest, Hungary) and Krzysztof Gaidzik (University of Silesia, Sosnowiec, Poland)
12:30	<i>Mittagspause</i>	
14:15	Die urbanistische Zäsur in der Stadt am Magdalensberg – ein schweres Erdbeben um 9 n. Chr.!?	D. Ebner-Baur, H. Dolenz (Landesmuseum für Kärnten)
15:00	Die Gurina im Gailtal – zum Ende der ersten norischen Hauptstadt	R. Jernej (Landesmuseum für Kärnten)
15:45	<i>Kaffeepause</i>	
16:00	Archäologische und epigraphische Indizien für Erdbeben der Jahre 183/184 und 236/237 n. Chr. im Municipium Claudium Virunum	H. Dolenz (Landesmuseum für Kärnten)
16:45	Das Ostalpen Erdbeben vom 25. Jänner 1348 im Spiegel der Quellen und Literatur	C. Hammerl (GeoSphere Austria)
18:00	evtl. abschließende Diskussionsrunde	

DOJEN, C.: Vorwort	5
BUDSKY, A.: Physikalische Grundlagen zum Thema Erdbeben	9
DAXER, C., STRASSER, M., MOERNAUT, J.: Kärntner Seen als natürliche Seismografen liefern neue Erkenntnisse über prähistorische Erdbebengeschichte und Erdbebengefährdung	15
GRÜTZNER, C., BÜLHOFF, M., MÜCHLISCH, M., PRINCE, E., REICHERTER, K., STUBENRAUCH, J., TSUKAMOTO, S., USTASZEWSKI, K.: Starke Erdbeben in den Alpen und wie man sie datiert	20
HAUSMANN, H., HINTERSBERGER, E., IGLSEDER, C., SCHUSTER, R.: Seismisch aktive Störungen in Kärnten und die Lage und Mechanismen der rezenten Erdbeben	41
KÁZMÉR, M. & GAIDZIK, K.: Alpine archaeoseismology	73
EBNER-BAUR, D. & DOLENZ, H.: Die urbanistische Zäsur in der Stadt am Magdalensberg – ein schweres Erdbeben um 9 n. Chr.!?	91
JERNEJ, R.: Die Gurina im Gailtal – zum Ende der ersten norischen Hauptstadt	108
DOLENZ, H.: Archäologische und epigraphische Indizien für Erdbeben in den Jahren 183/184 und 236/237 n. Chr. im Municipium Claudium Virunum	122
HAMMERL, C.: Das ostalpen Erdbeben vom 25. Jänner 1348 im Spiegel der Quellen und Literatur – eine unendliche Geschichte	140
Abschließende Diskussionsrunde	155

Starke Erdbeben in den Alpen und wie man sie datiert

CHRISTOPH GRÜTZNER^I, MURIEL BÜLHOFF^I, MARK
MÜCKLISCH^I, ERICK PRINCE^I, KLAUS REICHERTER^{II}, JAKOB
STUBENRAUCH^I, SUMIKO TSUKAMOTO^{III}, KAMIL USTASZEWSKI^I

SCHLÜSSELWÖRTER: Erdbeben, Periadriatische Linie, Paläoseismologie, Datierung

KEYWORDS: earthquake, Periadriatic Line, paleoseismology, dating

Zusammenfassung

Die Periadriatische Linie bildet eine der größten alpinen geologischen Störungen. Ihre seismische Aktivität ist bislang nur unzureichend verstanden. Hier diskutieren wir an diesem Beispiel verschiedene Methoden, starke Erdbeben an solchen Verwerfungen nachzuweisen und Modelle für Erdbeben-Wiederholraten zu entwickeln. Während die Seismizität der letzten Jahrhunderte häufig durch instrumentelle Beobachtungen, historische Quellen und archäoseismologische Untersuchungen katalogisiert werden kann, müssen für länger zurückliegende Beobachtungszeiträume geologische Archive herangezogen werden. Mittels Paläoseismologie und der Datierung von Massenbewegungen, die von Erdbeben ausgelöst wurden, können die letzten Jahrtausende abgedeckt werden. Lumineszenzdatierungen und Elektronenspinresonanzmessungen an der Kernzone der Störung erlauben Einblicke in die letzten ca. zwei Millionen Jahre. Pseudotachylite, seismisch generierte Reibungsschmelzen, können als Nachweis für starke Erdbeben im frühen Neogen dienen. Da sie vor Millionen von Jahren in tieferen Krustenstockwerken gebildet wurden, erlauben sie jedoch keine Aussagen über die derzeit aktive Tektonik der Periadriatischen Linie.

Abstract

The Periadriatic Line is one of the major Alpine faults. Its earthquake activity is still poorly understood. Here we use the example of the Periadriatic Line to discuss various methods for the detection and the dating of strong earthquakes. While the seismicity of the last centuries can be catalogized by instrumental observations, historical sources, and archaeoseismological investigations, geolo-

^I Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Geowissenschaften, Burgweg 11, 07749 Jena, Deutschland

^{II} RWTH Aachen, Institut für Neotektonik und Georisiken, Lochnerstraße 4-20, 52056 Aachen, Deutschland

^{III} Leibniz Institute für Angewandte Geophysik LIAG Hannover, Stilleweg 2, 30655 Hannover, Deutschland

gical archives need to be studied to cover longer time periods. Paleoseismology and the dating of mass movements induced by earthquakes can be used to cover the last few millennia. Luminescence dating and electron spin resonance measurements at the core zone of the fault provide insights into the last two million years or so. Pseudotachylites, seismically generated frictional melts, can serve as evidence for strong earthquakes in the early Neogene in deeper parts of the Earth's crust.

Einführung und geologischer Überblick

In diesem Beitrag erläutern wir verschiedene Methoden zur Datierung von starken Erdbeben am Beispiel der Periadriatischen Linie (PAL), einer der größten tektonischen Störungen in den Alpen. Als starke Erdbeben bezeichnen wir hier Ereignisse, welche die gesamte obere Erdkruste durchschlagen und zu einem Versatz an der Erdoberfläche führen oder solche, die durch die hervorgerufenen Erschütterungen weiträumige Massenbewegungen, Bodenverflüssigungen oder ähnliche Phänomene erzeugen, welche in geologischen Archiven für lange Zeit ihre Spuren hinterlassen. Üblicherweise treten Versätze an der Oberfläche erst bei Erdbebenmagnituden größer als 6 auf; in solchen Fällen können meist nur einige Zentimeter Bewegung beobachtet werden. Bei Magnituden in der Größenordnung von 7 sind Versätze von einigen Metern möglich (Wells & Coppersmith, 1994; James P. McCalpin, 2009). Die maximale Magnitude eines Erdbebens hängt in erster Linie von der Länge des Bruches ab. Für ein Beben mit Magnitude M_6 muss sich eine Störung bewegen, die mindestens 10 bis 15 km lang ist. Störungen mit mehreren Zehnerkilometern Länge können Beben mit Magnituden von M_7 und größer erzeugen. Starke Erdbeben sind nicht nur deshalb interessant, weil sie die größte Gefahr für Bevölkerung und Infrastruktur darstellen, sondern auch, weil sie sehr viel mehr Energie freisetzen als kleinere Beben und uns daher wichtige Einblicke in die Tektonik eines Gebietes ermöglichen. Die Magnitudenskala als Maß für die Energiefreisetzung ist logarithmisch. Eine Erhöhung um 0,2 Magnituden bedeutet ungefähr eine Verdoppelung der freigesetzten Energie; eine Erhöhung um eine ganze Magnitude geht ca. mit dem 32-fachen an Energie einher. Daher hat ein Beben der Magnitude M_7 in etwa die gleiche Energie wie tausend Erdbeben der Magnitude M_5 ($32^2 = 1024$) oder ca. eine Million Mal mehr Energie als ein Beben der Magnitude M_3 ($32^4 \approx 1,05 \cdot 10^6$).

Die Periadriatische Linie ist eine der längsten Verwerfungen im gesamten Alpenraum und bildet sich deutlich in der Morphologie der Alpen ab. Da die Verwerfung eine mechanische Schwächezone in den Gesteinen bildet, kann dort die Erosion besonders effektiv angreifen. Als Folge bildeten sich entlang der PAL große Alpentäler. Die PAL erstreckt sich etwa von West nach Ost verlaufend von den Bergen nördlich Turins bis nach Cles im Trentino. Dort biegt sie nach Norden ab, um dann bei Sterzing wieder eine ost-südöstliche Richtung einzuschlagen. Fortan formt sie den sehr geraden Verlauf des Pustertals, des Lesachtals und des Gailtals. Sie biegt dann leicht nach Süden in die Karawanken und ins slowenische Velenje-Becken, um letztlich im Pannonischen Becken unter mächtigen Sedimenten des Plio-Pleistozäns zu enden (Abb. 1). Der östliche Teil der PAL ab dem Brenner bildet auch die tektonische Grenze zwischen den hochmetamorphen Austroalpinen Gesteinsserien im Norden und den Südalpinen Einheiten, die meist nur niedrige Metamorphosegrade erreichten.

Die PAL entstand als Folge der Nordwestbewegung der Adriatischen Platte und der damit einhergehenden Entstehung der Alpen. Sie ist eine rechtsseitige Blattverschiebung mit einer aufschiebenden Bewegungskomponente und hat zwischen 35 und 15 Millionen Jahren vor heute zwischen 150 und 300 km rechtsseitige Bewegung aufgenommen (e.g., Laubscher, 1971; Schmid

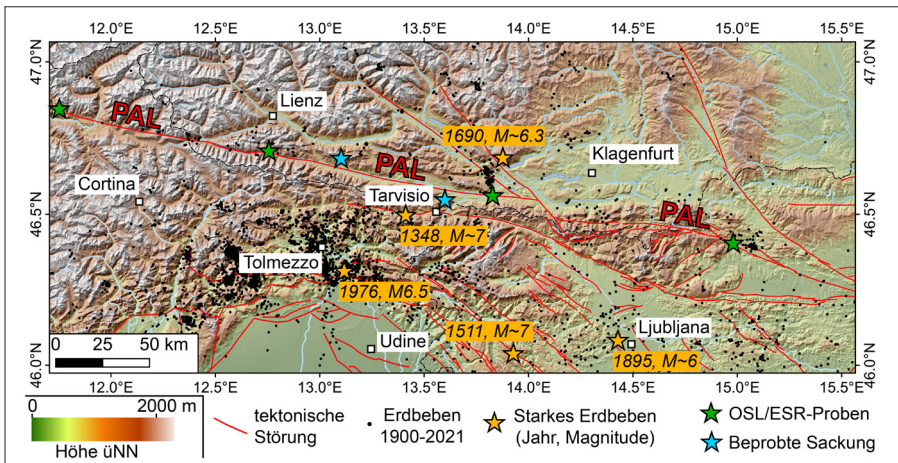


Abb. 1: Übersichtskarte des Arbeitsgebietes. PAL: Periadriatische Linie. Störungsverläufe von Atanackov *et al.* (2021), Galadini *et al.* (2005) und eigener Kartierung. Erdbebenangaben kommen von Stucchi *et al.* (2013), Grünthal *et al.* (2013), Bagagli *et al.* (2022) und Hofman *et al.* (2023).

et al., 1989). Zurzeit findet jedoch nur wenig Deformation im Alpenraum statt; die Adriatische Platte bewegt sich im Untersuchungsgebiet nur 2-3 mm pro Jahr nach Norden (Métois *et al.*, 2015). Ein Großteil der Verformung der Erdkruste geschieht an der Südalpenfront, wovon z.B. die Erdbeben in Friaul im Jahre 1976 Zeugnis ablegen (Abb. 1). Die größte horizontale Hauptspannung in den Ostalpen und den östlichen Südalpen verläuft heute Nord-Süd bis Nordwest-Südost ausgerichtet (Heidbach *et al.*, 2018; Aiman *et al.*, 2023), steht mithin nahezu senkrecht zum Streichen der PAL und favorisiert somit gegenwärtig keine blattverschiebenden Bewegungen an dieser Verwerfung. Die geringe instrumentell beobachtete Seismizität an der PAL seit dem Jahr 1900 bestätigt zunächst diese Beobachtung. Dennoch gibt es historische Überlieferungen von Schadböben im Untersuchungsgebiet aus dem Zeitraum vor 1900 (Abb. 1). Es besteht aber noch erheblicher Forschungsbedarf zu den Störungen, die diese Böben hervorriefen.

Datierung von Erdbeben anhand von historischen Quellen und Archäoseismologie

Mithin besteht also die Aufgabe herauszufinden, ob und, falls ja, wann es in der Vergangenheit starke Erdbeben an der PAL gab. Dazu können wir auf eine Vielzahl verschiedener Datensätze zurückgreifen (Abb. 2). Für die letzten ca. 100 Jahre ist dies wenig problematisch, da es seit dem frühen 20. Jahrhundert weltweit instrumentelle Aufzeichnungen von Erdbeben gibt. Etwa seit den 1970er Jahren werden Erdbeben weltweit auch digital aufgezeichnet und das Netz an Erdbebenstationen in den Alpen ist ausgesprochen dicht. Zu diesem Thema siehe die Arbeit von Hausmann *et al.* in dieser Ausgabe. Historische Dokumente geben darüber hinaus Aufschluss über signifikante Erdbeben der letzten Jahrhunderte (e.g., Hammerl, 1994; 1995; 2014). Auch hierzu siehe den Beitrag von Hammerl in dieser Ausgabe. Naturgemäß ist der Zeitraum, den diese Quellen abdecken, abhängig von der Region. Für Kärnten reicht dieser Zeitraum nicht weiter zurück als bis ins Mittelalter. In den allermeisten Fällen berichten historische Quellen jedoch nur von den Folgen der seismischen Erschütterungen. Aus Kärnten gibt es keine Berichte über koseismische (d.h. durch Erdbeben hervorgerufene) Versätze an tektonischen Störungen. Dies kann entweder daran liegen, dass die Erdbeben nicht stark genug waren, um die Oberfläche zu versetzen, oder daran, dass diese geologischen Spuren nicht

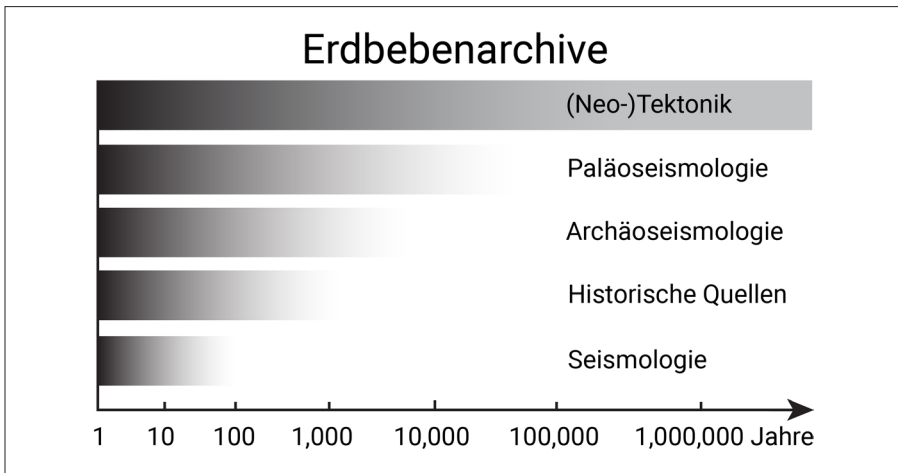


Abb. 2. Unterschiedliche Archive decken Erdbebeninformationen auf allen Zeitskalen ab. Verändert nach Caputo & Helly (2008).

erkannt oder beschrieben wurden. Oft lassen sich jedoch aus der Verteilung der in den Quellen beschriebenen Schäden zumindest das Epizentrum des Erdbebens und auch dessen ungefähre Stärke abschätzen (z.B. Hammerl & Lenhardt, 1997; Hinzen & Oemisch, 2001). Je stärker das Erdbeben war, desto besser ist im Allgemeinen die Quellenlage. Allerdings spielen auch andere Faktoren bei der Überlieferung eine Rolle, zum Beispiel die Bevölkerungsdichte, die Effektivität der Verwaltung, die soziale oder militärische Lage im Epizentralgebiet, der Erhaltungsgrad und die Vollständigkeit der Archive etc. Noch ältere Informationen über Erdbeben halten bisweilen archäologische Stätten bereit; das Fachgebiet der Archäoseismologie beschäftigt sich mit der Identifizierung von Erdbebenschäden (Sintubin, 2011). Je nach archäologischem Inventar einer Gegend können solche Forschungen mehrere tausend Jahre zurückreichen, in Kärnten etwa bis zur Römerzeit. Auch zu diesem Thema gibt es in dieser Ausgabe mehrere Beiträge. Wie auch historische Quellen kann die Archäoseismologie nur in den allerseltensten Fällen direkten Aufschluss über die Störung geben, an der das Erdbeben stattfand (ein schönes Gegenbeispiel in Marco *et al.*, 1997). Meist beschränkt sich der Informationsgehalt darauf, ein bestimmtes Maß an Bodenbewegung, welche durch koseismische Erschütterung ausgelöst wurde, an einem bestimmten Ort nachzuweisen (Galadini *et al.*, 2006) oder auszuschließen (z.B. Ambraseys & Psycharis, 2012).

Paläoseismologie

Die Paläoseismologie ist die klassische geologische Methode zur direkten Untersuchung von tektonischen Störungen. Derartige Untersuchungen konzentrieren sich auf die Störungszone selbst, mit dem Ziel, durch Erdbeben verursachte Versätze zu messen und zu datieren. Dazu werden nach intensiver, geomorphologischer und meist auch geophysikalischer Vorerkundung Schurfe über die Störungszone angelegt, beschrieben und beprobt (Abb. 3). Durch die Datierung der jüngsten Schichten, die noch durch Erdbeben deformiert wurden, und jener Schichten, die undeformiert über der Störung lagern, kann das maximal und minimal mögliche Alter der letzten Starkbeben eingegrenzt werden. Hierbei werden meist Radiokarbon-Datierungen (^{14}C) oder Lumineszenz-Datierungen angewendet. Die Paläoseismologie ist geeignet, mehrere tausend Jahre Erdbeben-geschichte abzudecken, kann aber nur die stärksten Beben entlang einer Störung identifizieren. Während im benachbarten Slowenien (Bavec *et al.*, 2013; Grützner *et al.*, 2021) und im Wiener Becken (z.B. Hintersberger *et al.*, 2018) derartige Arbeiten erfolgreich durchgeführt wurden, sind die geologischen Gegebenheiten entlang der PAL für diese Methode wenig geeignet. Dies liegt unter anderem daran, dass sich entlang der PAL nur wenige Orte finden lassen, in denen ein kontinuierlicher Sedimenteintrag die präzise Datierung erlauben würde, und dass die vielversprechendsten Lokalitäten stark anthropogen überprägt sind, zum Beispiel durch Siedlungen, Straßen und Eisenbahnen im Talgrund. Ein weiterer Grund dafür, dass klassische Paläoseismologie an der PAL bislang nicht erfolgreich durchgeführt werden konnte, ist im Bewegungssinn und der Bewegungsrate der PAL zu suchen. Die PAL sollte sich im heutigen Spannungsfeld wenig, und wenn, dann als Blattverschiebung oder Schrägaufschub bewegen. Die resultierenden seitlichen Verschiebungen lassen sich in der Landschaft bisweilen als abgelenkte Flussläufe oder Versätze in Graten und Tälern erkennen. Allerdings ist im Falle der PAL die maximal erwartbare tektonische Bewegungsrate äußerst niedrig, da die Adriatische Platte als treibende Kraft sich nur wenige Millimeter pro Jahr nach Norden schiebt, und fast alle anderen landschaftsverändernden Prozesse in den Alpen laufen deutlich schneller ab: Erosion durch Wasser, Wind und Gletscher, Sedimentation entlang von Flüssen und in Schuttfächern, Massenbewegungen wie Muren, Erdbeben, Felsstürze etc. Da der Großteil Kärntens noch im letzten glazialen Maximum (LGM) vor 20.000 Jahren mit Eis bedeckt war, sind heute fast ausschließlich jüngere Landformen

zugänglich, die noch keine großen Beträge tektonischer Deformation erfahren haben können. Allerdings können Prozesse wie Massenbewegungen auch durch die Ausbreitung von Oberflächenwellen vom Epizentrum eines Erdbebens aus hervorgerufen werden, wodurch sich ein zusätzliches Archiv von Erdbebeninformationen erschließen lässt, wie wir im Folgenden zeigen.

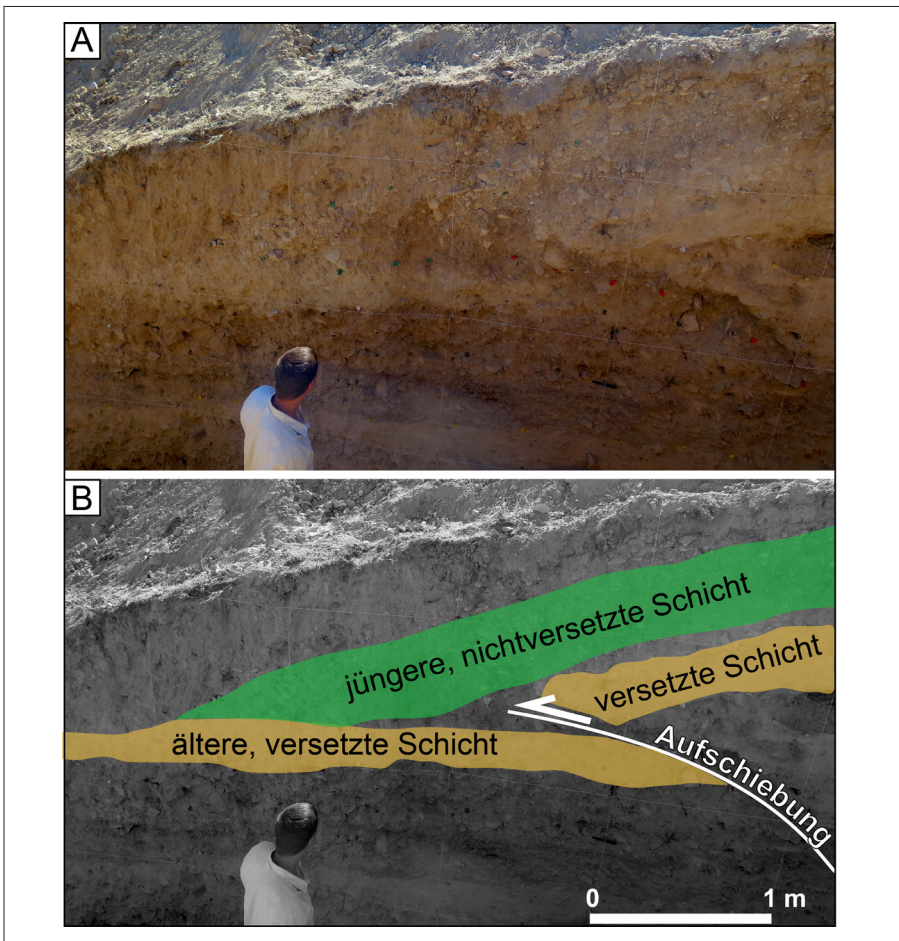


Abb. 3. Grundprinzip der Paläoseismologie. Ältere Schichten sind von einem Erdbeben versetzt worden, jüngere Schichten lagerten sich nach dem Beben ab und sind daher nicht versetzt. Durch die Datierung der beiden Schichten kann das Alter des Erdbebens eingegrenzt werden. Hier als Beispiel ein paläoseismologischer Schurf nahe Almaty, Kasachstan. Foto: Roberta Wilkinson.

Erdbeben-induzierte Massenbewegungen

Massenbewegungen wie Felsstürze, Murgänge, Erdrutsche oder Hangfließen zählen zu den häufigsten Begleiterscheinungen starker Erdbeben und können auch noch weit entfernt vom Epizentrum auftreten (Fan *et al.*, 2019). Dies ist abhängig von den geologischen und geomorphologischen Gegebenheiten wie Gesteinsart, Ausrichtung von Bruchsystemen, Hangneigung, Wassergehalt und anderen Faktoren, aber auch von der Stärke des Erdbebens (Jibson, 2009; Havenith *et al.*, 2016). Im Alpenraum sind zahlreiche koseismische Massenbewegungen sehr gut dokumentiert. Das berühmteste Beispiel ist sicherlich der Felssturz am Dobratsch, der am 25. Januar 1348 durch das Erdbeben von Friaul ausgelöst wurde (Lenhardt, 2007). Dieses Beben wird auch als Erdbeben von Villach bezeichnet, obschon historische Quellen nahelegen, dass das Epizentrum weiter südlich im Bereich des Kanaltals gelegen haben muss (Hammerl, 1994). Dasselbe Ereignis löste auch einen großen Felssturz am Veliki vrh in den slowenischen Karawanken aus (Merchel *et al.*, 2014). Nun treten aber gerade in den Alpen die allermeisten Massenbewegungen unabhängig von Erdbeben auf. Sollen prähistorische Erdbeben anhand von Massenbewegungen (also von kausal durch Erdbeben verursachten Phänomenen) identifiziert oder datiert werden, ist es daher zunächst notwendig zu zeigen, dass Erdbeben der verursachende Prozess waren. Eine Möglichkeit sind geotechnische Analysen, bei denen festgestellt wird, ob ein Hang in sich stabil war und zusätzlicher Energieeintrag in Form koseismischer Bodenbeschleunigung durch Oberflächenwellen benötigt wurde, um ihn in Bewegung zu setzen (e.g., Djukem *et al.*, 2020). Da starke Erdbeben meist viele Massenbewegungen auslösen, die häufig auch größer ausfallen als nicht-seismische, kann über die Datierung von vielen Massenbewegungen in einer Gegend auf seismische Erschütterung als Ursache geschlossen werden. Wenn also eine Vielzahl großer Erdrutsche und Felsstürze zur gleichen Zeit auftraten, spricht dies eher für ein Erdbeben. Dieser Ansatz wurde bei der Datierung des Basler Erdbebens von 1356 angewandt (Becker, 2023). Ein ähnlicher Ansatz wird in der Paläoseismologie lakustriner Archive verfolgt. Dort werden Massenbewegungen in Seen auf diese Weise analysiert. Daxer *et al.* (2022; 2020) verfolgten diesen Ansatz in Kärnten. Baroň *et al.* (2022) nutzen in ähnlicher Weise Höhlen als Erdbebenarchive in den Ostalpen.

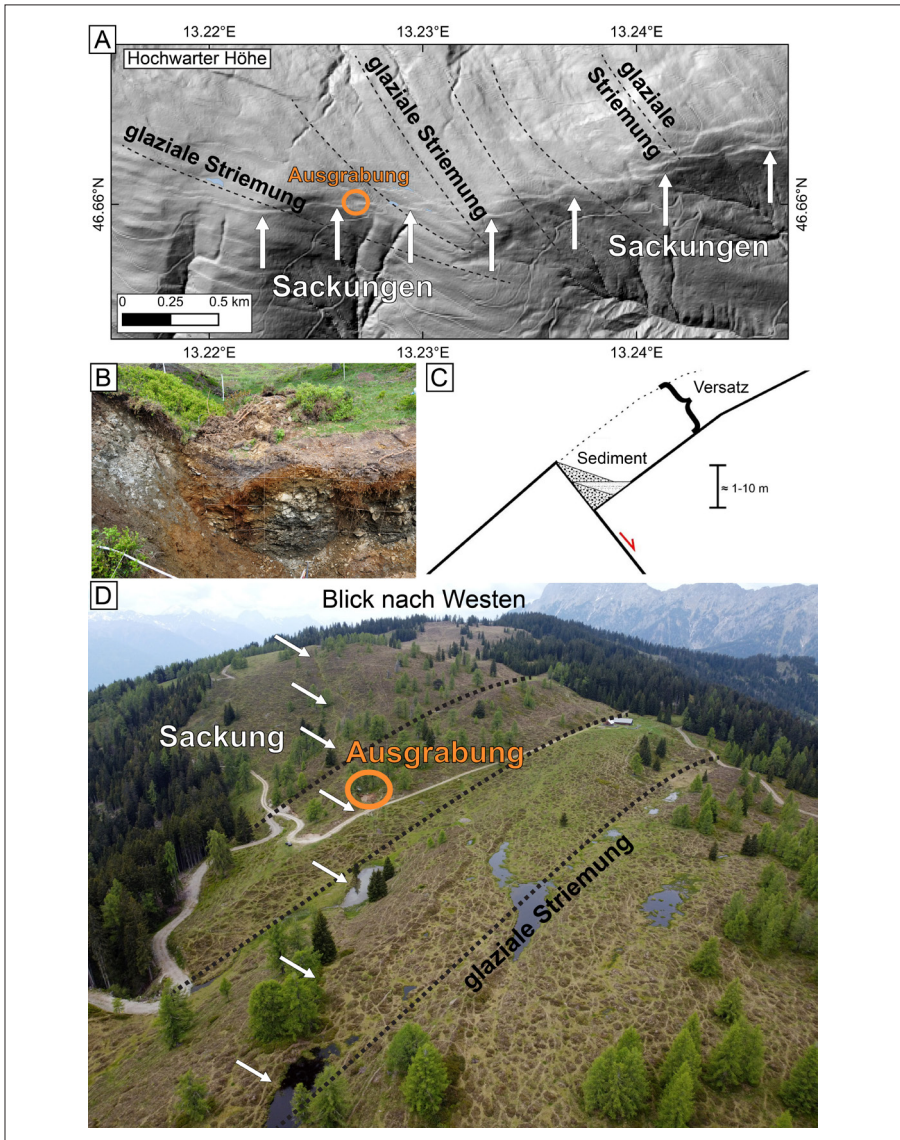


Abb. 4. (A) Digitales Höhenmodell der Hochwarter Höhe (KAGIS, 2020). Die gravitativen Sackungen schneiden die glaziale Striierung, sind also jünger als diese. (B) Schurf durch eine Sackung auf der Hochwarter Höhe. (C) Schematischer Aufbau einer Sackung, verändert nach Stubenrauch (2022). (D) Drohnenaufnahme der Sackungen auf der Hochwarter Höhe.

In Kärnten tritt eine weitere Form der Massenbewegungen gehäuft auf, sogenannte Sackungen oder Bergerreißungen. Dies sind Brüche, deren Bewegungsflächen bergwärts einfallen und welche hangparallele topographische Depressionen im Profil der Bergflanke verursachen (Abb. 4). In Senken bilden sich oftmals kleine Tümpel, in denen sich auch Sediment sammeln kann. Gelingt es, dieses Sediment zu datieren, kann man bestimmen, wann sich die Sackungen gebildet haben. Sackungen treten in der Regel im oberen Drittel oder gar in Kammlagen eines Berges auf. Meist werden Sackungen mit dem Abtauen der Gletscher nach der Eiszeit vor ca. 19.000 Jahren in Verbindung gebracht (Reitner *et al.*, 1993). Diese sorgten durch ihre ungeheure Erosionskraft für übertiefte Täler und übersteilte, langfristig instabile Bergflanken. Andererseits wurde beobachtet, dass eine große Anzahl von Sackungen infolge starker Erdbeben entstanden, zum Beispiel während des Denali-Erdbebens in Alaska im Jahre 2002 (Gorum *et al.*, 2014). Da die Sackungen sehr gut auf den hochauflösenden digitalen Geländemodellen Kärntens und Italiens auszumachen sind (Abb. 4a), konnten wir hunderte davon im Epizentralgebiet des 1348er Erdbebens kartieren (Stubenrauch, 2022). In dieser Arbeit stellten wir fest, dass es eine signifikante Häufung von Sackungen entlang der Fella-Sava-Störung gibt, die im Kanaltal verläuft, sowie eine weitere Häufung entlang der PAL. Interessant ist, dass die Sackungen fast ausschließlich Ost-West verlaufen und damit parallel zu den großen Störungen, obschon die Ausrichtung der Täler keine derartige Vorzugsrichtung aufweist. Auch treten die Sackungen unabhängig von der Tiefe der Täler, der Orientierung von Bruchrichtungen und der Geologie auf (Stubenrauch, 2022). Dies deutet darauf hin, dass die großen Verwerfungen mit den Sackungen ursächlich in Verbindung stehen. Vorläufige Datierungsergebnisse der Sedimentfüllung einer ausgegrabenen Sackung auf der Hochwarter Höhe ergaben ein ^{14}C -Mindestalter von ca. 4000 Jahren (Abb. 4b). Dieses relativ junge Alter könnte darauf hinweisen, dass das Abschmelzen der Gletscher nicht unmittelbar zur Bildung aller Sackungen im Gailtal geführt hat und dass somit auch andere Prozesse wie Erdbeben bei der Bildung von Sackungen eine Rolle gespielt haben könnten. Da, wie oben erwähnt, der größte Teil Kärntens während der Eiszeit von Gletschern bedeckt und dadurch intensiver Erosion ausgesetzt war, lassen sich auch mit dieser Methode nur Erdbeben finden, die nach dem LGM auftraten.

Direkte Datierung von Erdbeben (OSL, ESR)

Zwei neue Methoden zur Datierung noch älterer Erdbeben konzentrieren sich auf die Kernzone der Verwerfung. Das ist die Zone, in der über Millionen von Jahren der größte Teil der Bewegung an der Störung stattgefunden hat. Infolgedessen sind die Gesteine der Kernzone am intensivsten zerschert und zu kohäsionslosem Störungsletten (engl. *fault gouge*) mit Korngrößen im Bereich von Silt bis Ton zermahlen worden. Diese Schwächezonen sind wiederum die wahrscheinlichsten Scherbahnen für die vergangenen und zukünftigen Starkbeben. Die Grundannahme der Methoden ist, dass bei einem starken Erdbeben ausreichend Reibungswärme erzeugt wird, um die Gesteine in der Kernzone der Störung signifikant aufzuheizen. Der Zeitpunkt der Aufheizung lässt sich in Mineralen wie Quarz und Kalifeldspat messen. In Gesteinen, die diese Minerale enthalten, finden fortlaufend natürliche radioaktive Zerfallsprozesse statt. Dabei entsteht energiereiche Strahlung, die die Verschiebung von negativ geladenen Elektronen von ihrem Valenzband auf höhere Leitungsbänder bewirkt. Es entstehen so Defekte im Kristallgitter. Je länger dies ungestört passiert, umso mehr Kristalldefekte können akkumulieren, bis eine Sättigung nach einigen Hunderttausend Jahren eintritt. Dies funktioniert allerdings nur, solange die Minerale unterhalb einer bestimmten Temperatur bleiben und solange sie keinem Sonnenlicht ausgesetzt sind. Sowohl Hitze als auch Sonnenlicht sorgen dafür, dass die Kristalldefekte zurückgesetzt werden. Dies geschieht innerhalb weniger Sekunden und geht mit der Freisetzung der in den Defekten gespeicherten Energie in Form eines Lichtblitzes einher, dem sogenannten Lumineszenzsignal. Nach einem Zurücksetzen des Signals können sich die Kristalldefekte erneut aufbauen, wenn die Minerale abgekühlt oder nicht mehr dem Sonnenlicht, aber weiterhin den natürlichen radioaktiven Zerfallsprozessen ausgesetzt sind. Je mehr Kristalldefekte im Mineral gespeichert waren - und damit je länger das Mineral keine Sonne oder keine Hitze erfahren hat -, desto höher ist die Intensität dieses Signals (Abb. 5). Genau dies macht man sich für die Datierung zu Nutze. Im Gelände werden hierfür Proben von Störungsletten aus dem Kernbereich der Störung entnommen und, in Stahlzylindern vor Licht geschützt, in einem Rotlichtlabor präpariert, denn rotes, langwelliges Licht setzt das natürliche Lumineszenzsignal nicht zurück. Dazu gehören die Trennung nach Korngrößen sowie die Isolierung und Reinigung von Feldspäten und Quarzen. Anschließend werden die Proben kontrolliert mit Laserlicht bestrahlt und so das Lumi-

neszenzsignal gemessen. Kennt man nun noch die (im Labor zu bestimmende) radioaktive Hintergrundstrahlung in der unmittelbaren natürlichen Umgebung der Probe, kann berechnet werden, wann die Probe letztmalig Sonnenlicht oder Hitze ausgesetzt war. Dieses Verfahren wird optisch stimulierte Lumineszenz (OSL) genannt (Aitken, 1998). Bei einer verwandten Methode, der Elektronenspinresonanzmessung (ESR), macht man sich dieselben Defekte im Kristallgitter zunutze, misst jedoch die magnetischen Eigenschaften der Elektronen mit Mikrowellenstrahlung. Mit der OSL-Methode kann man Alter von bis zu einigen wenigen hunderttausend Jahren bestimmen; ESR erlaubt eine Datierung von bis zu 2 Millionen Jahren. Durch die Kombination der beiden Verfahren ist es daher möglich, obere und untere Altersgrenzen für seismische Bewegungen an Störungen zu messen (Tsukamoto *et al.*, 2020). Für beide Methoden genügt es, dass sich das Gestein auf unter 100°C aufgeheizt hat (Toyoda & Ikeya, 1991). Sowohl OSL als auch ESR wurden erfolgreich zur absoluten Datierung von starken Erdbeben eingesetzt (Fukuchi, 1992; Yang *et al.*, 2019).

Entlang der PAL beprobten wir vier Lokationen für OSL- und ESR-Datierungen (Abb. 6a), davon eine in Italien, zwei in Österreich und eine in Slowenien. Wir konzentrierten uns dabei möglichst auf Vorkommen von Tonalit in der Kernzone der PAL, da aus Tonalit entstandene Störungsletten die geeignete Mineralzusammensetzung aufweisen (Abb. 6b). Die Kernzonen der PAL wurden jeweils mehrfach mit Stahlzylindern beprobt (Abb. 6c) und die Proben wurden am Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik in Hannover analysiert.

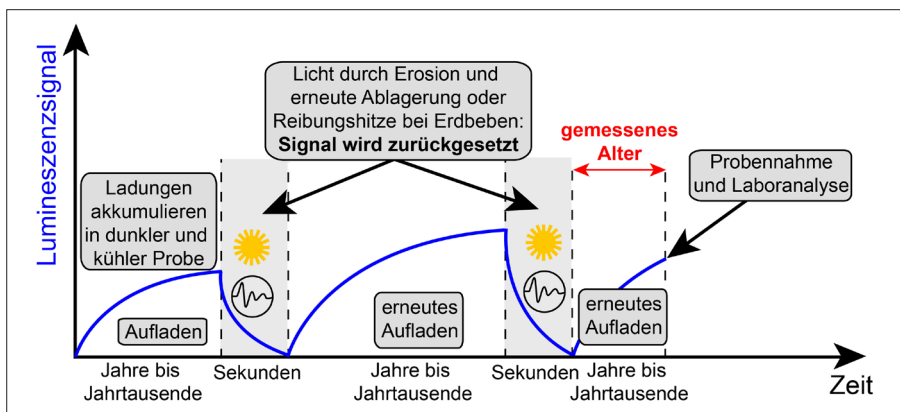


Abb. 5. Prinzip der Lumineszenzdatierung. Verändert nach Mahan *et al.* (2023).

Aufgrund der geringen seismischen Aktivität der PAL sind unsere vorläufigen Ergebnisse mit einigen Unsicherheiten behaftet. Die Datierung ergab jedoch, dass an allen beprobten Lokationen der PAL in der letzten Million Jahre genügend Reibungswärme nahe der Oberfläche erzeugt wurde, um die OSL- und ESR-Signale zu beeinflussen. Starke Beben traten also mindestens im mittleren Pleistozän auf (Prince *et al.*, 2024). Unsere Methode erlaubt natürlich keine Aussagen darüber, ob es nicht auch später Beben gab, die nicht genügend Reibungswärme an den Probennahmepunkten erzeugten. Schwächere Beben, die lokal dennoch verheerend gewesen sein konnten, kann man mit der OSL- und ESR-Methode nicht erkennen. Auch gibt die Methode keine Auskunft über die

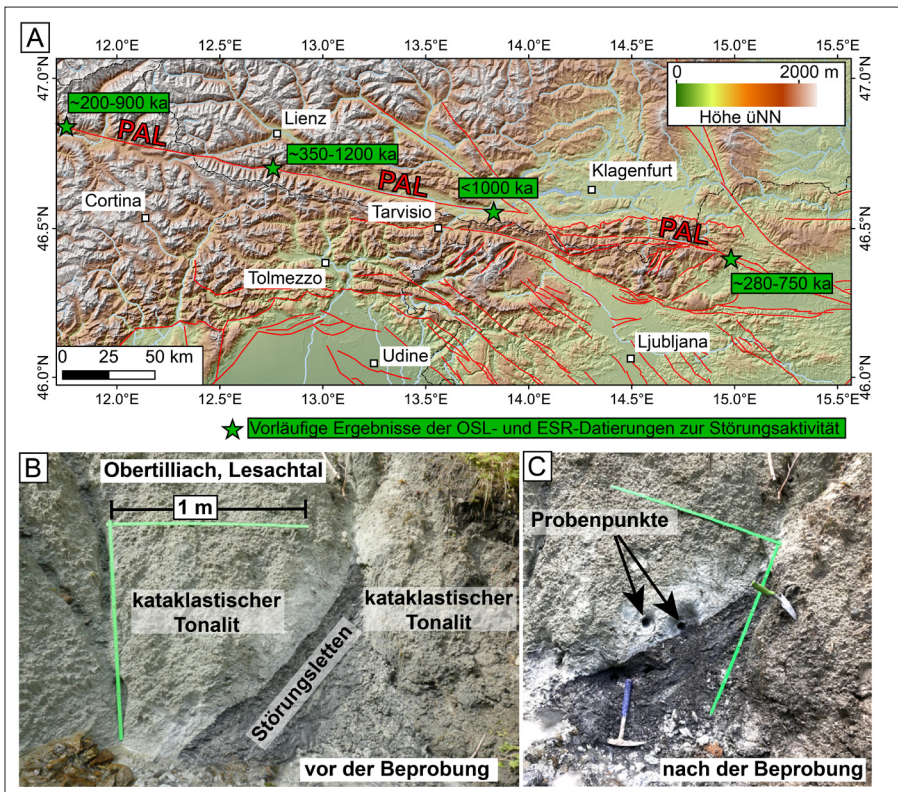


Abb. 6. (A) Vorläufige Ergebnisse der OSL- und ESR-Datierungen an der PAL. Die Alter in tausenden Jahren (ka) geben an, dass in diesem Zeitraum die Störung sicher aktiv war. (B) Aufschluss der Störung nahe Obertilliach vor der Probenahme. (C) Aufschluss nach Probenahme.

Magnitude des Erdbebens oder den koseismischen Versatz entlang der Störung; die Eignung von OSL oder ESR für paläoseismologische Fragenstellungen ist also begrenzt.

Insbesondere OSL hat auch zahlreiche weitere interessante Anwendungen im Bereich der Erdbebengeologie. Häufig wird OSL eingesetzt, um das Alter von Ablagerungen in der klassischen Paläoseismologie zu bestimmen (z.B. Grützner *et al.*, 2017). In Kärnten haben wir die OSL-Methode benutzt, um das Alter von Sedimenten im östlichen Klagenfurter Becken zu bestimmen, die keine Verformung durch aktive Störungen aufweisen (Mücklich, 2022). Hier konnten wir nachweisen, dass sich bestimmte Störungen in den letzten ca. 30.000-50.000 Jahren nicht signifikant bewegt haben.

Pseudotachylite

Durch Erdbeben verursachte Reibungswärme ist auch verantwortlich für die Bildung sogenannter Pseudotachylite. Dies sind verglaste Gesteinsschmelzen von meist schwarzer Farbe, die durch sehr schnelle Erhitzung über den Schmelzpunkt und rasche anschließende Abkühlung entstehen (Abb. 7). Durch Erdbeben erzeugte Pseudotachylite werden daher nur in mehreren Kilometern Tiefe gebildet, wo die Umgebungstemperatur hoch genug ist, dass der Schmelzpunkt durch die zusätzliche Reibungshitze und den Umgebungsdruck kurzzeitig überschritten werden kann. In Österreich sind störungsgebundene Pseudotachylite zum Beispiel an der Deferegggen-Antholz-Vals-Linie in Osttirol von Schulz (1989) beschrieben worden. Aus der Silvretta sind weitere, auch jüngst bearbeitete Vorkommen bekannt (e.g. Pittarello *et al.*, 2022). Auch während des Köfels-Bergsturzes im Tiroler Ötztal vor ca. 8700 Jahren hat sich die Gleitfläche so stark erhitzt, dass kurzzeitig Gesteinsschmelzen (Frikzionite) auftraten (Erismann *et al.*, 1977; Masch *et al.*, 1985).

In Kärnten sind Pseudotachylite von der PAL bekannt. Die geologischen Karten von Sillian (Blatt 195) und Obertilliach (Blatt 196) der geologischen Bundesanstalt (Schönlaub, 1997; 2000) im Maßstab 1:50.000 vermerken dort Störungsgesteine als „Tonalit, Tonalit bis Kataklasit, Pseudotachylit“. Sprenger (1996) untersuchte die PAL in diesem Abschnitt detailliert und beschrieb auch die Reibungsschmelzen. Im Rahmen einer geologischen Kartierung der PAL haben wir weitere Gneise mit Pseudotachyliten nahe Obertilliach im Lesachtal gefunden (Bühlhoff, 2022). Vom Aufschluss- bis zum Dünnschliffmaßstab

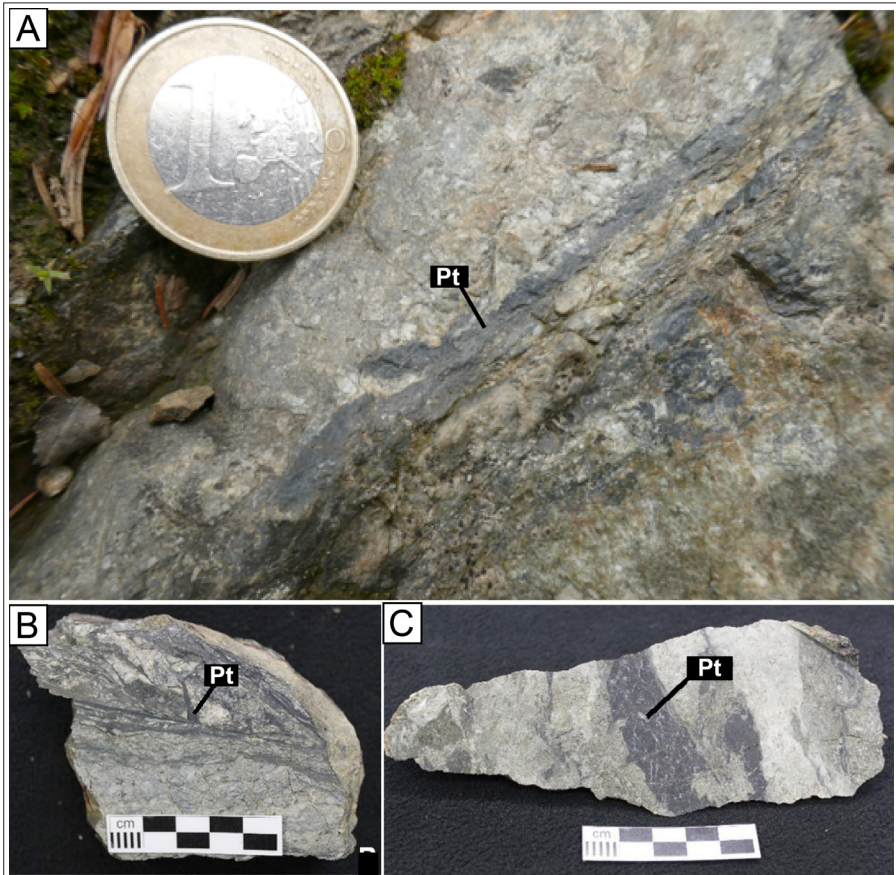


Abb. 7. Pseudotachylite in Gneisen aus dem Lesachtal. (A) Aufschluss bei Obertilliach. (B), (C) Angeschliffene Handstücke im Labor. Die schwarzen Adern (Pt) sind durch Reibungswärme während vergangener Erdbeben entstandene und anschließend zu amorphem Glas erstarrte Gesteinsschmelze. Diese Phänomene werden Pseudotachylite genannt.

zeigen unsere Proben Injektionsadern, die belegen, dass die Gesteinsschmelzen unter hohen Fluidrücken in das Nachbargestein gepresst wurden und dabei präexistente Schieferungen in den Gneisen abgeschnitten haben. Unter dem Mikroskop zeigen die Pseudotachylite bei kreuzpolarisiertem Licht zum Teil optische Isotropie und scharfe Ränder zum Umgebungsgestein. Dies deutet auf einen hohen Grad an Lokalisation der Reibungswärme hin, mithin darauf, dass die Hauptbruchfläche während des Erdbebens den weitaus größten Teil der Be-

wegung aufgenommen hat. Mikroskopisch sind bisweilen auch gut gerundete Quarz- und Feldspat-Klasten innerhalb der Pseudotachylite erhalten. Kristallwasser führende Schichtsilikate hingegen fehlen, was darauf hindeutet, dass diese während der seismischen Ereignisse infolge der Reibungswärme schockartig aufgeschmolzen wurden; dabei freigesetztes Wasser bewirkte eine Erhöhung der Porenflüssigkeitsdrücke im Gestein. Dies wiederum hatte eine volumetrische Ausdehnung zur Folge, welche vermutlich die beobachtete Ausbreitung von Brüchen ins Nebengestein ermöglichte (Abb. 7). Dieser Effekt ist als ‚*thermal pressurization*‘ bekannt (e.g., Lin, 2019). Stellenweise finden sich in den glasigen Bereichen Sphärolithe, welche auf eine beginnende Entglasung der Pseudotachylite hindeuten. Grundsätzlich erschwert tektonische Aktivität nach der Bildung der Pseudotachylite deren Analyse, da die charakteristischen Gesteinsstrukturen überprägt werden. Eine direkte Datierung dieser fossilen Erdbeben wurde von unserer Arbeitsgruppe bislang noch nicht in Angriff genommen. Jedoch liegen von Pseudotachyliten aus dem weiter westlich liegenden Pustertal Bildungsalter von 20 bis 22 Millionen Jahren vor (Müller *et al.*, 2001). Diese Alter zeugen also davon, dass die PAL über einen sehr langen Zeitraum von 20 Millionen Jahren hinweg immer wieder Episoden starker seismischer Aktivität aufgewiesen hat. Da die Pseudotachylite im Gegensatz zu Störungsletten nicht oberflächennah, sondern in der mittleren bis tieferen Kruste gebildet wurden, belegt deren Vorkommen heute an der Erdoberfläche auch Jahrtausende währende Exhumation der überlagernden Gesteinsabfolgen. Variierende Erosions- und Exhumationsraten sowie sich ändernde Spannungsfelder in den letzten 20 Millionen Jahren erschweren natürlich eine tiefgründige Interpretation der Pseudotachylite.

Ausblick

In diesem Artikel beschreiben wir eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Datierung von starken Erdbeben, die in den Ostalpen und speziell an der PAL angewendet wurden. Wir hoffen zeigen zu können, dass insbesondere nur eine Kombination verschiedener Methoden das gesamte zeitliche Spektrum der Erdbebenaktivität abzudecken imstande ist. Notwendigerweise ist es mit den uns heute zur Verfügung stehenden Verfahren nur sehr beschränkt möglich, auch kleinere Erdbeben, die keinen signifikanten Versatz an der Störung erzeugt haben, nachzuweisen, insbesondere wenn diese schon lange zurück liegen. Durch zunehmend verfeinerte Datierungsmethoden und vor allem durch innovative

Ansätze, die die Datierung unterschiedlicher geologischer Materialien auf verschiedenen Zeitskalen ermöglichen, sind jedoch in den letzten Jahrzehnten erhebliche Fortschritte bei der Analyse großer Störungssysteme möglich geworden.

Die Vorhersage von Erdbeben wird auch auf absehbare Zeit nur schwer möglich sein, zum Beispiel wenn Vorbeben dem Hauptereignis vorausgehen. Ein besseres Verständnis der seismischen Geschichte einer Verwerfung erlaubt uns jedoch immerhin eine statistische Abschätzung des seismischen Risikos. Denn dort, wo in den letzten Jahrtausenden starke Beben vorgekommen sind, sind diese auch in Zukunft wieder zu erwarten, wenn sich das Spannungsfeld in der Kruste nicht ändert. Man kann weder den genauen Zeitpunkt noch die Stärke zukünftiger Ereignisse verlässlich bestimmen, aber wir wissen mittlerweile viel über die Störungen, die überhaupt solche Beben verursachen können, und wir können daraus Szenarien ableiten, was im schlimmsten Falle passieren kann. Letztlich können entsprechende Vorsorge- und Vorbereitungsmaßnahmen getroffen werden, wenn man sich in einer Erdbebenzone befindet.

Danksagung

Wir danken den Organisatorinnen und Organisatoren des Symposiums „Kärnten beb(t)e – Neue Fragen und Aspekte zur Archäoseismologie“, das am 24.11.2023 im kärnten.museum stattfand. Ein großer Teil unserer Forschungsarbeiten wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG in den beiden Projekten 365171455 and 442570483 finanziert. Unser Dank gilt allen Beteiligten der AlpArray-Initiative und des Sonderforschungsbereiches „SPP2017 – Mountain building processes in 4D“. Besonderen Dank möchten wir an Gerlinde Ortner und alle Grundeigentümer aussprechen, die uns die Grabungsarbeiten auf der Hochwarter Höhe und der Göriacher Alm ermöglicht und uns mit Neugier und Herzlichkeit empfangen haben.

LITERATUR

- Aiman, Y.A., Delorey, A.A., Lu, Y., and Bokelmann, G., 2023, SHmax orientation in the Alpine region from observations of stress-induced anisotropy of nonlinear elasticity: *Geophysical Journal International*, v. 235, no. 3, p. 2137–2148, doi: 10.1093/gji/ggad353.
- Aitken, M.J., 1998, *An introduction to optical dating: The dating of Quaternary sediments by the use of photon-stimulated luminescence*: Oxford, New York, Oxford University Press, Oxford science publications, 267 p.

- Ambraseys, N., and Psycharis, I.N., 2012, Assessment of the long-term seismicity of Athens from two classical columns: *Bulletin of Earthquake Engineering*, v. 10, p. 1635–1666.
- Atanackov, J., Jamšek Rupnik, P., Jež, J., Celarc, B., Novak, M., Milanič, B., Markelj, A., Bavec, M., and Kastelic, V., 2021, Database of Active Faults in Slovenia: Compiling a New Active Fault Database at the Junction Between the Alps, the Dinarides and the Pannonian Basin Tectonic Domains: *Frontiers in Earth Science*, v. 9, doi: 10.3389/feart.2021.604388.
- Bagagli, M., Molinari, I., Diehl, T., Kissling, E., Giardini, D., Clinton, J., Scarabello, L., Käestli, P., Racine, R., Massin, F., Pahor, J., Živčić, M., Plenefisch, T., Jia, Y., Csicsay, K., Ivančić, I., Hetényi, G., Abreu, R., Allegretti, I., Apoloner, M.-T., Aubert, C., Besançon, S., Bès de Berc, M., Brunel, D., Capello, M., Čarman, M., Cavaliere, A., Chèze, J., Chiarabba, C., Cougoulat, G., Cristiano, L., Czifra, T., D’Alema, E., Danesi, S., Daniel, R., Dannowski, A., Dasović, I., Deschamps, A., Egdorf, S., Fiket, T., Fischer, K., Funke, S., Govoni, A., Gröschl, G., Heimers, S., Heit, B., Herak, D., Huber, J., Jarić, D., Jedlička, P., Jund, H., Kligen, S., Klotz, B., Kolínský, P., Kotek, J., Kühne, L., Kuk, K., Lange, D., Loos, J., Lovati, S., Malengros, D., Maron, C., Martin, X., Massa, M., Mazzarini, F., Métrol, L., Moretti, M., Munzarová, H., Nardi, A., Péquegnat, C., Petersen, F., Piccinini, D., Pondrelli, S., Prevollnik, S., Régnier, M., Reiss, M., Salimbeni, S., Santulin, M., Scherer, W., Schippkus, S., Schulte-Kortnack, D., Solarino, S., Spieker, K., Stipčević, J., Strollo, A., Süle, B., Szanyi, G., Szűcs, E., Thorwart, M., Ueding, S., Vallocchia, M., Vecsey, L., Voigt, R., Weidle, C., Weyland, G., Wiemer, S., Wolf, F., Wolyniec, D., and Zieke, T., 2022, The AlpArray Research Seismicity-Catalogue: *Geophysical Journal International*, v. 231, no. 2, p. 921–943, doi: 10.1093/gji/ggac226.
- Baraň, I., Plan, L., Grasemann, B., Melichar, R., Mitrović-Woodell, I., Rowberry, M., and Scholz, D., 2022, Three large prehistoric earthquakes in the Eastern Alps evidenced by cave rupture and speleothem damage: *Geomorphology*, v. 408, p. 108242, doi: 10.1016/j.geomorph.2022.108242.
- Bavec, M., Atanackov, J., Celarc, B., Hajdas, I., Jamšek Rupnik, P., Jež, J., Kastelic, V., Milanič, B., Novak, M., Skaberne, G., and Žibret, G., 2013, Evidence of Idrija fault seismogenic activity during the Late Holocene including the 1511 Mm 6.8 earthquake, *in* Grützner, C., Rudersdorf, A., et al., eds., *Seismic hazard, critical facilities and slow active faults: Proceedings of the 4th International INQUA Meeting on Paleoseismology, Active Tectonics and Archeoseismology*, 9–14 October 2013; Pata days, 1. ed. ed.: Aachen, RWTH, p. 23–26.
- Becker, A., 2023, Felsstürze ausgelöst durch das Basel-Erdbeben vom 18. Oktober 1356: *Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins*, v. 105, p. 257–283, doi: 10.1127/jmogr/105/0011.
- Bühlhoff, M., 2022, Spurensuche nach Pseudotachyiten an der Pustertal-Gailtal-Linie der östlichen Periadriatischen Störungszone [Bachelorarbeit]: Jena, FSU Jena, 145 p.
- Caputo, R., and Helly, B., 2008, The use of distinct disciplines to investigate past earthquakes: *Tectonophysics*, v. 453, 1-4, p. 7–19, doi: 10.1016/j.tecto.2007.05.007.
- Daxer, C., Ortler, M., Fabbri, S.C., Hilbe, M., Hajdas, I., Dubois, N., Piechl, T., Hammerl, C., Strasser, M., and Moernaut, J., 2022, High-resolution calibration of seismically-induced lacustrine deposits with historical earthquake data in the Eastern Alps (Carinthia, Austria): *Quaternary Science Reviews*, v. 284, p. 107497, doi: 10.1016/j.quascirev.2022.107497.
- Daxer, C., Sammartini, M., Molenaar, A., Piechl, T., Strasser, M., and Moernaut, J., 2020, Morphology and spatio-temporal distribution of lacustrine mass-transport deposits in Wörthersee, Eastern Alps, Austria, *in* Georgiopolou, A., Amy, L.A., et al., eds., *Subaqueous Mass Movements and their Consequences: Advances in Process Understanding, Monitoring and Hazard Assessments*. Geological Society, London, Special Publications, Volume 500, p. 235–254.
- Djukem, W.D.L., Braun, A., Woutatong, A.S.L., Guedjeo, C., Dohmen, K., Wotchoko, P., Fernandez-Steeger, T.M., and Havenith, H.-B., 2020, Effect of Soil Geomechanical Properties and Geo-

- Environmental Factors on Landslide Predisposition at Mount Oku, Cameroon: *International journal of environmental research and public health*, v. 17, no. 18, doi: 10.3390/ijerph17186795.
- Erismann, T., Heuberger, H., and Preuss, E., 1977, Der Bimsstein von Köfels (Tirol), ein Bergsturz-“Friktionit“: *TMPM Tschermarks Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, v. 24, 1-2, p. 67–119, doi: 10.1007/BF01081746.
- Fan, X., Scaringi, G., Korup, O., West, A.J., van Westen, C.J., Tanyas, H., Hovius, N., Hales, T.C., Jibson, R.W., Allstadt, K.E., Zhang, L., Evans, S.G., Xu, C., Li, G., Pei, X., Xu, Q., and Huang, R., 2019, Earthquake-Induced Chains of Geologic Hazards: Patterns, Mechanisms, and Impacts: *Reviews of Geophysics*, v. 57, no. 2, p. 421–503, doi: 10.1029/2018RG000626.
- Fukuchi, T., 1992, ESR studies for absolute dating of fault movements: *Journal of the Geological Society*, v. 149, no. 2, p. 265–272, doi: 10.1144/gsjgs.149.2.0265.
- Galadini, F., Hinzen, K.-G., and Stiros, S., 2006, Archaeoseismology: Methodological issues and procedure: *Journal of Seismology*, v. 10, no. 4, p. 395–414, doi: 10.1007/s10950-006-9027-x.
- Galadini, F., Poli, M.E., and Zanferrari, A., 2005, Seismogenic sources potentially responsible for earthquakes with $M \geq 6$ in the eastern Southern Alps (Thiene-Udine sector, NE Italy): *Geophysical Journal International*, v. 161, no. 3, p. 739–762, doi: 10.1111/j.1365-246X.2005.02571.x.
- Gorum, T., Korup, O., van Westen, C.J., van der Meijde, M., Xu, C., and van der Meer, F.D., 2014, Why so few? Landslides triggered by the 2002 Denali earthquake, Alaska: *Quaternary Science Reviews*, v. 95, p. 80–94, doi: 10.1016/j.quascirev.2014.04.032.
- Grünthal, G., Wahlström, R., and Stromeyer, D., 2013, The SHARE European Earthquake Catalogue (SHEEC) for the time period 1900–2006 and its comparison to the European-Mediterranean Earthquake Catalogue (EMEC): *Journal of Seismology*, v. 17, no. 4, p. 1339–1344, doi: 10.1007/s10950-013-9379-y.
- Grützner, C., Aschenbrenner, S., Jamšek Rupnik, P., Reicherter, K., Saifelislam, N., Vičič, B., Vrabc, M., Welte, J., and Ustaszewski, K., 2021, Holocene surface-rupturing earthquakes on the Dinaric Fault System, western Slovenia: *Solid Earth*, v. 12, no. 10, p. 2211–2234, doi: 10.5194/se-12-2211-2021.
- Grützner, C., Carson, E., Walker, R.T., Rhodes, E.J., Mukambayev, A., Mackenzie, D., Elliott, J.R., Campbell, G., and Abdrakhmatov, K., 2017, Assessing the activity of faults in continental interiors: Palaeoseismic insights from SE Kazakhstan: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 459, p. 93–104, doi: 10.1016/j.epsl.2016.11.025.
- Hammerl, C., 1994, The earthquake of January 25th, 1348: discussion of sources., in Albini, P., Moroni, A., eds., *Historical Investigation of European Earthquakes: Materials of the CEC project. Review of Historical Seismicity in Europe: Milano. Historical Investigation of European Earthquakes, Volume 2*, p. 225–240.
- Hammerl, C., 1995, Das Erdbeben vom 4. Mai 1201: *Mitteilungen des Instituts für österreichische Geschichtsforschung*, v. 103, p. 350–368.
- Hammerl, C., 2014, *Historische Erdbebenforschung in Österreich – Entwicklung und Hintergrundwissen am Beispiel des Bebens von 1590 in Niederösterreich: Berichte der Geologischen Bundesanstalt*, v. 107, p. 26–28.
- Hammerl, C., and Lenhardt, W., 1997, *Erdbeben in Österreich: Graz, Leykam*, 192 p.
- Havenith, H.-B., Torgoev, A., Braun, A., Schlögel, R., and Micu, M., 2016, A new classification of earthquake-induced landslide event sizes based on seismotectonic, topographic, climatic and geologic factors: *Geoenvironmental Disasters*, v. 3, no. 1, p. 1–24, doi: 10.1186/s40677-016-0041-1.
- Heidbach, O., Rajabi, M., Cui, X., Fuchs, K., Müller, B., Reinecker, J., Reiter, K., Tingay, M., Wenzel, F., Xie, F., Ziegler, M.O., Zoback, M.-L., and Zoback, M., 2018, *The World Stress Map*

- database release 2016: Crustal stress pattern across scales: *Tectonophysics*, v. 744, p. 484–498, doi: 10.1016/j.tecto.2018.07.007.
- Hintersberger, E., Decker, K., Lomax, J., and Lüthgens, C., 2018, Implications from palaeoseismological investigations at the Markgrafeneusiedl Fault (Vienna Basin, Austria) for seismic hazard assessment: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 18, no. 2, p. 531–553, doi: 10.5194/nhess-18-531-2018.
- Hinzen, K.-G., and Oemisch, M., 2001, Location and Magnitude from Seismic Intensity Data of Recent and Historic Earthquakes in the Northern Rhine Area, Central Europe: *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 91, no. 1, p. 40–56, doi: 10.1785/0120000036.
- Hofman, L.J., Kummerow, J., Cesca, S., and AlpArray–Swath-D Working Group, 2023, A new seismicity catalogue of the eastern Alps using the temporary Swath-D network: *Solid Earth*, v. 14, no. 10, p. 1053–1066, doi: 10.5194/se-14-1053-2023.
- James P. McCalpin, editor, 2009, *Paleoseismology*, Academic Press, International Geophysics, 629 p.
- Jibson, R.W., 2009, Chapter 8 Using Landslides for Paleoseismic Analysis, *in* James P. McCalpin, ed., *Paleoseismology*, Academic Press. International Geophysics, p. 565–601.
- KAGIS, 2020, Digitales Höhenmodell von Kärnten: <https://gis.ktn.gv.at/webgisviewer/atlas-mobile/map/Basiskarten/H%C3%B6heninformation>.
- Laubscher, H.P., 1971, The large-scale kinematics of the western Alps and the northern Apennines and its palinspastic implications: *American Journal of Science*, v. 271, no. 3, p. 193–226, doi: 10.2475/ajs.271.3.193.
- Lenhardt, W.A., 2007, Earthquake-Triggered Landslides in Austria - Dobratsch Revisited: *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, v. 147, 1-2, p. 193–199.
- Lin, A., 2019, Thermal pressurization and fluidization of pulverized cataclastic rocks formed in seismogenic fault zones: *Journal of Structural Geology*, v. 125, p. 278–284, doi: 10.1016/j.jsg.2017.12.010.
- Mahan, S.A., Rittenour, T.M., Nelson, M.S., Ataei, N., Brown, N., DeWitt, R., Durcan, J., Evans, M., Feathers, J., Frouin, M., Guérin, G., Heydari, M., Huot, S., Jain, M., Keen-Zebert, A., Li, B., López, G.L., Neudorf, C., Porat, N., Rodrigues, K., Sawakuchi, A.O., Spencer, J.Q., and Thomsen, K., 2023, Guide for interpreting and reporting luminescence dating results: *GSA Bulletin*, v. 135, 5-6, p. 1480–1502, doi: 10.1130/B36404.1.
- Marco, S., Agnon, A., Ellenblum, R., Eidelman, A., Basson, U., and Boas, A., 1997, 817-Year-old walls offset sinistrally 2.1 m by the Dead Sea transform, Israel: *Journal of Geodynamics*, v. 24, 1-4, p. 11–20, doi: 10.1016/S0264-3707(96)00041-5.
- Masch, L., Wenk, H.R., and Preuss, E., 1985, Electron microscopy study of hyalomylonites—evidence for frictional melting in landslides: *Tectonophysics*, v. 115, 1-2, p. 131–160, doi: 10.1016/0040-1951(85)90103-9.
- Merchel, S., Mrak, I., Braucher, R., Benedetti, L., Repe, B., Bourlès, D.L., and Reitner, J.M., 2014, Surface exposure dating of the Veliki vrh rock avalanche in Slovenia associated with the 1348 earthquake: *Quaternary Geochronology*, v. 22, p. 33–42, doi: 10.1016/j.quageo.2014.02.002.
- Métois, M., D’Agostino, N., Avallone, A., Chamot-Rooke, N., Rabaute, A., Duni, L., Kuka, N., Koci, R., and Georgiev, I., 2015, Insights on continental collisional processes from GPS data: Dynamics of the peri-Adriatic belts: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 120, no. 12, p. 8701–8719, doi: 10.1002/2015jb012023.
- Mücklich, M., 2022, The Last Glacial Maximum in the Klagenfurt Basin, Austria: New insights in the Middle-Late Pleistocene Stratigraphy from Optically Stimulated Luminescence dating and geomorphological observations [Masterarbeit]: Jena, FSU Jena, 66 p.

- Müller, W., Prosser, G., Mancktelow, N.S., Villa, I.M., Kelley, S.P., Viola, G., and Oberli, F., 2001, Geochronological constraints on the evolution of the Periadriatic Fault System (Alps): *International Journal of Earth Sciences*, v. 90, no. 3, p. 623–653, doi: 10.1007/s005310000187.
- Pittarello, L., Levi, N., Wegner, W., and Stehlik, H., 2022, The pseudotachylytes at the base of the Silvretta Nappe: A newly discovered recent generation and the tectonometamorphic evolution of the Nappe: *Tectonophysics*, v. 822, p. 229185, doi: 10.1016/j.tecto.2021.229185.
- Prince, E., Tsukamoto, S., Grützner, C., Vrabec, M., and Ustaszewski, K., 2024, Not too old to rock: ESR and OSL dating reveal Quaternary activity of the Periadriatic Fault in the Alps: *Earth, Planets and Space*, v. 76, no. 1, doi: 10.1186/s40623-024-02015-6.
- Reitner, J., Lang, M., and van Husen, D., 1993, Deformation of high slopes in different rocks after Würmian deglaciation in the Gailtal (Austria): *Quaternary International*, v. 18, p. 43–51.
- Schmid, S.M., Aebli, H.R., Heller, F., and Zingg, A., 1989, The role of the Periadriatic Line in the tectonic evolution of the Alps: *Geological Society, London, Special Publications*, v. 45, no. 1, p. 153–171, doi: 10.1144/gsl.Sp.1989.045.01.08.
- Schönlaub, H.P., 1997, *Geologische Karte der Republik Österreich 1:50000*, 196 Obertilliach: Wien, Geologische Bundesanstalt.
- Schönlaub, H.P., 2000, *Geologische Karte der Republik Österreich 1:50000*, 195 Sillian: Wien, Geologische Bundesanstalt.
- Schulz, B., 1989, Jungalpidische Gefügeentwicklung entlang der Defereggan-Antholz-Vals-Linie (Osttirol, Österreich): *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, v. 132, p. 775–789.
- Sintubin, M., 2011, Archaeoseismology: Past, present and future: *Quaternary International*, v. 242, no. 1, p. 4–10, doi: 10.1016/j.quaint.2011.03.056.
- Sprenger, W.L., 1996, *Das Periadriatische Lineament südlich der Lienzer Dolomiten: Zugl.: München, Univ., Diss., 1995: Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt*, v. 52, p. 1–220.
- Stubenrauch, J., 2022, *Active tectonics and tectonic geomorphology in the region of the Fella-Sava Fault [Masterarbeit]: Jena, FSU Jena*, 75 p.
- Stucchi, M., Rovida, A., Gomez Capera, A.A., Alexandre, P., Camelbeeck, T., Demircioglu, M.B., Gasperini, P., Kouskouna, V., Musson, R.M.W., Radulian, M., Sesetyan, K., Vilanova, S., Baumont, D., Bungum, H., Fäh, D., Lenhardt, W., Makropoulos, K., Martinez Solares, J.M., Scotti, O., Živčić, M., Albini, P., Batlo, J., Papaioannou, C., Tatevossian, R., Locati, M., Meletti, C., Viganò, D., and Giardini, D., 2013, The SHARE European Earthquake Catalogue (SHEEC) 1000–1899: *Journal of Seismology*, v. 17, no. 2, p. 523–544, doi: 10.1007/s10950-012-9335-2.
- Toyoda, S., and Ikeya, M., 1991, Thermal stabilities of paramagnetic defect and impurity centers in quartz: Basis for ESR dating of thermal history: *GEOCHEMICAL JOURNAL*, v. 25, no. 6, p. 437–445, doi: 10.2343/geochemj.25.437.
- Tsukamoto, S., Tagami, T., and Zwingmann, H., 2020, Chapter 7 - Direct dating of fault movement, *in* Tanner, D.C., Brandes, C., eds., *Understanding Faults: Detecting, Dating, and Modeling*: San Diego, Elsevier, p. 257–282.
- Wells, D.L., and Coppersmith, K.J., 1994, New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement: *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 84, no. 4, p. 974–1002, doi: 10.1785/BSSA0840040974.
- Yang, H.L., Chen, J., Yao, L., Liu, C.R., Shimamoto, T., and Thompson Jobe, J.A., 2019, Resetting of OSL/TL/ESR signals by frictional heating in experimentally sheared quartz gouge at seismic slip rates: *Quaternary Geochronology*, v. 49, p. 52–56, doi: 10.1016/j.quageo.2018.05.005.

Abschließende Diskussionsrunde

MIT CHRISTOPH GRÜTZNER (CG), CHRISTOPH DAXER (CD),
 MICHI STRASSER (MS), HELMUT HAUSMANN (HH),
 HEIMO DOLENZ (HD), RENATE JERNEJ (RJ),
 DESIREE EBNER-BAUR (DE), MIKLÓS KÁZMÉR (MK)
 UND ALEXANDER BUDSKY (AB)

Transkribiert mit noScribe Vers. 0.5 und Korrekturen, Ergänzung,
 sowie Überarbeitung von A. Budsky

Beginn

- HD:** So, wahnsinnig profund und im Detail und mit bauhistorischen Studien hinterlegt, äh, scheint mir die Intensitätseinordnung zu dem 1348er-Thema nicht im Bilde zu sein. Oder wie wird das gesehen?
- CG:** Naja, es kommt ein bisschen darauf an, was man damit machen möchte, ne? Also, bei der Hammerl-Studie interessiert die Geowissenschaftlern natürlich, was mit dem Erdbeben passiert ist. Und, ähm, der große, was an dieser Studie so beeindruckend ist, ist wie viele verschiedene Datenpunkte schon existiert haben. Von wie vielen verschiedenen Datenpunkten man weiß im jetzigen Deutschland, Österreich, Slowenien, Italien, in Umkreisen von, also wirklich Hunderten von Kilometern. Und, ähm, die Unsicherheiten, da stimme ich völlig zu, bestehen natürlich darin, wenn es darum geht, für einen einzelnen Datenpunkt da jetzt eine ganz genaue Intensität zuzuweisen. Nehmen wir Udine, ne? Da gibt es Berichte über einen halb eingebrochenen Palast. Und da kann man sich jetzt streiten, wie gut der gebaut war. Ob das jetzt Intensität 7 oder Intensität 8 war, wo vielleicht nur 6 sein kann. Aber der Grund, dass wir halt 100 Datenpunkte haben, haben wir eine sehr genaue und gut belegte Verteilung der Intensitäten. Das ist eigentlich in dem Fall jetzt gar nicht so unglaublich wichtig, ob das Udine nun 6 oder 7 war. Weil wir wissen sehr gut, über welchen Bereich die Intensitäten verteilt waren. Und dadurch, dass wir so viele Datenpunkte haben, ich will jetzt nicht sagen, es mittelt sich raus, aber so ähnlich kann man das schon sehen. Der eine wird ein bisschen zu stark eingeschätzt, beim anderen ist es vielleicht ein bisschen unterschätzt. Aber

es kommt trotzdem am Ende dabei raus, dass es ein sehr starkes Beben gewesen sein muss. Und nicht nur ein kleines lokales, das Villach beschädigt hat. Und es waren eben auch nicht zum Beispiel zwei Beben, das nur in Villach und nur in Udine stattfand. Über den Umkreis, wo verschiedene Intensitäten stattgefunden haben und wie stark die höchsten gemessenen Intensitäten an dem Ort waren, wo eben die höchsten Schäden vorgefallen waren. Dann kriegen die Geowissenschaftler dann die richtige Info, ok, das muss ein starkes Beben gewesen sein, wahrscheinlich oberer 6er Bereich, Magnitude. Oder Magnitude 6 bis möglicherweise 7. Das ist für uns total nützlich, weil wir wissen dann, wir müssen also nach einer Störung suchen, die mindestens 20, 30 Kilometer lang ist. Und da können wir dann mit unseren geologischen Karten schauen und sagen, die kommt da für nicht in Frage, die ist nur 5 Kilometer lang, die kann es nicht gewesen sein. Und wir wissen auch zum Beispiel schon, in welchem Tal wir suchen müssen. Aber der wichtige Punkt dabei ist eben diese große Anzahl von Beobachtungen. Und das ist bei der Archäologie natürlich schwierig. Da habe ich vielleicht sehr genaue Beobachtungen, aber eben nur von einem Punkt. Und ich weiß nicht, ob es ein Vierer- oder Fünferbeben direkt unter der archäologischen Stelle war, oder ob es ein Siebenerbeben in Graz war. Die Intensität kann genauso hoch sein. Das ist das Problem.

- HD:** Aber wir haben jetzt durch die Seesedimente dieses 1348 Beben, das ist jetzt naturwissenschaftlich noch einmal dazu belegen. Und auch mit einer entsprechenden Sedimentschichtung. Damit ist dieses großflächige oder weitläufige Beben sozusagen naturwissenschaftlich noch einmal abgesegnet.
- CD:** Sowohl im Millstätter See als im Wörthersee ist das das herausragende Ereignis.
- CG:** Ok, passt hervorragend zusammen. Genau so etwas wäre natürlich erstrebenswert für die historischen Beben, um die es uns jetzt gibt, 9 n. Chr., 2. und 3. Jahrhundert n. Chr., wenn wir da in der Lage wären, aus dem Umkreis noch Datenpunkte zusammenzutragen, die genauso eine analytische Form haben. Aus meiner Sicht sind die terrestrischen Archive, mit denen ich mich beschäftige, die ich vorgestellt habe, dafür nicht geeignet. Ich habe das nun wirklich probiert, ich habe es nicht gefunden. Die Seesedimente hingegen von euch, das ist meines Erachtens für die Geowissenschaften das vielversprechendste Archiv.

- HD:** Wir haben, wie ich auch im Vortrag gehört hab, einen Cluster gewissermaßen durch die Erdzusammensetzung, Schichtungen usw. im Zollfeld, dass dort Beben sind. Wie in der Reiseck-Gruppe, usw. Es gibt also in diesem Bereich einen speziellen Punkt, wo man sagen kann, da treten häufiger Beben auf. Nämlich messbare Beben, auch in jüngerer Zeit. Und jetzt, ist das auch so, sind das nur Beben, die konzentriert auf diesem kleinen Bereich da sind, oder strahlen die auch aus?
- HH:** Wie meinen Sie die strahlen aus?
- HD:** Ist das wirklich nur so konzentriert, wie das auf Ihren [Folien] dargestellt ist, oder können das auch ganz starke Beben sein, die man rund herum spüren kann?
- HH:** Das kommt ja noch die Störungslänge wieder drauf an. Man bräuchte einfach einen Geologen wieder, Einschätzung über die Störungslänge, dass man maximal die Magnitude abschätzen könnte, die könnte man dann auch so einschränken.
- CG:** Die Beben, die Herr Hausmann gezeigt hat auf seiner Karte, die sind ja instrumentell bestätigt. Das heißt, da wissen wir die Magnitude und meisten von denen, die allermeisten von denen sind so schwach, dass sie niemand gespürt hat. Auch beim Reißkofel, da gibt es zwar sehr viele Erdbeben, aber da wissen wir, die sind alle sehr schwach. Die werden halt nur so schwach gespürt, dass es da keine oder kaum Gebäudeschäden gibt.
- HH:** Reißeck-Gruppe, da wurden viele gespürt, aber ohne Schäden, ja.
- CG:** Das heißt, das sind alles ganz schwache Beben. Da könnte man vermuten, ob das nicht mit einem langsamen Bergauseinandergleiten vielleicht zu tun hat. Vielleicht gibt es da Altbergbau. In anderen europäischen Erdbeben-Hotspots ist es Altbergbau, wo alte Galerien zusammenbrechen. In Polen gibt es eine Kupfermine, da ist alle zwei Wochen ein Vierer-Beben. Oder in Gasfeldern in Groningen, in den Niederlanden. Das gibt es dort natürlich nicht, aber so ein Cluster an kleinen Erdbeben kann mit einer Berginstabilität zu tun haben. Aber das sagt uns jetzt nicht, dass dort auch ein großes Erdbeben stattfinden muss.
- CD:** Also was wir schon festhalten müssen, ist diese Evidenz, dass die Intensitäten im Bereich des Wörthersees für diese Beben, die das Zollfeld beeinträchtigt haben, ähnlich hoch waren wie am Zollfeld. Dafür gibt es keine

Evidenz. Oder dass sie ähnlich hoch waren wie 1348. Weil wir keine unterseeischen Rutschungen sehen, keine so massiven Turbidite. Ob das jetzt physikalisch möglich ist, auf dieser Distanz von 20 Kilometern, ich habe es vorher rausgemessen.

HD: Mich wundert es, dass das überhaupt der Fall sein kann. Ehrlich gesagt, wenn auf der einen Seite eine 1,30m starke Mauer zusammenbricht, durch ein Naturereignis, das nicht durch den Hangdruck erledigt ist, oder am Magdalensberg, dort oben eine halbe Stadt zusammenbricht, dass sich das nicht abzeichnet im Wörthersee. Also, ich verstehe es nicht mit diesen Distanzen.

CG: Ja, dass es sich nicht abzeichnet...

HD: Aber in einer Stärke, die in keiner Relation steht. Wenn ich in Udine das Epizentrum habe, den Kirchturm haut es mir wieder zusammen. Wie ist das zu erklären? Ich verstehe es nicht.

MS: Ich glaube, was ich mitnehme aus dem heutigen Tag, ich habe extrem viel gelernt. Auch über meine eigene Forschung, weil es die verschiedenen Perspektiven erlauben es dann auch meine eigene Forschung wieder kritisch zu beleuchten. Ich bin eigentlich überzeugt, in fast allen unseren Disziplinen sind wir mittlerweile sehr gut in Evidenzen für Bodenbewegungen zu erkennen. Und die im Rahmen unserer methodischen Auflösung zeitlich einzuordnen. Das ist genial. Das konnten wir vor 20 Jahren noch nicht. Außer den Seismologen. Aber auch hier wäre das immer, auch was ich gelernt habe, dass ihr mittlerweile auch nur noch auf dem Datensatz der letzten 20 Jahre arbeitet und nicht der letzten 100 Jahre. Weil auch eure Methode. Das halte ich für mich fest, die unterschiedlichen Disziplinen im Rahmen ihrer Unschärfe sind mittlerweile ziemlich gut um mit einer gewissen argumentativen Kette an Argumenten zu sagen, Erdbeben hat an dem Punkt stattgefunden versus irgendwelche andere Umwelteinflüsse, sage ich jetzt mal. Das sind wir alle ziemlich gut. Aber wo wir alle und inklusive auf den Seen, wo hier einfach die große Frage ist, wie quantifizieren wir diese Untersteuerung? Das sind so die zwei Sachen, wo ich heute bin. Können Evidenzen, wir können sie datieren, plus, minus, aber wir wissen noch nicht wirklich, wie wir das quantifizieren. Und das wird nachher wichtig, um zu verstehen, was es für ein Erdbeben war und all das. Weil das entscheidet nachher, ob wir die richtigen Schlüsse ziehen. Das ist auch

für mich die Take-Home-Message. Ich sage jetzt einfach mal, vielleicht ist unsere Kalibrierungsmethode in den Seen, und was ganz wichtig ist auch, wenn ich zurück auf Hammerl kommen darf, was du gesagt hast, was danach auf einer Karte einen Punkt gibt, ist effektiv eine Summe aus ganz, ganz, ganz, ganz, ganz, ganz, ganz, ganz vielen Beobachtungen in einer Stadt. Also das heißt, wenn ich das jetzt auf den See übersetze, ist ganz, ganz, ganz, ganz, ganz, ganz, ganz, ganz viele Beobachtungen aus dem See, summieren wir auf einen Punkt. Und das Gleiche geschieht quasi in Magdalenburg, Berg, entschuldige, ich sage das eben irgendwie falsch. Aus ganz, ganz vielen Beobachtungen, die halt, summieren wir das auf einen Punkt. Und über Erdbeben, da braucht man mindestens drei Punkte, um überhaupt auch nur annähernd eine sinnvolle Diskussion zu machen. Weil ein Punkt allein, das ist wie ein Seismometer allein sagt mir nur, es war ein Erdbeben. Aber ich habe keine Ahnung, von wo es kommt. Und das ist, ich glaube daran, mit drei Punkten ist das Minimum und im Moment haben wir vielleicht, vielleicht drei Punkte, um das Jahr 9 nach Christus in Kärnten. Also wir können zum ersten Mal überhaupt auch erst beginnen zu diskutieren, sofern wir über unsere Punkte, sofern wir einig sind über die Punkte. Und wenn wir nur über zwei Punkte sprechen, dann müssen wir gar nicht beginnen zu diskutieren, dann kann es auch noch irgendein...

HD: So wegwischen würde ich das nicht, ich brauche jetzt drei Punkte.

MS: Nein, ich

HD: Ich habe ja den tatsächlichen Befund dort vorliegen. Das kann ich ja nicht wegdiskutieren.

HH: Ja aber die Quelle spielt ja eine bestimmte Rolle. Die Auswirkungen haben wir dokumentiert.

MS: Also Erdbeben, ja.

HD: Die Auswirkungen haben wir dokumentiert und die muss ich mir ja erklären. Und ich stelle fest, das ist ein Erdbeben. Anhand der Dinge, wie sie diese dort vorliegen. Das ist nichts anderes, als wenn ich dort ein Schnitt in ein Kar hineinlege und sag das dort oben ist auch Erdbeben.

CG: Aber es geht darum rauszufinden, wo das Beben stattfand und wie stark es war. Also ihr Befund zeigt, da gibt es ein Erdbeben. Genau wie meiner das

auch sagt. Aber wo und an welcher Störung und wie stark das war, das ist die Frage von uns.

- MS:** Also so bei uns in den Seen, wir sehen ein Erdbeben in den Seen, ist so Forschungsstand vor etwa 20 Jahren. Das haben wir gelernt. Und wir beginnen jetzt, 20 Jahre später, zu arbeiten, zum ersten Mal uns zu überlegen, was das eventuell bedeuten könnte, so ein Datenpunkt. Und da muss ich auch mal dazu sagen, ich mache jetzt eine Klammer, weil in den Seen, wäre mal spannend zu überlegen, wir machen ja aus ganzem Wörthersee einen Punkt, aber der ist, was hat der so für eine Größe?
- CD:** 18 km von Westen nach Osten.
- MS:** Aber das machen wir aus methodischen Gründen. Irgendwo muss man mal seine Skala definieren. Und ich glaube, also für mich ist das das Spannendste in dieser Runde und ich bin überzeugt, da haben wir echt, echt, echt, echt sehr spannende Befunde. Spannende Hypothesen und die Experten im Raum zusammen, wo wir sagen können, okay, wie müssen wir jetzt vorgehen, um diese Hypothesen zu testen. Und deshalb bin ich einfach vorsichtig mit irgendwelchen Interpretationen und Abschätzungen oder so, weil das halt einfach, weil ich weiß, da können wir, da treten wir potenziell einfach in Fallen rein, die uns dann in Paradigmen und in die falsche Richtung rennen lassen.
- HD:** Ich kann mir das ja auch vorstellen in vielen Bohrungen, ist ja auch wiederum eine Interpolation, weil es werden die entsprechenden Beben in unterschiedlicher Stärke in der West-, Ost-Bucht und so weiter aufgetreten sein oder sind die immer gleich stark?
- CD:** Nein, natürlich, das macht natürlich einen Unterschied über diese Distanz.
- HD:** Das ist ja genau das Gleiche, das über 20 Kilometer projiziere ich das auf einen Punkt. So, die Aussagekraft dieses Punktes ist ja rechts oder links im See, oder nördlich oder südlich, ja auch anzuzweifeln. Da ist ja auch nur ein Detailbefund, ein Punktbefund, den ich dann hier vorlege und mehrere Punktbefunde interpoliere. Also, da sind ja auch Unschärfen drin, oder?
- MS:** Genau, aber genau deshalb darf man es dann nicht einfach zu linear mit einem Punkt vergleichen. Also man muss dann die Unschärfe zurück machen.

- HD:** Genau, es ist die Unschärfe bei der Einschätzung und so weiter de facto auch gegeben. Das möchte ich damit sagen.
- CG:** Aber deswegen bohren sie ja alle Kärntner Seen an.
- HD:** Genau, am Pressegger See ob das Beben auch dort war. Da bin ich jetzt wirklich neugierig, mit Blick auf das Gailtal hin, weil da wäre das, um zu sagen, mit dem ein flächigeres oder ein größeres Beben vorhanden. Und wenn da die anderen Beben auch noch drinnen sind, dann muss man wirklich überlegen, oder im Pressegger See auch in den entsprechenden Dingen diese beiden anderen Beben auch noch vorkommen. Da muss man überlegen, wie das ist. Und wenn da wiederum entsprechend dort gleich große sag wir mal so Einschätzungen, interpolative Einschätzungen drinnen sind, dann müsste man eigentlich noch einmal schauen.
- CD:** Ich muss vorausschicken, dass nicht jeder See gleich geeignet ist, um solche Abschätzungen zu treffen, was Intensität etc. anbelangt, weil auch nicht jeder See ein Erdbeben gleich aufzeichnet. Es gibt verschiedene Thresholds, an denen ein See quasi anspringt. Pressegger See als sehr sehr flacher See zeichnet Erdbeben sehr wahrscheinlich anders auf als es im Wörthersee der Fall ist. Also diese Slumps, die großen Rutschungen, sind weniger wahrscheinlich. Und dann die Rückschlüsse direkt darauf zu ziehen, von welchen Intensitäten wir da sprechen, ist wahrscheinlich schwierig. Aber was prinzipiell machbar ist natürlich, sind Abschätzungen in welchen Seen, wo wird ein Event aufgezeichnet, und wir wissen dass erst oberhalb eines gewissen Thresholds, dem Intensitätsschwellenwert dazu kommt, dass das Erdbeben aufgezeichnet wird. Also nur um die Euphorie ein bisserl zu dämpfen.
- HD:** Was für mich methodisch auch, dass man etwa bei den zwei Erdbeben hintereinander, heuer und nächstes Jahr dann sollte das abrutschbare Material im Wesentlichen schon weg ist, wie stell ich dann im zweiten Jahr die Stärke fest? Das sind für mich auch so logische Fragen gewesen, die ich mir gestellt hab, wie geht das noch? Wie geht das, wenn es ein 236 n. Chr. Erdbeben ist, dann ist das so wie was in einer gewissen Abrutschung und Aufwühlung des Sees, und mit einer größeren Sedimentschicht vorhanden, im nächsten Jahr wird nicht mehr so viel abrutschen können. Weil das schon passiert ist. Wie scharf ist diese Methode, und wie scharf sind da eben auch die Aussagen bezüglich der Stärke?

CD: Sehr sehr gute Fragen, das sind ja Fragen, die wir uns natürlich auch gestellt haben im Vorfeld, aber gerade wenn ich auf das zurückkommen darf, vor 1348 war dieses Sediment als solches ja auch prinzipiell vorhanden, um quasi abzurutschen. Deshalb würde ich, das lass ich auf jeden Fall mit mir argumentieren oder diskutieren, dass nach 1348, nachdem diese großen Rutschungen abgingen das Potenzial für solche Aufzeichnungen geringer ist, als in den Jahren davor, aber wo dieses Sediment ja noch potenziell in anderen Hängen sich befindet, wäre es ja eigentlich noch möglich, auch dort diese Großereignisse dann drin zu haben. Wenn wir von diesem 9 n. Chr. und so weiter sprechen, ist zumindest im Wörthersee noch dieses Potenzial auf jeden Fall da.

HH: Ja, aber das kann in einem großen Raum sein. [...]

CD: Das sind Unsicherheiten, über die müssen wir diskutieren, die sind vorhanden.

MS: Für mich ist, and I may switch in English, because maybe Miklós can contribute this question, like, to how do natural archives or archaeological archives or instruments, how do they record earthquakes, right? And even instrumentally, it depends on the frequency of how it is recorded, whether or not the long duration shaking is rather strong motion, that even these guys have different instruments that record different motions. And for archaeology or archaeoseismology, I think it would be very interesting for me to understand, like, what would be the minimum, either physically or in terms of intensity, whether or not a certain wall experience, because the EMS scale is more like an average over Europe, right? Because, like, we could also ask a question the other way around. So if there is a wall or a church or something like that, and we have, we have in the last 700 or 2000 years, we had the Villach earthquake or anything, why are not all churches and walls collapsed? So there must also be, like, a critically balanced upper range of things and so, and like in the lakes, we try to at least conceptually approach that problem by formulating our questions in, like, what is minimum, what is maximum, how can we charge or so. And I wonder where archaeoseismology is in this, in these disciplines, like, whether this discipline is asking these questions or, and how you deal with this. I don't know, anybody did at Magdalensberg or not?

- MK:** One of the points we often forget about it is the so-called side effects, which basically means what is the substrate, we got built it. If it is built on solid rock or on loess, which can also spectacularly liquify, and also what kind of built material it is made on a flat area, or on a hill. And maybe it is on a hill, which is made of solid basalt, but still it can have, can we see more shaking [...]. And this is not really well, as to what I'm not going to discuss. And what you didn't know at all, what is the geometry of the substrate below the building, in like a 2 km diameter, what kind of reflections happen to the seismic waves coming from this direction, than it is reflected in a subsurface relief, with the side, with subsurface fold, it is reflected back, there is interfering, and we saw something, and I will admit like, and of course there is the quality of the construction, as we see in Turkey. The same 4-floor high buildings, for example, or higher building, ten of them collapsed, broke because it was one, how to say, immoral builder, and the next ten, ten of them have perfectly survived. And I have seen many old buildings now, and I can say that the morals of the builders didn't change throughout the centuries. So you can find the same shit building, in the Roman times, mostly the poor quality was already destroyed, by a shrink or by annual releasing. The later ones are still waiting to be destroyed. So we have, we can study only the best buildings.
- CG:** So in general, a building that sits on solid rock, experiences less shaking than any building sitting on sediment. The deeper the sediment, the worse, and the softer the sediment, the worse. So Klagenfurt Basin, it's cemented sediment, it looks like solid rock, but it's actually still sediment. So the same earthquake is not unlikely to produce a more severe damage to anything that sits in the basin centre, than compared to anything that sits on solid rock. But, as you said, if the solid rock is formed like this, it could be like a focus lens, more or less. So that's a very special case, but it might apply to the Magdalensberg. I had exactly that feeling throughout a number of the talks I've heard today. At the end of several talks I thought, we need an engineer, we need a geotechnical engineer to look at these things, to look into the stability of the soil, the shear stress that the rocks can take up, you know, what shear stress the walls need before they collapse, what is the underground like, what's the water content. I think with a geotechnical engineer and another modeller, or it could be the same person, we could come closer to a better understanding of what really the response of our

seismometers, be it archaeology, be it landslides, be it churches, what the response of these seismometers essentially is to the waves that pass through.

MS: I 100% agree. And actually, in lakes, I mentioned we started 20 years ago. Actually, my PhD was doing slope stability analysis with geotechnical earthquake engineering, letting earthquake shaking through a slope and quantifying the peak ground acceleration that is needed to destabilize this rock. And these guys, they now just cite that knowledge that we developed 10 years ago. They are refining it, of course, because I was using Mickey Mouse models, right? But I fully agree that is actually, that would be a substantial step forward. . . . It's like we can conclude that there are earthquakes and we can hypothesize how strong they were, but it need really to make a step forward in understanding how the buildings act as seismometers, basically. I fully agree that that discipline is missing here, like a geotechnical engineering.

MK: And one more point which should be considered, what was the weather and the climate in the time of the earthquake? Like in Taiwan, I've show you, the Sony building. This earthquake happened during the heavy monsoon. It was recorded several days of rain, it's September rain, before the earthquake happened.

MS: I actually was wondering myself when I saw these walls, like a Roman wall, right? That has a relatively high permeability. I was wondering how would it be if there would have been a day of rain when the earthquake hits, versus when it was a dry day when the earthquake hits. And the geotechnical engineer would need that information for doing calculations.

MK: Yes, that's the question.

HD: Especially in case of the amphitheatre, there has been a specialist there. [...], so, okay, the backside, that's material that move and there is no water coming in.

MK: The amphitheatre in Virunum, it probably could see on the maps, we could see the distortion of the walls, but the most distorted wall was on the hillside. //HD: Yeah. // Would it damaged by an earthquake, by a landslide in shaking of the earthquake, or just a landslide?

HD: No, it's not a landslide. That's an effect we can really to see. On the other side, the other part, you don't have the walls upright standing in a certain

height. To deal with, to see the inside, if there are marble pieces in it, it has been slipped down, but later.

MK: Turn it down, or removed by the citizens?

HD: Two things might be right, because on the one side it collapsed in the late antique, because you had a small sea inside later on in the amphitheatre, when it rains full. So you got the sea in a certain moment, the eastern part collapsed and went down.

MK: And the hillside?

HD: The hillside stood more or less in the height, and just from the terracing level, at least from this one, it broke down, so that's quite clear to see.

MK: So the hillside part was like 5 or 10 meters wide, and the valley side would have...

HD: The same, the same, no, the same.

MK: It would have never been like that, like it was built in two different periods.

HD: No, no, no, no, no, no, stop, not two different periods. An amphitheatre with a very special form, with a very special form, which is more like a circus than an amphitheatre. So that's a very special theatre done in one.

RJ: What you are using... Welchen Mörtel du verwendest..

HD: Yes, which mortar? It's a special mortar, you found them on this hill. And then the other one by the repairing. So that's a different...

HH: So the amphitheatre was built in this hill shape or was it stand alone without this...

HD: Inside the hill shape.

HH: Inside the hill shape.

RJ: The eastern side was built in the hill shape. The western side was standing upright 6 meters.

HD: We will see that tomorrow.

MS: I would have a very completely different question to Christoph actually. Like one thing, I mean you just said your kind of terrestrial archive or geomorphological evidence or so may not be useful to answer. You said a few really cool things I think, in the „Sackungen“. You mentioned that farmer that said a lake dried out. If such a morphology and such a „Sackung“ lake,

no, not Sackunglake, I don't know the English word. And if that would then refill again. And basically like if we find the right one which is a lake, no lake, lake, no, lake, lake, no lake, lake, And I don't know how we would ever get stratigraphy into that, and whether it's probably going to be a nightmare in terms of kind of understanding. But still, I mean, I guess, I mean by knowing, walking around in the Alps and have this geomorphological feature, there are people start to see them, right? Already Pfiffner? and Ustaszewski, like that was his thesis or so? This is something, [...] right, sorry, I always have the name. I mean, like if we were where, we are thinking about it, I don't know, but like do a really, really spatial analysis of where could be sites which remain lakes. // CG: I could take you there tomorrow. // And then think about, we are not very much specialized in this small lake thing or so, but there are other people and I mean, it would be worth to try to open a new archive // CG: Absolutely. // of this hydrological sites.

- CG:** We are also not the first ones who understood that „Sackungen“ can be dated. There's a lot of work being done in the Tatra, for example, in the Pyrenees and also in the Alps. To understand that they might be earthquake related, I think we need to do big statistics and map out hundreds of them and look if they correlate with the faults we think that are active. That's why we started that. But you're right, there are some of them that might be more useful than others as a long-term archive. And I just started excavating two of them because I actually found out shortly before the project ended, so I didn't start excavating 30. I would have liked, but I didn't. And I started with the obvious and easy ones, for logistical reasons, right? Just to see if it works. The stratigraphy in the „Sackungen“ was horrible. There are descriptions of super nicely stratified „Sackungen“ where, you can see different episodes of them. Opening, more space being created, more sediment coming in. That's great, they may exist. On the Hochwarter Höhe near Hermagor, there is a lake that's dammed by a „Sackung“ right now. And I looked at that lake and I thought about you and I said, I want to drain that lake, or at least I want to drill into that lake. But the lake is a swamp, it's like 50 centimeters deep or a meter, and then it regularly changes from water to mud, right? But this lake could be a super good archive. The only problem is that there are cows on the „Alm“ of course, and they walk through the lake.

- MS:** But if it is growing like these days we also work with peat bog experts. So if topography is growing, yes, the cows may be able to walk up and walk it up. I mean, it's just thought...// **CG:** I would love to help that with you. // And you just said something very, very inspiring. Like, it may not be conclusive and helpful. And the way to go is we need many of those and do spatial statistics to learn something about general picture. And maybe that's the same philosophy we should think about in palaeoarchaeology. And we know we have to do that in lakes as well is one single site will not tell us. And we really need like try to understand each other's site and try to see whether we converge with the same methodology, because otherwise we cannot compare and understand each other's methodology. Because in order to feed into these statistics, that eventually may help us do a bit more educated guesses about what earthquakes are. I think that's the way to go. And bring the different sites together and put them into statistical data sets. And then start to compare archaeoseismology, geomorphology, churches, lakes, and all the sites.
- CG:** Absolutely. We all face different problems, right? I mean, you have super cool evidence, for an earthquake at a certain time, but you don't know where it happened. You just know that shaking affected your site. You don't know the epicenter and the fault, right? It doesn't really work. // **RJ:** We don't care. // **DE:** That's the point. //
- HD:** That's the problem, I have the evidence. It's in my opinion for two even earthquakes.
- CG:** Our problem is the opposite, right?
- HD:** There are some things I can't really get into my brain. How could it be? There I have the evidence, they did, and they are have another evidence. And they [...] it's spectacular. That something okay nothing to the and it's 20 kilometres far from there. This is a question I really like to have answered here.
- MS:** Well, we are unable to answer that.
- HD:** That's a fact. That we can take out.
- MS:** Just some critical thought on this. Because I'm listening to you and I understand. And I actually partly agree. But one site, theoretically, does not conclude on earthquake shaking. Because there is always another explana-

tion. Even though it is most likely. But just theoretically, if we try to approach it like just science theory. How sure are we? We would always need a second supporting independent evidence to conclude it was an earthquake. At least in the way. I reject any paper that makes an earthquake out of one evidence. I just reject it. I don't read it. I just send it back.

HD: Just to pin it all back. Is there another declaration, how it comes to your sediments?

CD: Whether that's an earthquake or?

HD: If it there is another? Have you another idea? Has it to be an earthquake, what you show us?

CD: The thing is, you know with this approach where we actually need more sites than one to tell us we had an earthquake That's the ... red and blue. You know what Michi showed us there?

HD: Yes, you take the historical one. Where we now know the problems here to here?

MS: No, no, no. That's different. It's different.

CD: In theory, you know, we see a turbulent layer in a certain place in the lake. Could be from earthquake shaking. Could be from flood coming in. But then we correlate over the whole lake. And see somewhere else in the lake. With that correlation... Oh, in that area of the lake, there's also evidence that something happened. And... //HD: It's not an earthquake.// The thing is, to produce this evidence on the average site and on both sites, the most likely explanation is an earthquake. Because with heavy intense rainfall, whatever, you would get that happens in one part of the lake, you get an event there. But you don't get it simultaneously at the other side. And then, what's the other explanation to produce this simultaneous evidence, right? The earthquake is the most likely explanation for it.

MS: The beautiful of lake, of lake Wörthersee, it's actually three lakes. Three lakes in one.

CD: It's different basins, right? That create..

MS: It's three bathtubs.

HD: And there's a high probability if you find the same thing, you'll have three? I agree.

- MS:** We can actually not physically explain how a sand grain would jump from one bathtub to the other bathtub.
- CG:** If you don't believe that, but then you find the same layer at the same time in Faaker See and in Millstätter See. //HD: And then it's fine. // CG: Than it's fine. // HD: And I'm very interested in that question.//
- MS:** And actually, in the detail, sorry, go ahead.
- HH:** This was also the reason why I asked if other Roman settlements in Friuli have also documented damages and how big are the damages?
- CD:** And in the ideal case, we have it in the lakes, we have an event, we have archaeological sites, but we'll always remain is this dating uncertainty. This is something...
- HD:** Two different, two different cases?
- MS:** I really find, if I mean may formulate a positive, really potentially very interesting hypothesis, is like if the evidence on.. //RJ: Gurina // Thank you. In the Gailtal and Magdalensberg, and I think it's mainly in the western part. In the western part of the [Wörthersee], because the eastern part actually has a different threshold. //CD: It's not that susceptible. // The eastern part suggests a certain threshold was not reached. Like, okay, not on quantification. Just if we, where to assume those points happened within the same time, that would actually be a potentially very strong argument that there was a regional earthquake. And like if we each had, each of us has dating uncertainty or so, but it seems we all are within uncertainty potentially, potentially somewhat like within our uncertainty synchronous. We will never ever be able to prove synchronicity. So that's actually, that's a wonderful news. That's a wonderful news and we could publish it and it would be great. But, but our intensity estimates diverge and makes it as far as I can judge, currently physically not plausible that these three evidences match together. So right now, we only have two options. Either everybody fights for his own evidence or we think about whether there could be a way on calibrating our methodology to the same standard that we are sure that we compare the same intensity with the same methodologies. And for this, I guess we need people like geophysicists. We come back, we need a geotechnical engineer and somebody who can calculate some, even if it's Mickey Mouse equations or so, but we need to, we need to, we need to elaborate a common standard. And this by itself is a potentially whatever, one million

euro project with four or five people and some working groups. It's cool. //
 CD: And never doing science.

CD: Never doing proper science and propel it.

HH: You make it possible. Yeah.

MS: Yeah, and you can make it proper. And we still can publish together a hypothesis and people may believe it or not. That's okay. We keep discussing. But on the other hand, we try, we try to do good science. And kind of see and what can we do. We may conclude in three or four years that it's still not quite possible to calibrate. We will never be able to calibrate as good as seismologists these data. But at least, I mean, this is like a wish we have in Innsbruck very, very much. To develop common stand where we are able to be a bit more. I'm not saying we solve it. We never solve it. But at least to get closer to some kind of estimates, which then is needed to actually, and test hypotheses and which one, and then the next step would actually be to bring in modellers to model scenarios, physically based earthquake models that produce site-specific shaking scenarios that we use to test our calibrated common methodology and the modeller and the archaeoseismologist and palaeoseismologist and geomorphologist and all that, together they cross-fertilize each other and... ..

MK: Calibrates, how to calibrate this into a very strict, very precise work for which the engineers are How do one person plus minus, we cannot know for sure, but if you use the word attribute, attribute, attribute the to earthquakes, to sites to the activity of the same force, for example, which would be 50 km long, which can produce the relative surface magnitude of the earthquake, which can produce the magnitude of earthquake then, it will automatically give us the calibration, because the same event shakes that. We don't need so precise date. But just to offer the potential, it was because the time interval like overlapping so it's possible that this segment, which is a periodic region, is not so hard to pinpoint. Like the [...] segment, the [...] are two segments maybe. Something like that. [...]

CG: And then we could try to understand what the data are showing us, right? For your 2nd and 3rd century earthquakes, and the problem is that they don't see it in their lakes, there is an obvious solution to that. It were local earthquakes, you know, very close to your site, probably on the other site, on the other direction of the lake, and that's why there is no intensity at

the lake, but there is intensity at your site. So I can think of ways to explain that. But for the year 9 earthquake, if you have high intensity there, high intensity there, but little or nothing in the middle, then it's a problem to come up with one big event at least. But there are scenarios, right? And if you combine the data in the way that which is there, and bring in other knowledge, by other proxy data... ...we could start saying, okay, this is a likely scenario, and this doesn't really work if we combine data from archaeology, archaeoseismology, from landslides, from liquefaction studies, I don't know, I mean if I see a landslide in the Alps, I know nothing, but if I find 100 landslides that all happened 2500 years ago, then... ...hmmm...

- MS:** This reminds me, you work with Obertilliach, right? ... Didn't you have Obertilliach, or Tilliach as one of your study sites?
- CG:** We work all along the PAL [Periadriatic Lineament] with different methods.
- MS:** A guy called me there, he has evidence for landslides or mass movements, I forgot, did I follow your name? I need to find my... just to realize that. Because that's another method. //CG: Dating landslides?// Dating landslides.
- CG:** But one landslide doesn't help a lot. I mean, if you by accident date the Dobratsch, you have to date the earthquake, but you don't know why, right?
- CD:** But it's difficult to date landslides.
- CG:** There are ways to do it, but it's a lot of work and it's costly. But techniques are there, but you need a project, the money, and dedicated PhD students. //CD: Exactly. // You can do exposure ages, you can do burial ages, but maybe that you have to drill through a big number [...]
- MS:** But we are kind of going back and forth, right? We think about project ideas that can bring us further, and on the other hand we would like to wrap up our evidences and write a story about it. We are always in this. And I think these two pathways, they are perfectly okay. That's science, that's what we do. But the key thing is, whatever we want to publish, should publish in evidence. And in kind of may formulate hypothesis, but we should not conclude on something where we see that we actually need more research. So it's kind of to find that balance between publishing evidence, formulating hypothesis that gives a nice publication, and then we

can use the publication to tell the funding agencies that we need money to test the hypothesis, and we get that, and then we can publish along the way and formulate new hypothesis, and with this we get further. I'm just worried that sometimes we run too fast in making conclusions, and in kind of saying, we need it, we understand it now. Because it may not be well taken by the entire science community, because some people say, I'm not sure, and it kind of blocks our opportunity to acquire grants. Because the funding agencies will say, well, you already speculated about that. So this is like for getting grants, we need to be careful on what we publish. Because otherwise we may risk to... At least that's like in my... I don't know about the archaeology actually, but in the geoscience community that's an important strategic decisions in where to go, because a funding agency will read what we publish before, and if that was not convincing, then we risk not to get the money ourselves. I don't know how this is in seismology or...?

HD: Check before publish it.

CG: And share our data, right? That's perhaps something that I'm not sure if it needs to be a mailing group or whatever, but perhaps we should find a way that we can inform each other about new data. If you find a new ruin that is an earthquake event, then we would like to know about that. But if it's in a book, then I won't find it. And likewise you will probably not read all the geophysical paper from the alps, and not know that I might have found a landslide that was triggered by an earthquake 2000 years ago. So perhaps we should kind of establish a mechanism to share our results.

MS: You know, it's such a symposium every two years.

AB: I mean, why not? If we have a proposal or something like that or a research project, then it would be highly recommended to meet each other every year or every two years.

MS: I don't know what... since you say proposal, I don't know where this is going, but the Austrian Academy of Science has this Earth System Science call every two to three years. They really push for interdisciplinary and transdisciplinary work. And they usually have different calls. Last one it was resilience in mountain region, and then it was... And I don't know which call will come next year, but there will be a call again. And we may just observe the landscape if something where archaeology and geology and seismology fits into something like it is Earth. Because on the archaeologi-

cal side, you have really, really, really interesting hypotheses. Really, which have directly socio-economical contacts and all these kind of things. And that's truly transdisciplinary science. And I'm not sure whether the call... But I'm sure there will be... there can be calls which transdisciplinary science... where we could answer with a proposal. So I think we... I don't have a clear set... I don't have time actually to develop all this. But we should keep our eyes open.

- CG:** And also I like the idea instead of emailing our papers around just to meet every two years. That's a super cool idea. And actually such a meeting is comparatively cheap for a funding agency. I mean we are talking 2000 Euros. And at least in Germany it's rather easy to get something like this funded. Because it's cross-disciplinary. That's what they love actually. It's meant to initiate new proposals and new projects. That's what they love, right? It's many different countries in one room. That's what they love. And it's little money. And there are really many sources. Even my university has a source to organize such kind of workshops. Like in Jena. I mean why would you want to go to Jena? It's stupid.
- CD:** There's a certain outcome to it. We go out here and have new ideas.
- MS:** And then we go to Slovenia and the northern Italian.
- CG:** Perhaps can Graz has one, right? Or Udine? There are similar programs. Or Leoben? Some universities in the surroundings. Network money. There's a lot of network money floating around.
- MS:** Is INQUA [International Union for Quaternary Research Congress]?
- CG:** I thought about INQUA. For INQUA it quite be a little bit small-scaled, if we mention Carinthia. If you approach it as a method, it might be an option. So if you're just saying developing methods at the boundary between archaeology, sedimentology, archaeoseismology, seismology. Then it could be a thing. But I think they will get the understanding. And the understanding is just about Carinthia. Because then it will come to invite archaeologists from India and seismologists from Chile and to make it international. So I think it's the local focus they would get suspicious.
- HH:** I want to mention if you're interested in the side effects. How is the amplification of seismic waves based. We can do either install seismometers there and look for the next years. How the amplification will develop on

the smaller earthquakes. We can do seismic refraction measurements to estimate the Vs-30 velocity. Also a geotechnical person would be nice. [...]

CG: I'm sorry.

HH: It's also good the high frequency to detect fundamental frequency of the ground of the sediments. It's also important to them.

HD: It would be a big thing on the Magdalensberg, we need it there, and the amphitheatre

MS: I'm just thinking big, I'm just thinking big, I just had a thought. That would go towards FWF style of project. We should do an OBN [Ocean Bottom Node]. I'm fully over committed. But I'm also representing a little bit Jasper [Moernaut] here. Who is in Chile currently and Jasper's thought and so is mine like we are very very much interested in the next two or three years. With people in this community here to go for a FWF type project. Just to finish that thought, if we go for side effect studies. I love it, on the archaeological site. Then I would put in a proposal to do an OBS [Ocean Bottom Seismometer] in Wörthersee.

HH: I also want to connect the side effect. And may be estimate the explanation on the bottom of the Magdalensberg. And you need this values to get in more information of this force to train the modelling. Then you can get this.

MS: If you at the same time you are measuring at the bottom of Lake Wörthersee. And you got the same earthquake. The OBS, ocean bottom seismometer. //HH: That is also nice. // They did it in Switzerland. It's Donat Fäh. They even bought a seismometer. So, Katrina Kremer, so ETH [Eidgenössische Technische Hochschule Zürich] has an ocean bottom seismometer. HH: Or an OBS in Triest... [...] //MS: Yeah, right. // HH: [...]// Then we do a one or two year monitoring. It doesn't matter. I just love the science. We do like a one or two year monitoring on Magdalensberg and on the bottom of Lake Wörthersee. Because we have a discrepancy on a major Roman earthquake with really sound hypothesis. On da da da da da. [...] I'm not going to write it. I'm just going[...]

ALL: Thank you so much. That was very very impressive. I did not expect that. That was impressive.