



SCHLUSSBERICHT

Verbundprojekt CLIENT II –

Durch Vulkane und Hangrutschungen induzierte Tsunamis

TSUNAMI_RISK

Förderkennzeichen: 03G0906A-G

Projektleitung: apl. Prof. Dr. Thomas R. Walter

Laufzeit: 01.03.2021 – 29.02.2024

Berichtszeitraum: 01.03.2021 – 29.02.2024

Teil I: Kurzberichte

GeoForschungsZentrum (GFZ)
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)
Technische Universität Braunschweig (TU-BS)
Freie Universität Berlin (FUB)
Technische Universität Berlin (TU-B)
Bundesanstalt Technisches Hilfswerk (THW)
gempa GmbH



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Teil I Kurzbericht

Förderkennzeichen: 03G0906A

Zuwendungsempfänger: Deutsches GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ)

Projektleitung: apl. Prof. Dr. Thomas R. Walter

Verbundprojekt: **Client-II TSUNAMI_RISK: Durch Vulkane und Hangrutschungen induzierte Tsunamis**

Vorhaben: **Lokalisierung und Dynamik vulkanischer Hanginstabilitäten**

Laufzeit: 01.03.2021 – 29.02.2024

Berichtszeitraum: 01.03.2021 – 29.02.2024

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03G0906A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen / den Autoren.

1. Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand

Das TSUNAMI_RISK-GFZ Projekt zielte darauf ab, (i) einen Katalog bedrohter Vulkaninseln in Indonesien und vergangener Kollapsereignisse zu erstellen, (ii) eine detaillierte Untersuchung der Vorläufer und zeitlichen Änderungen am Anak Krakatau durchzuführen und (iii) potenzielle Kriterien für seismologische Frühwarnungen zu identifizieren und in Bezug auf das seismologische Netzwerk in Indonesien zu bewerten. Darüber hinaus sollten die Erkenntnisse für den Einsatz durch indonesische Katastrophenschutzbehörden aufbereitet werden.

Vulkaninduzierte Tsunamis sind selten, aber oft verheerend. Sie verursachen ein Viertel aller Todesfälle durch vulkanische Aktivitäten. Die Erforschung von Flankeninstabilität, -bewegung und -kollapsen ist daher von entscheidender Bedeutung. Durch frühere Untersuchungen wurden komplexe Wechselwirkungen zwischen Flanken und vulkanischer Aktivität gezeigt. Mechanische Veränderungen, wie hydrothermale Alteration, wurden als mögliche Auslöser für vulkanische Sektorkollapsen identifiziert ([Darmawan et al., 2018](#); [Heap et al., 2019](#)). Flankenkollapsen führen nicht nur zu strukturellen Änderungen im Vulkan, sondern beeinflussen auch die Magmakammern. Eine neue GFZ-Studie betont die bisher unerforschte Datenlage ([Walter et al., 2019](#)). Daten aus 2018 zeigen, dass die Flanke bereits in Bewegung war und Temperaturanomalien auftraten, lange vor dem eigentlichen Kollaps. Aktuellere Forschungsergebnisse zeigen, dass submarin kartierte Blöcke mehrere hundert Meter groß sind und

wichtige Informationen zur Rutschung und Tsunamigröße liefern. Im Rahmen früherer Projekte wie GITEWS und PROTECTS (2006-2013) wurden Methoden zur Tsunamifrühwarnung und -vorsorge in Indonesien entwickelt und implementiert. Die Erfahrungen wurden in einem praxiserprobten Ressourcen-Kit dokumentiert. Es besteht jedoch weiterhin Bedarf an institutionellen Kapazitäten für die Tsunamikatastrophenvorsorge, insbesondere auf lokaler Ebene. Die Frage, wie Gemeinden sich besser auf Ereignisse wie die in Palu und Anak Krakatau vorbereiten können und welche Rolle die Tsunami-Frühwarnung dabei spielt, ist weltweit relevant und erfordert weitere Forschung. Hieran sollte die Forschung am GFZ anknüpfen, eine Bestandsaufnahme und detaillierte geomorphologische Analyse aller aktiven Vulkane Indonesiens umfassen, in Simulationen einfließen, neue Überwachungsstrategien erarbeiten und letztlich in die Katastrophenvorsorge auf lokaler Ebene einbeziehen.

2. Ablauf des Vorhabens

Das Verbundprojekt TSUNAMI_RISK gliederte sich in fünf Arbeitspakete (AP):

AP100: Projektkommunikation

AP200: Geowissenschaftliche Forschung - Risikoidentifikation und Monitoring

AP300: Geowissenschaftliche Forschung - Modellierung und Analyse

AP400: Sozialwissenschaftliche Forschung

AP500: Politikempfehlungen u. Praxistransfer

Hiervon leitete das GFZ die Projektkommunikation AP100 und trug zu den folgenden Unter-APs bei:

210-Identifizierung von Risikogebieten

220-Fernerkundungsbasiertes Vulkanmonitoring

230-Seismisches Monitoring

310- Modellierung und Analyse der Vulkanflankeninstabilität

510-Politikempfehlungen zur Steigerung der gesellschaftlichen Resilienz

530-Ausbildung und wissenschaftlicher Austausch.

Darüberhinaus wurde das Unter-AP 430-Katastrophenvorsorge auf lokaler Ebene im Unterauftrag "Spahn" erarbeitet. Die Projektarbeiten GFZ wurden von angestellten wissenschaftlichen und technischen Mitarbeitern mit abgeschlossenem Hochschulstudium in Geologie/ Geophysik mit weitreichenden Erfahrungen im Bereich der Seismologie, Datenanalyse, Vulkanologie, Fernerkundungsdatenauswertung realisiert, und konzentrierten sich auf die beiden Arbeitspakete der Geowissenschaftlichen Forschung (ein Postdoc und 1 Doktorand).

Zur Fortschrittskontrolle wurden durch das GFZ übergeordnete Verbund-Meilensteine verfolgt in den Arbeitspaketen AP 100, 230, 310, und 430. Ferner hat das GFZ zu weiteren Verbund-Meilensteinen aktiv beigetragen, und zwar in AP 210, 220, 510 und 530.

3. Wesentliche Ergebnisse

Das GFZ arbeitete sowohl mit deutschen als auch indonesischen Projektpartnern zusammen. Zu den wichtigsten, unter GFZ Leitung bzw. GFZ Beteiligung, erzielten Ergebnissen der Arbeitspakete gehören:

AP100: Infolge zahlreicher Workshops, Meetings und Webinare konnte trotz der Pandemie ein reger Austausch gelingen und das Projekt, inklusive aller Berichte, wie geplant realisiert und somit ein wichtiger

Verbund-Meilenstein erreicht werden. Erstellung aller Zwischenberichte wurden durch das GFZ initiiert, Beiträge von Verbundpartnern zusammengeführt und editiert an PtJ übermittelt.

AP230: Das vom GFZ koordinierte Arbeitspaket "Seismisches Monitoring" befasste sich mit der Entwicklung und Evaluierung von Möglichkeiten der seismologischen Frühwarnung für Kollapsereignisse von Vulkanflanken (und andere Hangrutschungsereignisse an Küsten, die einen Tsunami auslösen könnten). Durch Analyse einer Anzahl von seismischen Aufnahmen von Hangrutschungen konnte gezeigt werden, dass der Frequenzgehalt grundsätzlich geeignet ist, diese von Erdbeben schnell zu unterscheiden, aber durch zusätzliche Kriterien bestätigt werden sollte. Weiterhin wurde die Detektion von Ereignissen wie Anak Krakatau mittels Backprojection demonstriert; eine Publikation für *Natural Hazards* ist in Vorbereitung. Zusätzlich wurden beispielhaft für den Anak Krakatau-Kollaps synthetische Seismogramme erstellt. Damit wurde Verbund-Meilenstein VMS-3 erreicht.

AP310: Das GFZ koordinierte das Arbeitspaket 310, und führte die Analyse der Deformationsdaten durch. Insbesondere wurden dabei InSAR-Daten in Bewegungskomponenten transformiert und durch Modellierung Dislokationsflächen und nicht-uniforme Bewegungsmuster untersucht und deren zeitliche und räumliche Veränderung bestimmt. Somit wurden auch diese wichtigen Verbund-Meilensteine erreicht.

AP430: Das Arbeitspaket 430 „Katastrophenvorsorge auf lokaler Ebene“ zielte auf die Identifizierung möglicher Strategien und Ansätze zur Vorbereitung, Frühwarnung und Vorbeugung von nicht-seismisch induzierten Tsunami-Bedrohungen mit Fokus auf der lokalen Ebene. Die Erfahrungen aus den Tsunami-Ereignissen von 2018 haben gezeigt, dass die Gemeinden weitgehend unvorbereitet in die Katastrophe gegangen sind und dass es auf nationaler und internationaler Ebene bislang noch keine Strategien zur Stärkung der Gemeinden im Umgang mit nicht-seismisch induzierten Tsunamis gibt. Studien bildeten die Grundlage für die Ableitung umfassender Schlussfolgerungen und Empfehlungen zur Verbesserung der Tsunami-Vorsorge auf lokaler Ebene mit Schwerpunkt auf nicht-seismisch induzierten Ereignissen. Der Verbund-Meilenstein wurde erreicht.

Ferner waren auch die Ergebnisse in weiteren Arbeitspaketen durch die Mitwirkung des GFZ erfolgreich:

AP210: Die Identifizierung und Kategorisierung von potentiell tsunamigenen Vulkanen in Südostasien sowie ein damit erstellter Vulkankatalog wurde erfolgreich abgeschlossen. Diese Ergebnisse wurden in einer gemeinsamen GFZ-DLR Publikation unter Einbezug indonesischer Partner veröffentlicht (Zorn et al. 2022). Das GFZ hat sich an der Satellitenbeobachtung beteiligt und insbesondere die Interpretation von Veränderungen an Vulkanoberflächen mittels InSAR Deformationskarten am Beispiel von Anak Krakatau erarbeitet.

AP220: Das GFZ hat sowohl bei der Lokalisierung von Änderungen der Vulkanflanken, als auch bei InSAR Zeitreihenprozessierungen beigetragen (unter Anleitung DLR).

AP510: Gemeinsam mit den deutschen und indonesischen Projektpartnern hat das GFZ zur Ausarbeitung der Politikempfehlung aktiv beigetragen (Leitung FUB). Die Erstellung der Politikempfehlung auf Basis der im Projekt erzielten Ergebnisse „Joint Research between Indonesia and Germany on Volcanic and Landslide induced Tsunamis: Recommendations for the Way Ahead“ wurde den Indonesischen Partnern BRIN überreicht.

AP530: Das GFZ hat insbesondere an der Planung und Durchführung von Veranstaltungen für die Ausbildung und den wissenschaftliche Austausch und Video-Schaltungen teilgenommen, so dass auch dieser Verbund-Meilenstein erfüllt wurde und in Berichten dokumentiert werden konnte.



Teil I Kurzbericht

Förderkennzeichen: 03G0906B

Zuwendungsempfänger: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

Projektleitung: Prof. Dr. Günter Strunz

Verbundprojekt: **Client-II Tsunami_Risk: Durch Vulkane und Hangrutschungen induzierte Tsunamis**

Vorhaben: **Forschung zu satellitengestütztem Vulkan-Monitoring**

Laufzeit: 01.03.2021 – 29.02.2024

Berichtszeitraum: 01.03.2021 – 29.02.2024

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03G0906B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen / den Autoren.

1. Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand

Aufgabenstellung:

Ziel des durchgeführten TSUNAMI_RISK-DLR Vorhabens war die Entwicklung innovativer Verfahren für eine Multiskalen- und Multisensor-Erdbeobachtung zur Erfassung und Analyse von Aktivitäten und Ausbruchprozessen an indonesischen Vulkanen, die ein hohes Risiko für eine Tsunamiauslösung darstellen. Dabei sollten Daten von zeitlich hochauflösenden Thermalsensoren mit Daten von räumlich hochauflösenden multispektral und Radarsensoren kombiniert werden.

Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde:

Die satellitenbasierte Fernerkundung kann wertvolle Beiträge liefern, um das Monitoring und die Untersuchung von aktiven Vulkanen zu unterstützen¹. Insbesondere während explosiven Eruptionen sind Vulkane nicht zugänglich, sodass es schwer ist, in situ Informationen zu erhalten. Seit den frühen 1980er Jahren ist die thermale Erdbeobachtung eine etablierte Methodik zum Monitoring von Vulkanen^{2,3}. Algorithmen auf Basis von zeitlich hochauflösenden Thermalsensoren⁴ (wie MODIS) und auf

¹ Francis, P.W., Rothery, D.A. 2000: Remote sensing of active volcanoes. Ann. Rev. Earth Planetary Sci. 28, 81–106.

² Bonneville, A., Vasseur, G. & Kerr, Y. 1985: Satellite thermal infrared observations of Mt. Etna after the 17th March 1981 eruption. J. Volcan. Geotherm. Res. 24, 293–313.

³ Wiesnet, D.R., D'Aguanno, J. 1982: Thermal imagery of Mount Erebus from the NOAA-6 satellite. Antarc. J. U.S. 17, 32–34.

⁴ Coppola, D. et al. 2016: Enhanced volcanic hot-spot detection using MODIS IR data: results from the MIROVA system. In Detecting, Modelling and Responding to Effusive Eruptions, ed.: Harris, A.J.L., T. De Groeve, F. Garel, S.A. Carn, Geological Society: London, 2016; Special Publications 426.

Basis von räumlich hochauflösenden Infrarotsensoren⁵ (z.B. Landsat und Sentinel-2) ermöglichen die automatisierte Erfassung vulkanischer Aktivität. Differentielle Radar-Interferometrie (DInSAR) Methoden eignen sich sehr gut zur Messung von Bodendeformationen, bspw. Veränderungen der Stabilität von Vulkanflanken⁶. Hochaufgelöste optische und Radar Erdbeobachtungsdaten werden für die Kartierung von Lavaströmen⁷ und pyroklastischen Strömen⁸ verwendet.

2. Ablauf des Vorhabens

Das Verbundprojekt TSUNAMI_RISK gliederte sich in fünf Arbeitspakete (AP), wobei das DLR die AP 200 und 500 leitete: AP100 *Projektkommunikation*, AP200: *Geowiss. Risikoidentifikation u. Monitoring*, AP300: *Geowiss. Forschung Modellierung u. Analyse*, AP400: *Sozialwiss. Forschung*, AP500: *Politikempfehlungen u. Praxistransfer*. Des Weiteren leitete das DLR die Unter-APs 220 *Fernerkundungsbasiertes Vulkanmonitoring* und AP 530 *Ausbildung u. wissenschaftlicher Austausch*. Das DLR war außerdem beteiligt an den APs 100, 210 *Identifizierung v. Risikogebieten* und 510 *Politikempfehlungen zur Steigerung der gesellschaftlichen Resilienz*. Zur Fortschrittskontrolle wurden drei übergeordnete Verbund-Meilensteine definiert: 1) *Vorläufige Identifizierung von Risikogebieten & Konzepte für Methoden erstellt*; 2) *Entwicklung der Methoden in erster Form abgeschlossen*; 3) *Übergabe in Ergebnistransfer abgeschlossen*. Innerhalb der APs wurden Vorhabenbezogene Meilensteine definiert und erarbeitet.

3. Wesentliche Ergebnisse

Das DLR arbeitete sowohl mit deutschen als auch indonesischen Projektpartnern zusammen. Zu den wichtigsten, unter DLR Leitung bzw. DLR Beteiligung, erzielten Ergebnissen gehören:

- AP210: Die Identifizierung und Kategorisierung von potentiell tsunamigenen Vulkanen in Südostasien sowie ein damit erstellter Vulkankatalog. Diese Ergebnisse wurden in einer gemeinsamen GFZ-DLR Publikation unter Einbezug indonesischer Partner veröffentlicht (Zorn et al. 2022⁹).
- AP220: Am DLR wurde ein innovatives Verfahren zur Erkennung von Lava- und Pyroklastischen Strömen auf Basis hoch und sehr hochauflösender optischer Daten (Sentinel-2 und PlanetScope) unter Einbezug von thermalen Anomalien und topographischen Informationen entwickelt (Rösch und Plank 2022¹⁰).
- AP220: Am DLR wurde in Kooperation mit indonesischen Partnern (BRIN) eine auf wetterunabhängigen Radarsatellitendaten basierte Methodik entwickelt, die die automatisierte Erfassung von Veränderungen auch an den oft durch Wolken bedeckten Vulkanen Südostasiens ermöglicht (Orynbaikyzy et al. 2023¹¹).
- AP220 und AP530: Im Rahmen des Aufenthalts eines indonesischen Gastwissenschaftlers (von BRIN) am DLR wurde gemeinsam an der Übertragbarkeit von maschinellen Lernverfahren zur Erfassung von Veränderungen an Vulkanen gearbeitet. Eine gemeinsame wissenschaftliche Veröffentlichung hierzu ist kurz vor der Fertigstellung.
- AP510: Gemeinsam mit den deutschen und indonesischen Projektpartnern arbeitete das DLR an der Erstellung einer Politikempfehlung auf Basis der im Projekt erzielten Ergebnisse „Joint Research between Indonesia and Germany on Volcanic and Landslide induced Tsunamis: Recommendations for the Way Ahead“

⁵ Marchese, F. et al. 2019: A Multi-Channel Algorithm for Mapping Volcanic Thermal Anomalies by Means of Sentinel-2 MSI and Landsat-8 OLI Data. Remote Sens. 11, 2876.

⁶ Walter, T.R. et al. 2019: Complex hazard cascade culminating in the Anak Krakatau sector collapse. Nature Comm. 10.

⁷ Arnold, D.W.D. et al. 2017: Decaying lava extrusion rate at El Reventador Volcano, Ecuador, measured using high-resolution satellite radar. J. Geophys. Res.: Solid Earth 122, 9966-9988.

⁸ Solikhin, A. et al. 2015: High-spatial-resolution imagery helps map deposits of the large (VEI 4) 2010 Merapi Volcano eruption and their impact. Bull. Volcan. 77, 1-23.

⁹ Zorn, E.U., Orynbaikyzy, A., Plank, S., Babeyko, A., Darmawan, H., Robbany, I.F., Walter, T.R., 2022. Identification and ranking of subaerial volcanic tsunami hazard sources in Southeast Asia. Nat. Haz. Earth Sys. Sci. 22, 3083–3104.

¹⁰ Rösch, M., Plank, S., 2022. Detailed Mapping of Lava and Ash Deposits at Indonesian Volcanoes by Means of VHR PlanetScope Change Detection. Remote Sens. 14, 1168.

¹¹ Orynbaikyzy, A., Plank, S., Vetrita, Y., Martinis, S., Santoso, I., Dwi Ismanto, R., Chusnayah, F., Tjahjaningsih, A., Suwarsono, Genzano, N., Marchese, F., Khomarudin, M.R., Strunz, G., 2023. Joint use of Sentinel-2 and Sentinel-1 data for rapid mapping of volcanic eruption deposits in Southeast Asia. Int. J. App. Earth Obs. Geoinf. 116, 103166.



Teil I Kurzbericht

Förderkennzeichen: 03G0906C

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Braunschweig, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Abtl. Hydromechanik, Küsteningenieurwesen und Seebau

Teilprojektleitung: Prof. Dr.-Ing. habil. Nils Goseberg

Verbundprojekt: **Client-II TSUNAMI_RISK: Durch Vulkane und Hangrutschungen induzierte Tsunamis**

Vorhaben: **Modellierung der Tsunami-Erzeugung und -ausbreitung**

Laufzeit: 01.03.2021 – 29.02.2024

Berichtszeitraum: 01.03.2021 – 29.02.2024

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03G0906C gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen / den Autoren.

1. Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand

Trotz des seit 2011 in Indonesien betriebenen Frühwarnsystems für seismisch induzierte Erdbeben kam es u.a. 2018 zu verheerenden Tsunamis, die zahlreiche Opfer forderten (Annunziato et al., 2019). Hierbei handelte es sich um hangrutsch-induzierte Tsunamis, welche durch das Abbrechen oder Abrutschen von Bergflanken entstehen. Dies kann z.B. infolge vulkanischer Aktivität oder Erdbeben ausgelöst werden. Ziel des TSUNAMI_RISK Projektes ist es, die Vorsorge, Frühwarnung und Schadensminderung solcher (kaskadierender) Ereignisse zu verbessern.

Der Stand der Forschung zum Zusammenhang zwischen vulkanischen Aktivitäten und Tsunamis besagt, dass Vulkanflankeninstabilität eine der häufigsten Ursachen für tsunamigene Ereignisse ist, wobei bis zu 15% der Fälle auf diese zurückzuführen sind (Paris et al., 2014). Ursachen können auf natürliche Verwitterungsprozesse, Vulkaneruptionen sowie auf seismische Aktivität zurückgeführt werden. Forschungsarbeiten zu zweidimensionalen hangrutschinduzierten Tsunamis existieren seit den 1960er Jahren, Studien zu dreidimensionalen Effekten haben vor allem im letzten Jahrzehnt vermehrt stattgefunden (Mohammed & Fritz, 2012). Bisherige Arbeiten haben jedoch keine Erkenntnisse über die Interaktion zwischen der Gleitkinematik von Hangrutschmassen und dem Impulsübertrag in Ozeane auf Energiebilanzebene geliefert (Heller & Ruffini, 2023). Die Herausforderung liegt darin, dass bisher keine Echtzeitbeobachtungen von großvolumigen Hangrutschungen vorlagen, was die Bewertung und Erforschung erschwerten und zu kontroversen Diskussionen führt.

2. Ablauf des Vorhabens

Das Arbeitspaket 300 „Geowissenschaftliche Forschung – Modellierung und Analyse“ wurde von der TU Braunschweig koordiniert. Das Teilarbeitspaket 330 wurde an der TU Braunschweig bearbeitet.

Ziel des Arbeitspaketes 330 war die Untersuchung tsunamigener Hangrutschungen mittels physikalischer Modelle sowie Anwendung numerischer Simulationsverfahren, die in bestehende Frühwarnsysteme integriert werden können. Im Detail waren folgende Aufgabenpakete definiert:

- **AP 330.1 Physikalische 2D Versuche:** Erprobung und Entwicklung eines verbesserten Laborverfahrens für die Vulkan-/Hanginstabilität und Untersuchung unterschiedlicher Kollapsmassen.
- **AP 330.2 Physikalische 3D Versuche:** Modellierung vergangener Ereignisse im Zielland Indonesien mittels Datenbasis der Verbundpartner (DLR, GFZ) und Analyse von Tsunamientstehung und -ausbreitung.
- **AP 330.3 Numerische Simulation:** 3D Modell auf Basis der Navier-Stokes-Gleichungen zur umfassenden Simulation der physikalischen Prozesse und Parameter und Bereitstellung tiefengemittelter, weniger rechenintensiver Simulationsverfahren für Frühwarnsysteme.

3. Wesentliche Ergebnisse

Es wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- Entwicklung und Prüfung eines neuen Versuchsaufbaus,
- Versuchsvorbereitung, -durchführung und -optimierung,
- Analyse der Wellenamplitude,
- Analyse der Rutschgeschwindigkeit,
- Evaluation des numerischen Modells.

Literaturverzeichnis

- Annunziato, A., Prasetya, G. & Husrin, S. (2019). Anak Krakatau emergency early warning system. *Science of Tsunami Hazards*.
- Heller, V. & Ruffini, G. (2023). A critical review about generic subaerial landslide-tsunami experiments and options for a needed step change. *Earth-Science Reviews*, 242, 104459. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104459>
- Mohammed, F. & Fritz, H. M. (2012). Physical modeling of tsunamis generated by three-dimensional deformable granular landslides. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C11). <https://doi.org/10.1029/2011JC007850>
- Paris, R., Switzer, A. D., Belousova, M., Belousov, A., Ontowirjo, B., Whelley, P. L. & Ulvrova, M. (2014). Volcanic tsunami: a review of source mechanisms, past events and hazards in Southeast Asia (Indonesia, Philippines, Papua New Guinea). *Natural Hazards*, 70(1), 447–470. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0822-8>



Teil I Kurzbericht

Förderkennzeichen: 03G0906D

Zuwendungsempfänger: Krisen- und Katastrophenforschungsstelle (KFS) der Freien Universität Berlin (FUB) Projektleitung: Prof. Dr. Martin Voss

Verbundprojekt: **Client-II TsunamiRisk: Durch Vulkane und Hangrutschungen induzierte Tsunamis**

Vorhaben: **Wissenskulturen und Praktiken des Katastrophenrisikomanagements in Indonesien**

Laufzeit: 01.03.2021 – 29.02.2024

Berichtszeitraum: 01.03.2021 – 29.02.2024

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03G0906D gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen / den Autoren.

1. Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand

Das Teilvorhaben der Krisen- und Katastrophenforschungsstelle (KFS) der Freien Universität Berlin (FUB) erarbeitete die Rahmenbedingungen und Kontexte, die für das Gesamtvorhaben und das über-geordnete Ziel einer besseren Vorbereitung der exponierten Bevölkerung auf nicht-seismisch induzierte Tsunamis, insbesondere in Indonesien, relevant sind. Bei der Ausarbeitung des wissenschaftlichen Stands zum Nexus von Katastrophe und Kultur wurden drei Schlüsseldesiderate identifiziert: es finden sich nur vereinzelte Hinweise auf tiefgründigere soziale und diskursive Prozesse, die „Kultur“ ausmachen, sodass hier ein großer Forschungsbedarf gesehen wird; eine starke Prägung durch einen anthropozentrischen, westlichen und positivistischen Blickwinkel, weshalb eine differenziertere Betrachtung im Lichte rezenter wissenschaftlicher Debatten erforderlich scheint; und ein Verständnis von Kultur als „exotische“ Praktiken, die hauptsächlich auf lokaler Ebene zu finden sind, was einem rezenten sozialwissenschaftlichen Kulturverständnis in keiner Weise gerecht wird. Folglich wurde das Rahmenkonzept *Katastrophen*Kultur* so ausgelegt, dass es nicht nur auf die verschiedenen geografischen Ebenen vorhandener Handlungen und Deutungsmuster eingeht, sondern auch (episte-mologische) Annahmen und Praktiken einbezieht, die zum Beispiel innerhalb spezifischer geowissenschaftlicher Disziplinen zu finden sind. Innerhalb dieses Rahmens gliederte sich das Teilvorhaben in drei aufeinander aufbauende Forschungskomponenten. Die Teilstudie 1 (AP410.1) untersuchte mittels eines soziologischen Zugangs die Deutung und Bewältigung von und den Umgang mit multiplen Risiken und Katastrophen am Beispiel des Tsunamirisikomanagements. Dabei wurden die soziokulturell und historisch gewachsenen Kontextbedingungen des Katastrophenrisikomanagements in Indonesien im Allgemeinen erforscht und es wurde vertieft auf die Fallstudienprovinz Banten eingegangen, die 2018 vom Anak Krakatau-induzierten Tsunami betroffen war. Die Teilstudie 2 (AP410.2) ging vor dem Hintergrund dieser anwendungsorientierten Grundlagenforschung am Beispiel geowissenschaftlichen Wissens der Frage nach, wie wissenschaftliches Wissen im behördlichen Katastrophenrisikomanagement handlungspraktisch wirksam wird. Dazu wurde in Interviews und Workshops mit geo-

wissenschaftlichen PartnerInnen des Konsortiums sowie indonesischen Akteuren aus den Geowissenschaften und für das Katastrophenrisikomanagement relevanten BehördenvertreterInnen untersucht, wie geowissenschaftliches Wissen in die Praxis des Katastrophenrisikomanagements eingeht bzw. welche Faktoren die Praxisrelevanz geowissenschaftlichen Wissens maßgeblich beeinflussen oder der Umsetzung in operative Praktiken zuwiderlaufen. In einem weiteren von der KFS geleiteten Arbeitspaket, der Teilstudie 3 (AP510), wurden die für die Steigerung von Kapazitäten, Effektivität und Effizienz des Tsunamirisikomanagements im Gesamtvorhaben generierten Befunde zusammengeführt und als Handlungsempfehlungen aufbereitet. Zusätzlich organisierte die KFS in Zusammenarbeit mit den AP400-PartnerInnen eine mehrtägige Geländeexkursion in die Provinz Banten, bei der auch geowissenschaftliche PartnerInnen teilnahmen und in direkten Kontakt mit lokalen AkteurInnen treten konnten. Die KFS beteiligte sich zudem an einer deutsch-indonesischen Betreuung einer Masterarbeit an der Universitas Indonesia in AP530 „Ausbildung und Wissenschaftlicher Austausch“. Auch konnte die KFS auf Nachfrage der ProjektpartnerInnen ihre fachliche und methodologische Expertise in der sozialwissenschaftlichen Krisen- und Katastrophenforschung einbringen, z. B. mit einem Input zum Vorgehen eines durch die Technische Universität Berlin durchgeführten qualitativen Datenerhebungsprozesses zur Modellierung von Massenbewegungen.

2. Ablauf des Vorhabens

Durch die Covid-Pandemie konnten Dienstreisen, v. a. nach Indonesien, erst ab dem zweiten Projektjahr stattfinden. In enger Absprache mit dem Projektträger wurden die geplanten Workshops zeitlich und/oder inhaltlich entsprechend angepasst, um alle Aufgaben in Umfang und Güte durchführen zu können. Im Zuge der Entwicklung der Pandemielage konnten 2022 zwei Forschungs- und Datenerhebungsreisen nach Indonesien durchgeführt werden. Mithilfe zweier StudentInnen, die im Rahmen des Teilvorhabens ihre Masterarbeiten verfassten, wurden insgesamt 37 GeowissenschaftlerInnen und indonesische PraxisakteurInnen interviewt und die Fallstudie in Banten erarbeitet. Insgesamt hat die KFS fünf Workshops (co-)organisiert: Workshop 1 zu „Disaster*cultures, actors, structures, and challenges in Indonesia“ (an der Universitas Indonesia in Jakarta im Juni 2022); Workshop 2 zur „Science and Technology Studies-Perspektive: Sozialwissenschaften und Geowissenschaften, zur Praxisrelevanz geowissenschaftlichen Wissens“ (am GFZ in Potsdam im Februar 2022); Workshop 3 zu „Disaster*risk cultures and the science-policy interface“ (an der National Research and Innovation Agency BRIN in Jakarta im November 2022); Workshop 4 mit „SWOT-Analyse“ (ebenfalls an der BRIN in Jakarta im November 2022, bei der das Technische Hilfswerk bei der Konzipierung federführend war); Workshop 5 „Abschlussveranstaltung“ (am GFZ in Potsdam im Februar 2024). Das Herausarbeiten der Handlungsempfehlungen erfolgte im dritten Projektjahr.

3. Wesentliche Ergebnisse

Der Ansatz von *Katastrophen*Kultur* wurde innerhalb des Teilvorhabens auf vier wesentlichen Ebenen herausgearbeitet und angewendet: 1) auf theoretisch-konzeptioneller Ebene; 2) auf (sub-)nationaler Ebene, indem soziohistorisch geformte *Katastrophen*Kulturen* in Indonesien untersucht wurden; 3) auf lokaler Ebene durch die Fallstudie Banten; und 4) auf Ebene von Forschungsprojekten, in denen die Vielfalt von *Katastrophen*Kulturen*, die im Umfeld des Forschungsprojekts TsunamiRisk existieren, analysiert wurden. Die Ergebnisse wurden in mehreren Vorträgen und Publikationen zugänglich gemacht. Beiträge der TsunamiRisk-PartnerInnen wurden in Handlungsempfehlungen zur besseren Vorbereitung auf nicht-seismisch induzierte Tsunamis, insbesondere in Indonesien, integriert. Die Forschung (Literaturrecherche, Interviews, fünf Workshops und teilnehmende Beobachtung) erfolgte in enger Abstimmung mit indonesischen Organisationen der Tsunamiwarnung und des Bevölkerungsschutzes sowie Forschungsinstitutionen, die bereits vor Projektstart die Notwendigkeit der Forschungsschwerpunkte des TsunamiRisk-Projektes betonten. Auf AP410-Ebene wurde insbesondere mit sechs indonesischen SozialwissenschaftlerInnen der BRIN und der Universitas Indonesia zusammengearbeitet. Zusätzlich fand ein Austausch mit dem durch Prof. Dr. Martin Voss geleiteten BMBF-Projekts INCREASE statt.



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Teil I Kurzbericht

Förderkennzeichen: 03G0906E

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Berlin
Projektleitung: Prof. Dr. Tomas Fernandez-Steeger

Verbundprojekt: **Client-II TsunamiRisk: Durch Vulkane und Hangrutschungen induzierte Tsunamis**

Vorhaben: **Lokalisierung und Dynamik von und durch Hangrutschungen induzierter Tsunamis**

Laufzeit: 01.03.2021 – 29.02.2024

Berichtszeitraum: 01.03.2021 – 29.02.2024

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03G0906E gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen / den Autoren.

1. Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand

Die Arbeiten der Technischen Universität Berlin beschäftigten sich mit der Gefährdungsanalyse und Modellierung hinsichtlich von Hangrutschungen als potenzielle Auslöser von Tsunamis. Die Untersuchungen waren in zwei Arbeitspakete aufgeteilt. Im Arbeitspaket 210 sollte die Küste morphologisch und geographisch mithilfe von Geoinformationssystemen charakterisiert und in Gefährdungsklassen eingeordnet werden. Arbeitspaket 320 beinhaltete die Modellierung und anschließende numerische Simulation der Standsicherheit charakteristischer küstennaher und submariner Hänge unter seismischen Einflüssen mithilfe von Particle Flow Code (PFC). Die Modellierungsergebnisse sollten fortführend als Grundlage für die Wellenmodellierung von rutschungsinduzierten Tsunamis genutzt werden.

2. Ablauf des Vorhabens

Aus administrativen Gründen konnte die Einstellung der Projektmitarbeiterin erst zum 05.07.2021, 4 Monate später als geplant, erfolgen. Auf Grund der Reisebeschränkungen im Rahmen der Corona-Schutzmaßnahmen konnten im Jahr 2021 keine Reisen durchgeführt werden. Insbesondere das geplante Kick-Off Meeting in Indonesien konnte nicht stattfinden. Während einer Projektreise der Deutschen Projektbearbeiter*innen im November 2022 nach Indonesien wurde ein Meeting mit Wissenschaftler*innen der UGM in Yogyakarta durchgeführt und Möglichkeiten der Kooperation im AP 320 erörtert. Aufgrund von weiterhin bestehenden Einschränkungen konnte jedoch keine Datenerhebung stattfinden.

3. Wesentliche Ergebnisse

Wesentliche Ergebnisse umfassen eine Datenbank historischer Fallstudien sowie eine auf heuristisch ausgewählten Parametern aufgebaute experten-basierte Umfrage mit dem Ziel der Entwicklung einer

Methode zur Suszeptibilitätsanalyse zur Kartierung gefährdeter Gebiete. Derzeit ist die Erarbeitung eines Memorandum of Understanding zwischen der TU Berlin und der UGM in Bearbeitung, um eine engere Zusammenarbeit in Zukunft zu ermöglichen.



Teil I Kurzbericht

Förderkennzeichen: 03G0906F

Zuwendungsempfänger: Bundesanstalt Technisches Hilfswerk
Projektleitung: Dr. Frank Altenbrunn

Verbundprojekt: **Client-II TsunamiRisk: Durch Vulkane und Hangrutschungen induzierte Tsunamis**

Vorhaben: **Institutionelle Aspekte des operativen Katastrophenrisikomanagements in Indonesien**

Laufzeit: 01.03.2021 – 29.02.2024

Berichtszeitraum: 01.03.2021 – 29.02.2024

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03G0906F gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen / den Autoren.

1. Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand

Das Technische Hilfswerk (THW) ist zunehmend international tätig und übernimmt komplexe Aufgaben in Auslandseinsätzen und internationalen Übungen. Hierbei muss das THW seine Einsatzstrukturen und -prozeduren kontinuierlich anpassen und weiterentwickeln, um den wechselnden Anforderungen gerecht zu werden. In Projekten wie dem Tsunami_Risk bringt das THW sein spezielles Wissen ein, insbesondere in den Bereichen Capacity Building und Katastrophenrisikomanagement. Diese internationalen Engagements tragen nicht nur zur globalen Katastrophenhilfe bei, sondern fördern auch den Wissensaustausch und die Weiterentwicklung des THW selbst.

Im Forschungsprojekt Tsunami_Risk leitete das Technische Hilfswerk (THW) das Arbeitspaket 420, das sich den "Institutionellen Aspekten des operativen Katastrophenrisikomanagements" widmete. Hauptaufgaben waren die Untersuchung der behördlichen Kommunikationsstrukturen und -prozesse, das Identifizieren von Optimierungsbedarfen und das Formulieren von Handlungsempfehlungen. Zusätzlich sollte im Rahmen dieses Arbeitspakets einen "Stresstest-Workshop" durchgeführt werden, der darauf abzielte bestehende und potenzielle Schwachstellen im System zu identifizieren und präzise zu beschreiben. Das THW war außerdem in Arbeitspaket 510 involviert, welches sich die Erstellung eines Policy Briefs zum Ziel setzte. Für das Policy Brief relevante Erkenntnisse aus Arbeitspaket 420 sollten aufgearbeitet und zugeliefert werden.

2. Ablauf des Vorhabens

Das Projekt startete am 1. März 2021, und das THW nahm planmäßig am 1. März 2022 die Arbeit im zweiten Projektjahr auf. Zu Beginn des Teilvorhabens wurden erste Treffen abgehalten und Literaturrecherchen für das Arbeitspaket 420 durchgeführt. Außerdem wurden wichtige Kontakte zu

den indonesischen Partnerorganisationen geknüpft. Eine Exkursion nach Indonesien erfolgte im November 2022, während der am 18. November ein Stress-Test Workshop vor Ort durchgeführt wurde. Zusätzlich wurden in Indonesien Experteninterviews geführt. Erste Ergebnisse aus einem Vergleich deutscher und indonesischer Frühwarnsysteme wurden zusammen mit Arbeitspaket 430 im Januar 2023 beim Fachkongress des Bundesamts für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe vorgestellt, im Tagungsband publiziert und auf der Website des Deutschen Komitees für Katastrophenvorsorge veröffentlicht. Parallel wurden Berichte verfasst, im Gesamten das Ergebnispapier „Praktische Anschlussfähigkeiten, Handlungs- und Anpassungsoptionen aus der operativen Perspektive“ ergeben. Zur Vertiefung der Ergebnisse erhielt im Dezember 2023 Dr. Yus Budiyo von der Nationalen Forschungs- und Innovationsagentur (BRIN) einen Unterauftrag zur Prüfung der Effizienz von Tsunami-Frühwarnsystemen, insbesondere bei atypischen Tsunamis. Ergebnisse, die im Zuge der Politikempfehlungen für Arbeitspaket 510 relevant waren, wurden Anfang 2024 zugeliefert und bei einem Workshop im Zuge der Abschlussveranstaltung im Februar 2024 konsolidiert. Das Projekt endete planmäßig am 29. April 2024.

3. Wesentliche Ergebnisse

Das Teilvorhaben hat tiefgehende Einblicke in das Tsunami-Frühwarnsystem Indonesiens (InaTEWS) sowie in die bestehenden Herausforderungen und Verbesserungspotenziale sowohl im indonesischen als auch im deutschen Kontext geliefert. Die zentrale Einheit dieses Systems ist das Nationale Tsunami-Warnzentrum (NTWC). Das NTWC ist dafür verantwortlich, Daten zu analysieren und im Falle einer Bedrohung schnell Warnungen zu generieren und zu verbreiten. Diese Warnungen werden über eine Vielzahl von Kanälen kommuniziert, einschließlich traditioneller und sozialer Medien. Lokale Datenanbieter spielen eine entscheidende Rolle bei der Lieferung von Echtzeitdaten, die für die Früherkennung und Analyse von Tsunami-Gefahren unerlässlich sind. Diese Kooperationen stärken die Kapazitäten von InaTEWS, unterstützt durch internationale Beiträge und die technische Unterstützung durch internationale Organisationen. Trotz der Stärken des InaTEWS stehen Indonesien und seine Partner vor erheblichen Herausforderungen, darunter die Aufrechterhaltung der technologischen Infrastruktur, die Gewährleistung einer gleichmäßigen Warnverbreitung über diverse und oft abgelegene Inseln hinweg und die Notwendigkeit kontinuierlicher technologischer Upgrades. Diese Probleme erfordern kontinuierliche Investitionen und Innovationen, um die Effektivität des Warnsystems zu sichern. Zudem spielen lokale Behörden eine entscheidende Rolle, unterstützt durch Standardverfahren (SOPs), die klare Handlungsanweisungen bieten und regelmäßige Simulationsübungen einschließen, um die lokalen Kapazitäten zu stärken.

Außerdem zeigte sich die Wichtigkeit der sozialen Dimension von Frühwarnsystemen, die ein tiefgehendes Verständnis der lokalen Gemeinschaften und ihrer Handlungsmöglichkeiten in Notfallsituationen erfordert. Dieser Ansatz fördert die Entwicklung von Warnsystemen, die nicht nur technologisch fortschrittlich, sondern auch in der Gesellschaft tief verwurzelt und akzeptiert sind.

Diese SOPs der indonesischen Behörden sind auf die spezifischen geographischen und seismologischen Bedingungen Indonesiens zugeschnitten und beinhalten Maßnahmen von der sofortigen Erkennung bis zur endgültigen Warnverbreitung.

Die 2021 erlebte Flutkatastrophe im Ahrtal zeigte deutliche Parallelen zu den Herausforderungen, mit denen sich Indonesien konfrontiert sieht, insbesondere in Bezug auf kurze Warnzeiten und Unsicherheiten in der Datensituation. Dies unterstreicht die Dringlichkeit, die Frühwarnsysteme in Deutschland zu verbessern, indem man von den langjährigen Erfahrungen Indonesiens lernt und die kommunale Ebene stärker in den Fokus rückt.

Zusammenfassend hat das Projekt gezeigt, dass eine effektive Tsunami-Frühwarnung eine Kombination aus fortschrittlicher Technologie, tiefem Verständnis lokaler Bedingungen und starker internationaler Zusammenarbeit erfordert. Die Erfahrungen und Erkenntnisse aus diesem Projekt bieten wertvolle Ansätze für die Weiterentwicklung der Katastrophenvorsorge in Indonesien und darüber hinaus.



Teil I Kurzbericht

Förderkennzeichen: 03G0906G

Zuwendungsempfänger: gempa GmbH
Projektleitung: Dr. Bernd Weber

Verbundprojekt: **Client II - TsunamiRisk: Durch Vulkane und Hangrutschungen induzierte Tsunamis**

Vorhaben: **Technologische Umsetzung konkreter Projektergebnisse in InaTEWS**

Laufzeit: 01.03.2021 – 29.02.2024

Berichtszeitraum: 01.03.2021 – 29.02.2024

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03G0906G gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen / den Autoren.

1. Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand

Das Projekt „Client II - TsunamiRisk: Durch Vulkane und Hangrutschungen induzierte Tsunamis; Vorhaben: Technologische Umsetzung konkreter Projektergebnisse in InaTEWS" zielt darauf ab, die Risikoanalyse und Warnsysteme für tsunamigefährdete Gebiete durch die Integration des in AP200 und AP300 erstellten Kartenmaterials (VBMS-520-01) und der Entwicklung innovativer Plugins zur Integration von Multisensordaten (VBMS-520-02) zu verbessern. Diese Plugins sind für den Einsatz im Datenakquise Server (CAPS), betrieben vom BMKG (Meteorologisches, Klimatologisches und Geophysikalisches Amt Indonesiens), vorgesehen. Der Fokus liegt auf folgenden Aufgaben:

- **Entwicklung von Plugins zur Integration der Multisensordaten in den vom BMKG betriebenen Datenakquise Server (CAPS)**

Das "Looking Into the Continents from Space with Synthetic Aperture Radar" (LiCSAR) System liefert hochauflösende InSAR-Daten, darunter "coherence images", "wrapped phase images" und "unwrapped phase images". Die Images werden durch das Plugin vom Webservice des COMET-LiCS Sentinel-1 InSAR Portal heruntergeladen und dann in das Archiv von CAPS gespeichert. Dadurch wird es möglich, historische LiCSAR Daten aus dem Archiv abzufragen. Gleichzeitig werden die aktuellen Images als Kartenlayer für SeisComP bereitgestellt und nach Bedarf visualisiert. Die LiCSAR Daten sind entscheidend für die Überwachung von Bodenbewegungen und das frühzeitige Erkennen von Tsunamirisiken durch Vulkane oder Hangrutschungen.

- **Integration und Visualisierung der Kataloge von tsunamigenen Vulkanen und Küstenbereiche mit Tsunamigefahr**

Das von Arbeitspaket AP200 im GIS-Format bereitgestellte Kartenmaterial der identifizierten Risikogebiete wurde als grafische Layer in die bestehenden Benutzeroberflächen des SeisComP-Systems integriert. SeisComP ist ein vom GFZ und der gempa GmbH entwickeltes System zur Echtzeit-Erdebebedetektion, welches vom BMKG betrieben wird. Die Integration erlaubt, das bereitgestellte Kartenmaterial in allen grafischen Oberflächen von SeisComP mit einer Kartenansicht darzustellen. Da die vom BMKG verwendeten grafischen Oberflächen unterschiedliche Anwendungsfälle haben, zum Beispiel die operationale Echtzeit-Erdebebenauswertung oder eine allgemeine Gefahren- und Risikoeinschätzung, kann das Kartenmaterial so flexibel für die Anwendungsgebiete konfiguriert und nach Bedarf visualisiert werden. Die unterstützten Kartenlayer ermöglichen eine Anpassung des Farbschemas, der Transparenz, der verwendeten Symbole, der Visualisierung je nach Zoomlevel und der Legende.

- **Einbindung tsunamigener Küstenformen**

Analog zu dem Kartenmaterial von AP210 wird das von AP320 im GIS-Format zur Verfügung gestellte Kartenmaterial der tsunamigenen Küstenformen als grafischer Layer in die existierenden grafischen Oberflächen integriert. Dies trägt zur präziseren Identifikation von Gebieten bei, die einem erhöhten Risiko durch Tsunamis aufgrund ihrer geografischen und geologischen Beschaffenheit ausgesetzt sind.

- **Integration seismischer Methoden in InaTEWS**

Der für die Detektion von Erdbeben optimierte Picker verarbeitet seismische Breitbanddaten und konzentriert sich darauf, tieffrequente Signale zu erkennen, die typisch für Erdbeben sind. Er nutzt dafür einen Bandpassfilter mit Eckfrequenzen von 0,01 Hz und 0,1 Hz sowie einen STALTA-Algorithmus. Erdbebensignale zeichnen sich durch eine dominante Tieffrequenzenergie aus, ohne signifikante Energie in den hohen Frequenzen. Zur präzisen Identifikation von Erdbeben und zur Vermeidung von Fehlalarmen durch starke Erdbeben wurde der Picker so implementiert, dass er die Anwesenheit von hochfrequenten Signalen überprüft. Die endgültige Entscheidung, ob ein Pick gesendet wird, hängt davon ab, ob kein hochfrequentes Signal vorhanden ist. Existieren hochfrequente Signale, reagiert der Picker nicht und vermeidet somit Fehlalarme, die durch Erdbeben verursacht wurden. Diese Strategie gewährleistet, dass nur bei tatsächlichem Vorhandensein von Erdbeben-indikativen Tieffrequenzsignalen und dem Fehlen von Erdbebentypischen Hochfrequenzsignalen ein Alarm ausgelöst wird. Ursprünglich war geplant, die Analyse der langperiodischen Anregung (Vergleich kurz- vs langperiodischen Anregung und/oder Backprojection) bestimmten Warnkriterien in die Erdbebenklassifizierungssoftware KAPPA zu integrieren. Diese Maßnahme sollte eine verbesserte Beurteilung der Erdbeben Daten im Hinblick auf das Tsunamirisiko ermöglichen. Statt einer Integration in KAPPA wurde mit dem BMKG abgestimmt einen akustischen Alarm zu implementieren. Diese Entscheidung steht im Einklang mit den generellen Standard Operation Procedures (SOPs) des BMKG, die auch im Falle eines Erdbebens eine Sirene und eine akustische Nachricht vorsehen.

2. Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben verlief in mehreren Schritten, die sowohl die Entwicklung als auch die Implementierung der Forschungsergebnisse umfassten:

Parallelentwicklung: Während die wissenschaftlichen Arbeiten in den Arbeitspaketen AP200 und AP300 noch liefen, begann die gempa GmbH mit der Implementierung der benötigten Funktionalität unter Verwendung von Platzhalterdaten. Dies ermöglichte eine frühzeitige Entwicklung der technischen Lösungen, bevor die endgültigen wissenschaftlichen Daten verfügbar waren.

Abschließende Integration: Nach dem Abschluss der wissenschaftlichen Arbeiten in AP200 und AP300 wurden die realen Daten in die zukünftige TOAST-Version mit einem voraussichtlichen Releasedatum im Sommer 2024 integriert.

Installation und Einführung: Zum Projektabschluss im Februar 2024 wurde die entwickelte Lösung auf Testsystemen in den indonesischen Tsunamiwarnzentren in Jakarta und Bali installiert. Eine erste Einführung in die neue Funktionalität fand ebenfalls statt, um das Personal mit den Systemen vertraut zu machen.

Trainingsmaßnahmen: Im April 2024 sind weitere Trainingsmaßnahmen geplant. Diese sollen das Verständnis und die Handhabung der neuen Systeme und Funktionalitäten vertiefen und sicherstellen, dass das Personal die Tools effektiv nutzen kann.

Operationalisierung: Im Laufe des Jahres 2024 soll die Testinstallation in eine operative Phase übergehen. Dies bedeutet, dass die neuen Systeme und Funktionalitäten vollständig in die täglichen Abläufe der Tsunamiwarnzentren integriert werden und aktiv zur Verbesserung der Tsunamiwarnungen beitragen.

3. Wesentliche Ergebnisse

- Entwicklung von Plugins zur Integration der Multisensordaten in CAPS
 - Das LiCSAR-Plugin lädt hochauflösende InSAR-Daten, inklusive "coherence images", "wrapped phase images" und "unwrapped phase images", vom COMET-LiCS Sentinel-1 InSAR-Portal herunter.
 - Diese Daten werden im CAPS-Archiv gespeichert, wodurch historische Daten abrufbar werden.
 - Die aktuellen LiCSAR-Daten werden als Kartenlayer für SeisComP bereitgestellt, wodurch eine flexible Visualisierung entsprechend den verschiedenen Anforderungen ermöglicht wird.
- Integration und Visualisierung der Kataloge von tsunamigenen Vulkanen und Küstenbereichen mit Tsunamigefahr
 - Kartenmaterial der Risikogebiete wird als grafischer Layer in SeisComP integriert. Dies ermöglicht die Darstellung des Materials in allen grafischen Oberflächen von SeisComP.
 - Die Flexibilität in der Konfiguration und Visualisierung des Kartenmaterials ermöglicht eine angepasste Darstellung für unterschiedliche Anwendungsfälle, einschließlich der operationellen Echtzeit-Erdbebenauswertung und allgemeinen Gefahren- und Risikoeinschätzungen.
- Einbindung tsunamigener Küstenformen
 - Das von AP320 im GIS-Format bereitgestellte Kartenmaterial der tsunamigenen Küstenformen wird als grafischer Layer in die existierenden grafischen Oberflächen integriert
- Integration seismischer Methoden in InaTEWS
 - Der für die Erdrutschdetektion optimierte Picker analysiert seismische Breitbanddaten, um spezifisch tieffrequente Signale, charakteristisch für Erdrutsche, zu identifizieren. Mit einem Bandpassfilter (0,01 Hz bis 0,1 Hz) und dem STALTA-Algorithmus filtert er gezielt diese Signale heraus, unter Ausschluss von hochfrequenten Signalen, die auf starke Erdbeben hindeuten könnten. Dieses Verfahren dient der präzisen Erdrutscherkennung und verhindert Fehlalarme durch Erdbeben. Nur bei Abwesenheit von Hochfrequenzsignalen wird ein Pick gesendet, was die Zuverlässigkeit der Erdrutschwarnungen erhöht. Ursprünglich geplante Analysen für die Erdbebenklassifizierungssoftware KAPPA wurden zugunsten eines akustischen Alarms, entsprechend den Standardverfahren des BMKG, angepasst.

Diese Anpassung sichert eine sofortige und intuitive Warnung, in Einklang mit den etablierten Notfallprotokollen.



SCHLUSSBERICHT

Verbundprojekt CLIENT II –

Durch Vulkane und Hangrutschungen induzierte Tsunamis

TSUNAMI_RISK

Förderkennzeichen: 03G0906A-G

Projektleitung: apl. Prof. Dr. Thomas R. Walter

Laufzeit: 01.03.2021 – 29.02.2024

Berichtszeitraum: 01.03.2021 – 29.02.2024

Teil II: Eingehende Darstellung

GeoForschungsZentrum (GFZ)

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)

Technische Universität Braunschweig (TU-BS)

Freie Universität Berlin (FUB)

Technische Universität Berlin (TU-B)

Bundesanstalt Technisches Hilfswerk (THW)

gempa GmbH



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Teil II Eingehende Darstellung

Förderkennzeichen: 03G0906A

Zuwendungsempfänger: Deutsches GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ)

Projektleitung: apl. Prof. Dr. Thomas R. Walter

Verbundprojekt: **Client-II TSUNAMI_RISK: Durch Vulkane und Hangrutschungen induzierte Tsunamis**

Vorhaben: **Lokalisierung und Dynamik vulkanischer Hanginstabilitäten**

Laufzeit: 01.03.2021 – 29.02.2024

Berichtszeitraum: 01.03.2021 – 29.02.2024

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03G0906A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen / den Autoren.

1. Erzielte Ergebnisse und Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Ziel des durchgeführten TSUNAMI_RISK-GFZ Vorhabens war die Lokalisierung und Dynamik vulkanischer Hanginstabilitäten. Hierbei wurden insbesondere nachfolgende wissenschaftliche und technische Arbeitsziele verfolgt:

AP 100 Projektkommunikation und -vermittlung:

Das GFZ hat zunächst ein 3-köpfiges Projektmanagement-Board eingerichtet (Apl. Prof. Thomas Walter (GFZ), Prof. Jan Sopaheluwakan (Univ. Indonesia), Prof. Günter Strunz (DLR)). Das Projektmanagement-Board hat sich regelmäßig, alle 8 Wochen, ausgetauscht und in Videobesprechungen den Projektfortschritt und die Umsetzung diskutiert. Das GFZ übernahm das Monitoring der Berichtspflichten (Task 100.2), die Kommunikation der Partner in Deutschland und in Indonesien (Task 100.1), die Projektwebseiten (<https://www.tsunamirisk.de/>), und die Aussendarstellung (z.B.: [BMBF](#), [UNDRR](#), [DDE](#)) wurden weiter und größere so dass der entsprechende vorhabenbezogene Meilenstein (VBMS) 100-02 erfüllt ist.

AP 200 Geowissenschaftliche Forschung – Risikoidentifikation und Monitoring:

Das AP 200 konzentriert sich auf die Messung und das Monitoring physikalischer Prozesse bei Vulkanausbrüchen und Hangbewegungen als nicht-seismische Auslöser von Tsunamis. Das GFZ koordinierte hier die AP 210 und AP 230 und trug maßgeblich zu weiteren APs bei.

AP 210 Identifizierung von Risikogebieten:

Das GFZ koordinierte das AP 210 in enger Zusammenarbeit mit dem DLR. Das GFZ beteiligte sich an der Task 210.1 mit der Sammlung von hochauflösenden optischen und Radar-Fernerkundungs-Satellitendaten ausgewählter Vulkane in Südostasien und dem Aufbau eines Datenarchivs. Darüber hinaus wurde der Task 210.2 "Erstellung eines Katalogs potenziell tsunamigefährdeter Vulkane durch Analyse der Geomorphologie und Geometrie von Amphitheatern und weitere Verifizierung des Katalogs" erfolgreich abgeschlossen, ein Manuskript eingereicht, unabhängig begutachtet und noch während der Projektlaufzeit veröffentlicht. Das GFZ leitete die Erstellung eines Katalogs potenziell tsunamigefährdeter Vulkane durch Analyse der Geomorphologie und Geometrie von Amphitheatern (Task 210.2). Die Analyse umfasst 131 küstennahe aktive Vulkane in Indonesien und Südostasien. Dazu wurden mit Hilfe von Satellitendaten der Europäischen Weltraumorganisation ESA und des Projektpartners DLR für alle Vulkane bis zu einer Entfernung von 20 km von der Küste relevante Parameter wie Hangneigungswinkel, maximale Höhe, Küstenentfernung, Existenz von Amphitheatern oder Calderen oder Flankenvegetation systematisch erfasst und katalogisiert. Dazu wurden in enger Zusammenarbeit mit indonesischen Partnern Informationen aus Datenbanken und wissenschaftlicher Literatur zusammengetragen, um die historische Aktivität, insbesondere den Zeitpunkt der letzten Eruptionen, sowie bekannte historisch ausgelöste Tsunamis an den jeweiligen Vulkanen zu erfassen. Mit den gewonnenen Daten wurde eine multikriterielle Entscheidungsanalyse (multicriteria decision analysis MCDA) entwickelt, um auf Basis der katalogisierten Parameter eine Gefahreneinschätzung der Vulkane mittels eines Bewertungssystems (Score-System) zu erarbeiten. Anschließend wurden die Punkte für die einzelnen Parameter entsprechend ihrer Bedeutung gewichtet und zu einem abschließenden Gefährdungsscore aggregiert. Dies erlaubt eine grundsätzliche hierarchische Einteilung der Vulkane in hohes, mittleres und geringes Gefährdungspotential.

Die Bestätigung der hohen Vulnerabilität des Krakatau für die Entstehung vulkanogener Tsunamis sowohl für die aktuelle Morphometrie des Vulkans als auch für die Situation vor dem Flankenkollaps im Jahr 2018 zeigte, dass unser Ansatz Vulkane mit hohem Risiko erfolgreich identifizieren kann. Überraschenderweise haben aber auch weniger bekannte Vulkane einen ähnlich hohen Score, was eine zukünftige Priorisierung einzelner Vulkangebiete für die Frühwarnung und Überwachung des vulkanogenen Tsunamirisikos ermöglicht. Besonders hervorzuheben sind die Kleinen Sundainseln, wo insbesondere die Vulkane Batu Tara und Iliwerung einen hohen Gefährdungsscore erreichen. Ebenso konnten die Küsten der Molukkensee im Norden Indonesiens mit Vulkanen wie Gamalama, Karangetang oder Ruang sowie die südliche Bismarcksee in Papua-Neuguinea mit Vulkanen wie Kadovar, Ritter Island oder Manam als Gebiete mit hoher Gefährdung durch vulkanogene Tsunamis identifiziert werden (Abbildung 3). Die Ergebnisse werden derzeit mit indonesischen Partnern diskutiert, ein Diskussionspapier ([Zorn et al., 2022](#)) ist öffentlich zugänglich, darauf aufbauend und unter Berücksichtigung zahlreicher Kommentare von Gutachtern wurde die endgültige Publikation ([Zorn et al., 2023](#)) im Open-Access-Format realisiert,

welches bereits 2500 mal angeklickt wurde (Stand April 2024). Ergebnisse wurden ferner auf dem Physics of Volcanoes Workshop (POV-8) im März 2022 präsentiert. Eine Analyse der Laufzeiten vulkanogener Tsunamis auf Basis der identifizierten gefährdeten Vulkane wurde im Rahmen von numerischen Modellierungsarbeiten durchgeführt (siehe auch AP 300).

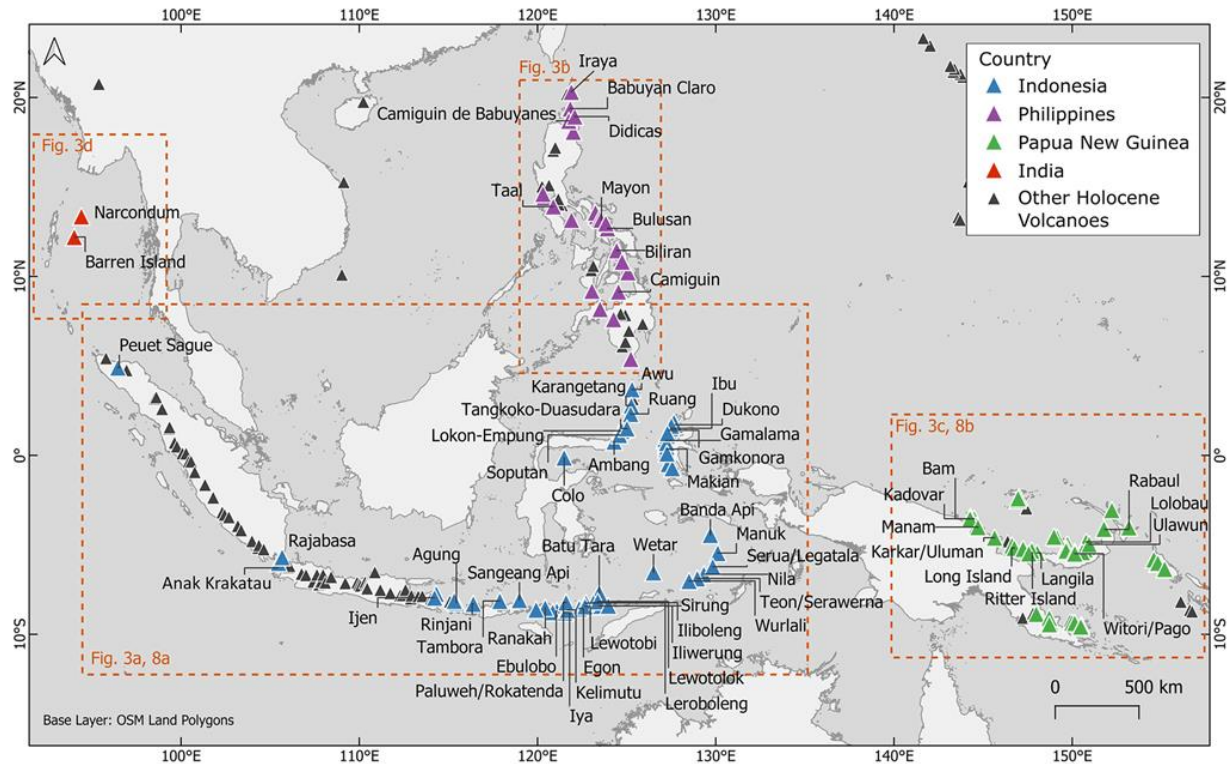


Abbildung 2: Übersichtskarte aller aktiven Vulkane in der südostasiatischen Region. Für unseren Katalog wurden alle subaerischen Vulkane in Indonesien, Indien, Papua-Neuguinea und auf den Philippinen berücksichtigt (in Farbe), die weniger als 20 km von der nächsten Küstenlinie entfernt sind. Die Farbe entspricht dem Land, in dem sich ein Vulkan befindet. Insgesamt gibt es 214 aktive Vulkane in den vier Ländern, von denen 131 in unserem Katalog berücksichtigt sind. Ergebnisse aus GFZ Federführung zugänglich unter <https://nheiss.copernicus.org/articles/22/3083/2022/>

AP 220 Fernerkundungsbasiertes Vulkanmonitoring:

In AP 220 werden Verfahren für eine multiskalige und multisensorale Erdbeobachtung zur Analyse von Vulkanaktivität und Eruptionsprozessen an indonesischen Vulkanen entwickelt, die ein hohes Risiko für die Auslösung von Tsunamis darstellen. Das GFZ beteiligt sich an der Datenakquisition (DLR federführend), u.a. durch die Beteiligung an wichtigen Datenangeboten, die freien oder kostengünstigen Zugang zu Satellitendatenprodukten ermöglichen. Das GFZ beteiligt sich an der Interpretation von Veränderungen an Vulkanoberflächen (Task 220.2) und hat detaillierte InSAR Deformationskarten am Beispiel von Anak Krakatau auf der Basis von Zeitreihen des Satelliten TerraSAR-X erstellt (Task 220.3). Hier war das GFZ dem Zeitplan etwas voraus und konnte noch detailliertere Analysen durchführen, validierte Ergebnisse zum InSAR Deformations-Monitoring wurden durchgeführt und in einem Manuskript zusammengefasst. Dabei wurden Veränderungen an der Vulkanoberfläche lange vor dem Kollaps von Vulkanen detektiert (Task 220.2) und das InSAR Deformations-Monitoring mit SAR-

Interferometrie-basiertem Langzeit-Deformations-Monitoring am Beispiel von Anak Krakatau erfolgreich umgesetzt (Task 220.3).

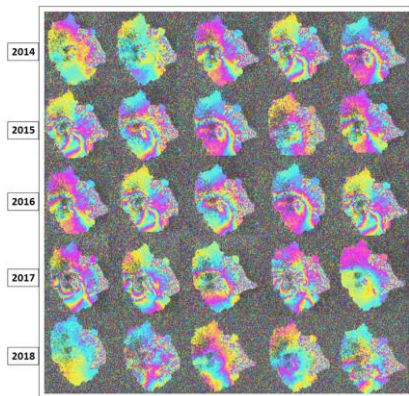


Abbildung 3: InSAR Datensätze wurden in Task 220.3 aus allen verfügbaren SAR-Rohdaten generiert und verfügbar gemacht. Siehe <https://doi.org/10.5880/GFZ.2.1.2022.003>.

Sämtliche InSAR Daten wurden in einem online repository zusammengefasst unter [Zorn et al., \(2023\)](#), wobei 171 ascending InSAR und 182 descending InSAR Datensätze berechnet wurden (Abb. 3). Hieraus wurden in einem nächsten Schritt die vertikale und horizontale Bewegung berechnet (Zorn et al., 2023). Diese Bewegungsdaten zeigen nicht nur die Mobilität der Flanke von Anak Krakatau, sondern auch kurzzeitige Perioden der Beschleunigung, die vermutlich durch Intrusionen (Dikes) hervorgerufen wurden.

Eine Masterarbeit zu dem Thema „Pre-collapse deformation analysis of Anak Krakatau, Indonesia“ wurde von Frau Leonie Röhler (Fachrichtung Geophysik) ausgearbeitet und erfolgreich verteidigt, unter Betreuung von Profs. Korn (Uni Leipzig) und Walter (Uni Potsdam).

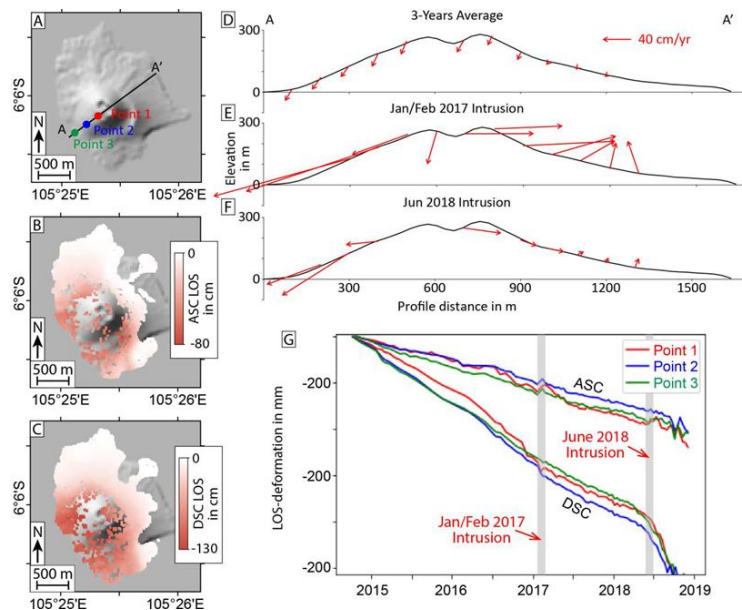


Abbildung 4: Radarinterferometrische Deformationskarte von Anak Krakatau. InSAR-Deformationskarten mit Profilen und ausgewählten Punkten, markiert in (A). In den Teilbildern (B) und (C) sind für verschiedene Orbits die kompletten Flankenbewegungen in Sichtweite dargestellt und in horizontale und vertikale Bewegungskomponenten umgerechnet. (D) Die mittleren Bewegungsrichtungen und -raten als Vektoren auf der Oberfläche des Anak Krakatau, (E) die Intrusion im Januar/Februar 2017 und (F) die Intrusion im Juni 2018. Wir sehen also eine langfristige Flankenbewegung mehrere Jahre VOR dem Kollaps 2018, sowie eine Beschleunigung der Bewegung während der kurzen Intrusionen. Ergebnisse aus Masterarbeit Frau Röhler und veröffentlicht unter GFZ-Federführung unter <https://doi.org/10.1130/G50693.1>.

Bis zum Ende des Projektes wurden weiterhin hochauflösende Satellitendaten genutzt um geomorphologische Veränderungen der Vulkanoberfläche (AP220) zu untersuchen. Mit Hilfe von zeitlich hochaufgelösten optischen Satellitendaten von Planet Labs und Drohnendaten, die von indonesischen Kollegen zur Verfügung gestellt wurden, konnten die Phasen der vulkanischen Entwicklung vor und nach der katastrophalen Eruption von 2018 erfolgreich analysiert und für den Zeitraum 2016-2023 katalogisiert werden (Müller et al., 2024, in Vorbereitung).

AP 230 Seismisches Monitoring:

Das GFZ koordiniert das Arbeitspaket 230 und arbeitet dabei eng mit dem BMKG in Indonesien zusammen. Das BMKG betreibt das Tsunami-Frühwarnzentrum für Indonesien und ist ein relevanter Endnutzer. In diesem Arbeitspaket werden Konzepte und Arbeitsabläufe entwickelt, wie seismische Signale genutzt werden können, um vulkanische Kollapsereignisse oder andere große Erdrutsche zu erkennen und als mögliche Tsunami-Auslöser zu identifizieren.

Es wurden verschiedene Codes für die Berechnung einzelner Kraftquellen getestet und schließlich verwendet, um synthetische Seismogramme für die Kollapsereignisse des Anak Krakatau zu erzeugen (Task 230.1). Hier wurde der Erdrutsch durch ein einfaches physikalisches Modell dargestellt, bei dem er durch ein Paar entgegengesetzt gerichteter, zeitlich getrennter Einzelkräfte repräsentiert wird, wobei die Kraftrichtung entlang des Rutschvektors verläuft. Seismisch gesehen haben Erdrutsche im Vergleich zu tektonischen Erdbeben einen Mangel an hochfrequenter Strahlung, so dass sie nach Berücksichtigung der Erdbebenstärke anhand des Verhältnisses von lang- und kurzperiodischer Energie identifiziert wurden (Task 230.2). Tests mit einigen gut dokumentierten, Tsunami-auslösenden Erdrutschen (Anak Krakatau 2018 und Taan Fjord in Alaska 2015) im Vergleich zu Aufzeichnungen tektonischer Ereignisse in Indonesien zeigten, dass eine einfache Analyse des Spektralgehalts zwischen Erdbeben und Erdrutschen unterscheiden kann, wenn auch nicht perfekt (Abb. 5).

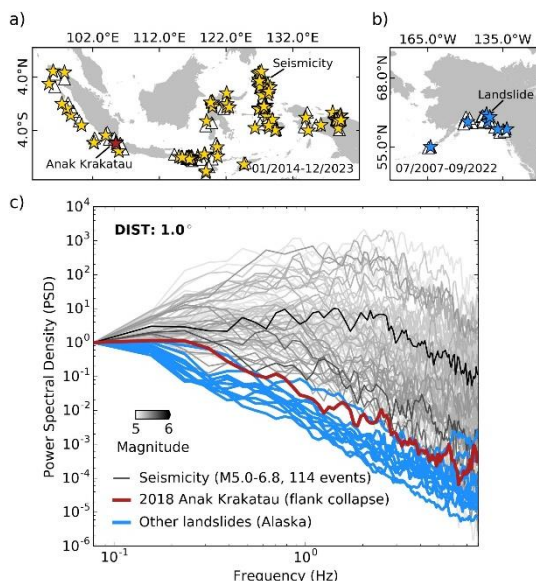


Abbildung 5. Kurven der mittleren Geschwindigkeitsspektraldichte (PSD) für Aufnahmen in Stationsentfernung von weniger als 1° für eine große Anzahl tektonischer Erdbeben in Indonesien, dem Anak Krakatau Erdrutsch, und zum Vergleich Erdrutsche in Alaska, normiert durch die langperiodische Amplitude. Erdbeben und Erdrutschereignisse sind im Durchschnitt gut voneinander getrennt, obwohl einige ungewöhnlich langsame Erdbeben ähnliche Spektren aufweisen. Dieses Kriterium allein würde nicht ausreichen, um zwischen Erdbeben mittlerer Größe und potenziell tsunamigen Erdrutschen vollständig zu unterscheiden, kann aber dazu dienen, eine sehr kleine Anzahl von Ereignissen für weitere Untersuchungen auszuwählen.

Der Standort kann ein weiteres Unterscheidungsmerkmal sein, da die Gebiete mit hohem Risiko aus WP210 bekannt sind. Die Lokalisierung von Ereignissen mit einem Mangel an kurzperiodischer Energie kann eine Herausforderung darstellen. Wir haben einen Rückprojektionsalgorithmus implementiert, der die Hüllkurven von Oberflächenwellen im Periodenbereich von 40-70 s rückprojiziert.

Mit Hilfe des indonesischen seismischen Netzes konnten wir den Flankenkollaps des Vulkans Anak-Krakatau nachweisen und lokalisieren. Mithilfe der Methode der Rückprojektion konnten wir den Ort etwa 100 Sekunden nach dem Ausbruch des Ereignisses schätzen, wobei die Stationen bis zu 1° von der Quelle entfernt waren (Abb. 6).

Um unseren Ansatz an kontinuierlichen Tagen zu evaluieren, haben wir von unseren indonesischen Partnern zwei Wochen lang kontinuierliche Daten einer Teilmenge des indonesischen seismischen Netzes erhalten. Die regionale Ausdehnung des Datensatzes umfasst hochgefährdete Vulkan-Tsunami-Gebiete in Ostindonesien, wie Batu Tara, Iliwerung, Gamalama und Sangeang Api, zeigt aber auch starke konventionelle seismische Aktivität. Wir haben diesen Datensatz verwendet, um die durch die Einzelereignisanalyse vorgeschlagenen Algorithmen im Hinblick auf das Aufkommen von Fehlalarmen zu testen (Task 230.3).

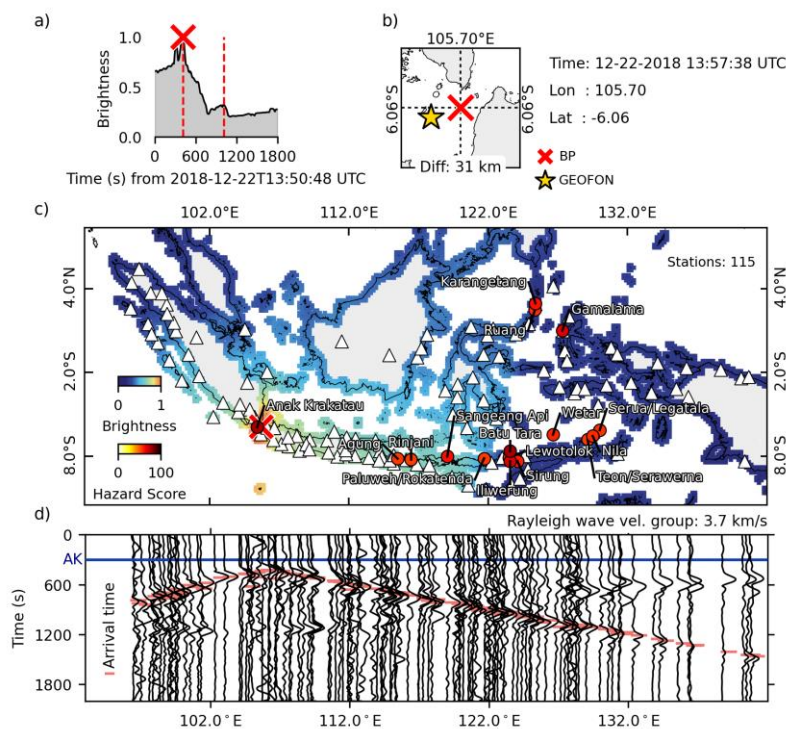


Abbildung 6. Die Position des Anak-Krakatau Erdrutsches aus der langperiodischen Rückprojektion (40-70 s). Linke Seite: a) Helligkeitsfunktion: Der Peak in der Quellzeitfunktion markiert den Anak-Krakatau Erdrutsch (>100 Sekunden). b) Position des Erdrutsches (rotes Kreuz) im Vergleich zur GFZ-Position (gelber Stern). d) Position des Erdrutsches entlang der Küste Indonesiens. Der farbige Hintergrund zeigt die Helligkeitsverteilung und die Maxima, an denen sich der Erdrutsch von Anak-Krakatau ereignete. Die weißen Dreiecke zeigen die seismische Station. e) Langperiodische Wellenform-Hüllkurven. Die rote Markierung zeigt die Oberflächenwellenankünfte von dem durch die Rückprojektion ermittelten Ort. Die blaue horizontale Linie zeigt die Quellzeit des Anak Krakatau Kollapses. Rechte Seite: Zeitliche Entwicklung der Lokalisierung mit Hilfe der Oberflächenwellen-Rückprojektion. Nach 1,5-2 min stabilisiert sich die Lösung und eine wahrscheinliche Zuordnung wäre möglich.

AP 310: Modellierung und Analyse der Vulkanflankeninstabilität

Das GFZ koordiniert das Arbeitspaket 310, das planmäßig im zweiten Projektjahr begonnen hat. Ein wichtiges Ziel war insbesondere die Analyse der Deformationsdaten. Dabei wurden InSAR-Daten in Bewegungskomponenten zerlegt (Abb. 7, AP 310.1) und durch Modellierung Dislokationsflächen und nicht-uniforme Bewegungsmuster untersucht und deren zeitliche und räumliche Veränderung bestimmt werden (AP 310.2), wie in Abb. 8 skizziert.

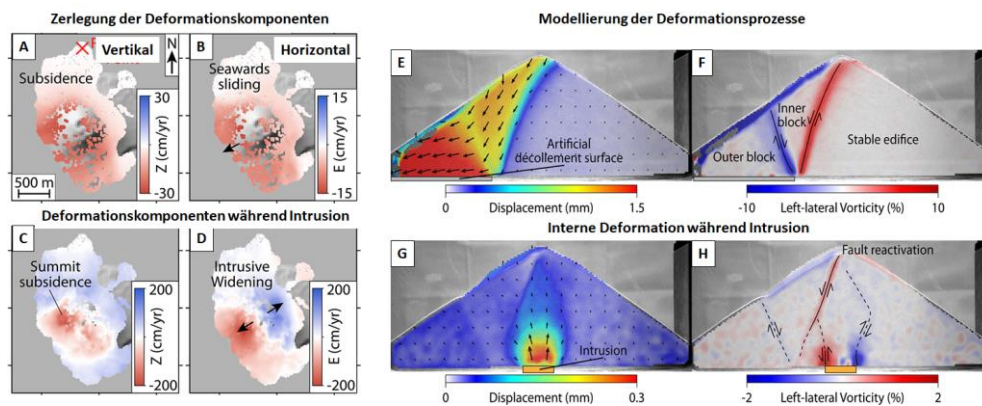


Abbildung 7: Von der Zerlegung der Deformationskomponenten zum Modell. Zerlegte interferometrische Radarkarten mit synthetischer Apertur (InSAR), die die Bodenverformung in vertikalen (A) und horizontalen (B) Komponenten zeigen. Ein 3-Jahres-Durchschnitt der Flankenbewegung aufgrund von Décollement-Rutschen ist gezeigt. (C,D) Kurzzeitige Beschleunigungen ereigneten sich vom Flankenkollaps, wie hier im Januar/Februar 2017 gezeigt. Die Modellierung erfolgte in zweistufigen Analogmodellen, mit (E, F) Profilansichten für Décollement-Gleiten (Stufe 1), sowie (G, H) Profilansichten für eine Intrusion (Stufe 2). Décollement-Gleiten führte zu Verwerfungen, die mit der vorgeschlagenen langfristigen Bewegung des Anak Krakatau übereinstimmen. Durch die anschließende Intrusion wurden manche der Verwerfungen reaktiviert, was eine mögliche Erklärung für das verstärkte Gleiten an den Flanken während der Intrusion darstellt. Aus [Zorn et al., \(2023\)](#).

Zusätzlich wurden Entfernungsdigramme von Tsunamis simuliert (Abb. 8), die von einem hochgefährlichen Vulkan nach 60 Minuten in (a) Indonesien und (b) Papua-Neuguinea ausgingen. Die zusätzliche Heatmap zeigt die wahrscheinlichsten Ursprungsorte auf der Basis einer gewichteten Punktdichteberechnung unter Verwendung unseres Gefährdungswertes. Eine höhere Dichte bedeutet, dass das Gebiet näher an vielen Tsunamivulkanen liegt.

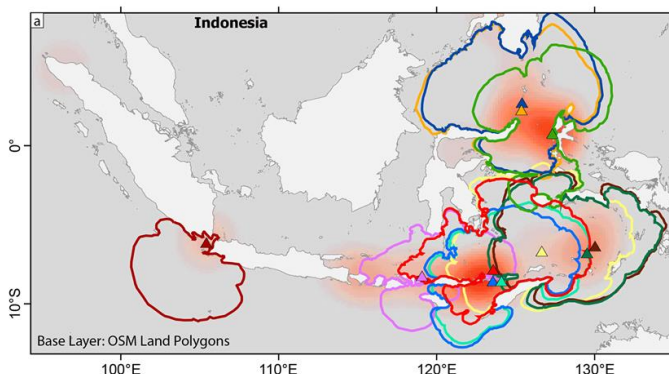


Abbildung 8. Die Abbildung zeigt, dass insbesondere die Kleinen Sundainseln und die nördliche Molukkasee in Indonesien sowie der südliche Bismarckbogen in Papua-Neuguinea wahrscheinliche Hotspots für zukünftige vulkanogene Tsunamis sind und dass Ereignisse an den durch unser Ranking identifizierten Hochrisikovolkanen in kurzer Zeit große Teile der Küstenlinie betreffen können. Veröffentlicht unter Federführung des GFZ auf <https://nheiss.copernicus.org/articles/22/3083/2022/>.

AP 400: Sozialwissenschaftliche Forschung

Das GFZ ist in AP 400 in Unter-Arbeitspaket 430 Task 1 durch einen Unterauftrag (Dr. H. Spahn) involviert.

AP 430: Katastrophenvorsorge auf lokaler Ebene

Das Arbeitspaket 430 „Katastrophenvorsorge auf lokaler Ebene“ zielte auf die Identifizierung möglicher Strategien und Ansätze zur Vorbereitung, Frühwarnung und Vorbeugung von nicht-seismisch induzierten Tsunami-Bedrohungen mit Fokus auf der lokalen Ebene. Die Erfahrungen aus den Tsunami-Ereignissen von 2018 haben gezeigt, dass die Gemeinden weitgehend unvorbereitet in die Katastrophe gegangen sind und dass es auf nationaler und internationaler Ebene noch keine Strategien zur Stärkung der Gemeinden im Umgang mit nicht-seismisch induzierten Tsunamis gibt.

Im Wesentlichen konnten die im Antrag skizzierten Arbeitsschritte planmäßig umgesetzt und die anvisierten Ziele erreicht werden. Die Umsetzung erfolgte in enger Zusammenarbeit mit indonesischen Partnern und berücksichtigte die im Laufe des Vorhabens erreichten Ergebnisse aus den technischen Arbeitspaketen 200 und 300. Zudem wurde der Arbeitsprozess kontinuierlich mit den anderen Akteuren im Arbeitspaket 400 koordiniert.

In einem ersten Schritt wurden zwei Grundlagenstudien zur Beschreibung der spezifischen Rahmenbedingungen und vorhandenen Erfahrungen auf lokaler Ebene durchgeführt um ein besseres Verständnis für Handlungsoptionen zur Vorbereitung, Frühwarnung und Vorbeugung von nicht-seismisch induzierten Tsunami-Bedrohungen zu erzielen.

Da bisher keine umfassenden und landesweiten Gefahren- und Risikoanalysen für erdbeben- und vulkanisch induzierte Tsunamis vorliegen und es daher für gefährdete Gemeinden derzeit kaum möglich ist, ihre tatsächliche Gefährdung durch diese Gefahren zu ermitteln, wurde eine Studie zur Charakterisierung der Tsunami-Bedrohung auf lokaler Ebene unter der übergeordneten Fragestellung "Worauf müssen sich die Gemeinden vorbereiten" durchgeführt. Die Studie gibt einen Überblick über die verschiedenen Arten der Tsunami-Bedrohung, ihrer wichtigsten Merkmale und der Wechselwirkung mit vorhergehenden oder nachfolgenden Gefahren im Rahmen eines kaskadenartigen Prozesses. Damit konnte ein besseres Verständnis für die Hauptmerkmale der Tsunami-Bedrohung erreicht werden, mit der die Gemeinden konfrontiert sind.

Die Studie machte deutlich, dass es große Unsicherheiten bezüglich des Auftretens von hangrutsch- und vulkanisch ausgelösten Tsunamis gibt, da beide Phänomene höchst variable und komplexe Entstehungsmechanismen aufweisen, die sich auf lokaler Ebene sehr unterschiedlich auswirken können. Dennoch konnte aus der Analyse vergangener Ereignisse einige relevante Merkmale abgeleitet werden, um die Gefährdung von Gemeinden zu charakterisieren. Darüber hinaus wurde deutlich, dass die Mehrzahl der vergangenen Ereignisse im Nah-Feld passierte und somit sehr kurze Warn- und Reaktionszeiten implizieren.

Zudem konnte eine klare geographische Differenzierung der unterschiedlichen Tsunamibedrohungen aufgezeigt werden. Der westliche Teil Indonesiens, mit Ausnahme der Sundastraße, ist hauptsächlich durch erdbeben- und erdbebenbedingte Tsunamis, die entlang des Sunda-Trench entstehen, bedroht. Weiter entfernt gelegene Ursprungsgebiete wie die Makran-Subduktionszone und die vulkanischen

Heard-Insel im südlichen Indischen Ozean, können als geringfügige Bedrohung für indonesische Küsten angesehen werden. Der östliche Teil ist mit einer vielfältigeren Bedrohungslage konfrontiert, zu der insbesondere auch vulkanisch ausgelöste Tsunamis sowie Bedrohungen durch große Erdbeben und Vulkanereignisse aus der Pazifikregion gehören.

Aus dieser räumlichen Verteilung lassen sich zudem drei grundsätzliche Arten von Tsunami-Bedrohungsszenarien für Gemeinden ableiten (siehe Tabelle 1). Überlagert man die räumliche Verteilung der Bedrohung mit den politischen Verwaltungseinheiten, die letztlich für die Entwicklung und Umsetzung von Strategien für das Katastrophenrisikomanagement zuständig sind, lassen sich die möglichen Bedrohungsszenarien für jede Provinz in Indonesien ermitteln, die dann die Grundlage für die Entwicklung und Umsetzung angepasster Strategien bilden könnten. Diejenigen Provinzen, die die gleichen Bedrohungsszenarien aufweisen, könnten dann miteinander verbunden und gestärkt werden, indem sie gemeinsam regionale und dezentrale Ansätze für Tsunami-Vorsorgestrategien entwickeln und ihre Erfahrungen austauschen.

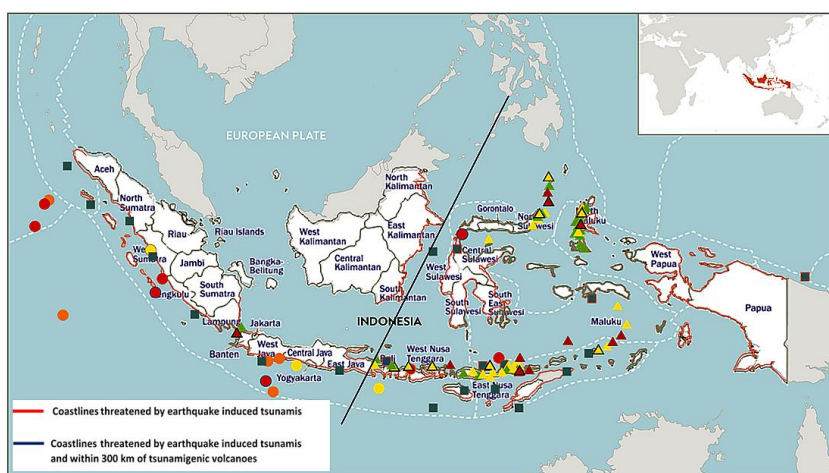


Abb. 9: Karte der verschiedenen Tsunami-Quellen (Erdbeben, Erdrutsche, Vulkane) und der betroffenen Küstenlinie. Gezeigt sind auch die Grenzen der indonesischen Provinzen. Die dunkelblaue Linie markiert die Grenze der räumlichen Gefährdungscharakterisierung.

Scenario	EQ Near-field	EQ Far-field	Land- slide	Volcanic < 300 km	Volcanic > 300 km	Provinces
1					Minor threat	Aceh, North Sumatra, West Sumatra, Bengkulu, West-Java, Central Java, Yogyakarta,
2		Minor threat			Minor threat	Lampung, Banten, East-Java, Bali, West Nusa Tenggara, East Nusa Tenggara, West Papua, Maluku, North Maluku, North Sulawesi, Gorontalo, Central Sulawesi, South East Sulawesi, South Sulawesi
3		Minor threat			Minor threat	Papua, West Sulawesi, North Kalimantan, East Kalimantan, South Kalimantan

Tab. 1: Merkmale der skizzierten Tsunami-Bedrohungsszenarien für die Gemeinden und die betroffenen Provinzen (eigene Zusammenstellung)

Die Studie enthält zudem bereits erste Überlegungen über möglichen Strategien zum Monitoring nicht-seismisch induzierter Tsunamis. Die Studie wurde einem internen und externen Review unterzogen und anschließend publiziert.

Eine zweite Studie diene zur Bestandsaufnahme gegenwärtiger Kapazitäten und Strategien auf lokaler Ebene. Dazu wurden im Rahmen einer Meta-Studie Fallstudien und Referenzdokument zu 18 Tsunami-relevanten Ereignissen in den Jahren 2006 bis 2021 ausgewertet und zusammengefasst. Die ausgewählten Fälle bilden ein breites Spektrum der relevanten Vorkommnisse im Zeitraum 2006 bis 2021 ab. Dieses Spektrum umfasst Ereignisse, bei denen stark spürbare Erdbeben auftraten, die aber nicht zu einer Warnung führten, bis hin zu Far-Field Tsunamis und den beiden nicht-seismisch induzierten Ereignissen in 2018. Dabei standen Aspekte wie das Risikoverständnis und -bewusstsein, die Umsetzung der Tsunami-Frühwarnung und diesbezügliche Herausforderungen auf lokaler Ebene, sowie das Verhalten der Bevölkerung im Krisenfall im Mittelpunkt.

Die Einzel-Analysen der 18 ausgewählten Ereignisse und die Erkenntnisse daraus wurden in sogenannten „Summary Documents“ zusammengefasst. Im nächsten Schritt wurde eine vergleichende Analyse zu 18 relevanten Aspekten mit Bezug zum Downstream-Bereich vorgenommen und über eine Farbcodierung dargestellt (Tab. 3) und Schlussfolgerungen gezogen.

	Date of the Event & Location of the Case		Type of Event	Warning Service	Warning Level	Natural Warning	Tsunami Impact	Earthquake Impact
1	2006-07-17	Pangandaran	Slow EQ	Warning Service Level 1 Earthquake Info and Tsunami Potential	No Warning		High	
2	2007-09-12	Sumatra/Padang	EQ		Potential Tsunami		Medium	High
3	2009-09-02	Java/Bantul	EQ		Potential Tsunami			High
4	2009-09-30	Padang	EQ		No Warning			Very high
5	2010-10-25	Mentawai	Slow EQ		Potential Tsunami		High	
6	2011-03-11	Japan tsunami	Far Field		Potential Tsunami		Low	
7	2011-04-04	Southern Java	EQ		Potential Tsunami			
8	2011-10-13	Bali	EQ		No Warning			Medium
9	2012-01-11	Aceh	Outer Rise	Warning Service Level 2 Sequence of 4 warnings with 3 levels				
10	2012-04-11	Aceh	Outer Rise				Low	Low
11	2014-01-25	Java	EQ		No Warning			
12	2014-04-02	Chile Tsunami	Far Field					
13	2016-03-02	Mentawai/Sumatra	Outer Rise					
14	2017-12-15	West-Java	EQ					Medium
15	2018-08-05	Lombok	EQ				Low	Very high
16	2018-09-28	Palu/Sulawesi	Landslide				High	Very high
17	2018-12-22	Krakatau/Sunda Strait	Volcanic		No Warning		High	
18	2021-06-16	Seram	Landslide		No Warning		Low	Low

Tab. 2: Charakteristiken und Auswirkungen der untersuchten Ereignisse

Aspects to be evaluated			BMKG Warning Service																	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Date of the Event & Location of the Case			Hazard / Risk Map	Accuracy of Warning	BMKG to LDMO	Role of Broadcast Media	Warning Reception LDMO	Decision making LDMO	Action taken by LDMO	Role of other actors	Response to natural warning	Community Warning Reception	Understanding warnings	Community reaction on warning	Level of panic and confusion	Local Wisdom	Knowledge and Awareness	Evacuation Plan	Evacuation Process	Participation in exercises
1	2006-07-17	Pangandaran	No national warning service available																	
2	2007-09-12	Sumatra/Padang																		
3	2009-09-02	Java/Bantul																		
4	2009-09-30	Padang																		
5	2010-10-25	Mentawai																		
6	2011-03-11	Japan tsunami																		
7	2011-04-04	Southern Java																		
8	2011-10-13	Bali																		
9	2012-01-11	Aceh																		
10	2012-04-11	Aceh																		
11	2014-01-25	Java																		
12	2014-04-02	Chile Tsunami																		
13	2016-03-02	Mentawai/Sumatra																		
14	2017-12-15	West-Java																		
15	2018-08-05	Lombok																		
16	2018-09-28	Palu/Sulawesi																		
17	2018-12-22	Krakatau																		
18	2021-06-16	Seram																		

Tab. 3: Ergebnisse aus der vergleichenden Analyse / Visualisiert anhand einer Farbcodierung von grün (gut), gelb (sichtbare Probleme), orange (schwerwiegende Probleme) bis rot (Versagen, Komplettausfall) zu 18 Evaluierungsaspekten

Die Meta-Studie wurde in enger Kooperation mit indonesischen Partnern erstellt. Die Koordination dafür lag beim GFZ (AP 430) und BRIN. Weiterhin eingebunden war IDOS als assoziierter Partner des TsunamiRisk Vorhabens. Für das GFZ war zudem zeitweise eine lokale Gutachterin involviert. Die Ergebnisse aus der Meta-Studie wurden in einem Arbeitsdokument zusammengefasst (VBMS 430-01 Teil 2). Eine spätere Publikation der Studie hat BRIN in Aussicht gestellt.

Durch die Meta-Studie wurde die Bedeutung des Erfahrungslernens und einer schnellen und systematischen Evaluierung von bestehenden Kapazitäten und der Performance lokaler Gemeinden nach Tsunami-Ereignissen deutlich. Dazu wurde im Rahmen des Projekts ein Assessment-Tool konzipiert, das im Nachgang noch weiter ausgearbeitet, getestet und validiert werden soll.

Aus den Erfahrungen der beiden Grundlagenstudien wurden in enger Zusammenarbeit mit den indonesischen Partnern eine Reihe von Handlungs- und Politikempfehlungen für die Verbesserung der Vorbereitung und Frühwarnung auf lokaler Ebene abgeleitet. Diese wurden in einem Arbeitsdokument (VBMS 430-03) ausführlich abgeleitet und dokumentiert. Zudem wurde in enger Zusammenarbeit mit den indonesischen Partnern ein Zusatzdokument zum Policy Brief erarbeitet, das 11 Schlüsselempfehlungen zu generellen Ansätzen, Handlungsmöglichkeiten auf der lokalen Ebene sowie Maßnahmen zur Verbesserung der Frühwarnung umfasst.

Nach der Sturzflut-Katastrophe im Ahrtal im Jahr 2021 wurden Erfahrungen aus der langjährigen Zusammenarbeit mit Indonesien beim Aufbau und Betrieb des Tsunami-Frühwarnsystems in die deutsche Fachdiskussion eingebracht. Mit einem Beitrag zu institutionellen Aspekten des operationellen

Katastrophenrisikomanagements in Indonesien und Deutschland am Beispiel von Frühwarnung für schnell einsetzende Naturgefahren (Sturzfluten / Tsunamis) auf dem BBK-Fachkongress „Forschung für den Bevölkerungsschutz“ in Bonn im Januar 2023 sowie einem Gastartikel für das DKKV wurde aufgezeigt, was Deutschland aus den Erfahrungen in Indonesien lernen kann.

Zur Unterstützung des Arbeitspakets 430 gab es Engagements von Partnerinstituten und Einzelpersonen in Indonesien, zum Beispiel die Beteiligung von 6 Forschungsassistenten von Partnerorganisationen in Partnerorganisationen in Indonesien, und eine Doktorandin von IDOS/BRIN, insbesondere in Forschungsaktivitäten im Zusammenhang mit ihrem Dissertationsthema. Die Aufgaben der Forschungsassistenten waren die Durchführung von Metastudien und Analysen von Erdbeben und Tsunami-Ereignissen (19 Fälle seit 2006), die sich auf die Bewertung und Evaluierung des Tsunami-Warnsystems und der Reaktionen auf lokalen Ebene in den letzten 15 Jahren in Indonesien. Die Forschungsarbeiten werden koordiniert von Dr. Semeidi Husrin von BRIN, als Partner für das WP 430. Die Finanzierung für diese besondere Unterstützung, sind unter anderem 5 Forschungsassistenzen (je 3 Monate in den Jahren 2021, 2022 und 2024), Reisen und Feldarbeit in Banten (3 Forscher), sowie eine Feldreise in Banten und die Teilnahme am WP 400 Workshop im November 2022 (Pos 850).

AP 510 Politikempfehlungen zur Steigerung der gesellschaftlichen Resilienz:

Die beiden Tsunamis, die sich Ende 2018 in Sulawesi und Anak Krakatau (Indonesien) ereigneten, haben eindrucksvoll gezeigt, wie anfällig Gemeinden für Tsunamis sind, die durch Erdrutsche und vulkanische Mechanismen ausgelöst werden. Beide Tsunamis waren das Ergebnis einer Kette (Kaskade) von Ereignissen und in beiden Fällen trafen die daraus resultierenden Tsunamis die lokale Bevölkerung weitgehend unvorbereitet und verursachten eine hohe Zahl von Todesopfern. Dies wurde auf das begrenzte Wissen über die Entstehung von Tsunamis durch andere Mechanismen als Erdbeben zurückgeführt und bei den zuständigen Behörden die Frage nach geeigneten Strategien für eine verbesserte Vorsorge, Frühwarnung und Schadensbegrenzung bei solchen Ereignissen aufgeworfen. Die Perspektive lokaler Gemeinschaften muss dabei besonders berücksichtigt werden, da sie es sind, die einerseits mit den direkten Auswirkungen solcher Ereignisse konfrontiert sind und andererseits eine bessere Vorbereitung und langfristige Schadensbegrenzung vor Ort umsetzen müssen. Basis dafür ist ein besseres Verständnis der Tsunami-Gefahren, denen die Gemeinden ausgesetzt sind. Dazu wurde basierend auf der Publikation Zorn et al. (2022) gemeinsam mit dem AP 430 ein Papier erstellt: "Tsunami preparedness in Indonesia at the local level with special consideration of landslide and volcanic induced events; Characterization of the Threat, What do communities in risk areas need to be prepared for?" (Spahn & Lauterjung, 2023). Dieses Papier bildete die Grundlage für eine später von allen deutschen und indonesischen Projektpartnern erarbeitete Politikempfehlung des Projekts „Joint Research between Indonesia and Germany on Volcanic and Landslide induced Tsunamis: Recommendations for the Way Ahead“. Diese Politikempfehlung wird in Kürze an verschiedene indonesische Behörden übergeben und soll auch international veröffentlicht werden.

AP 530 Ausbildung und wissenschaftlicher Austausch

Das GFZ sammelte Informationen über das Projekt und koordinierte Gruppenbeiträge für den wissenschaftlichen Austausch. Koordinierte Treffen und Workshops wurden während der Pandemie zumeist online, und ab 2022 auch in Präsenz abgehalten. Online Treffen waren zahlreicher als Präsenztreffen, letztere auch aufgrund der umfangreichen Vorbereitungsarbeiten. Übergeordnete

Projekttreffen und Veranstaltungen wurden koordiniert und wissenschaftliche Beiträge von allen GFZ-Beteiligten eingebracht (AP100 und AP530):

- 08.03.2021: Online Kickoff Meeting mit den deutschen Partnern
- 11.03.2021: Online Kickoff Meeting mit indonesischen und deutschen Partnern
- 13.04.2021: Online Meeting mit indonesischen und deutschen Partnern zur Planung Koordinierung der Arbeiten
- 11.06.2021: Online Meeting mit deutschen Partnern, Übersicht und Fortschrittspräsentationen
- 16.06.2021: Online Meeting mit indonesischen und deutschen Partnern, Beiträge der Indonesischen Partnerinstitute
- 30.09.2021: Online Meeting mit deutschen Partnern, Vorbereitung für Workshop im November
- 12.11.2021: Online Workshop mit indonesischen&deutschen Partnern, Präsentationen aller WPs
- 09.12.2021: TSUNAMI_RISK Meeting mit UNESCO ICG IOTWS und Vorstellung
- 29.-30.3.2022 Hybrider Workshop deutscher Partnern am GFZ Potsdam, alle WPs
- 31.03.2022: Online Jahresmeeting mit indonesischen und deutschen Partnern
- 20.06.2022: Präsenz Workshop und Laborbegehung mit deutschen Partnern in Hannover
- 14.-22.11.2022: TSUNAMI_RISK Indonesienreise: Mehrere Workshops und Projekt Meetings mit indonesischen Partnern in Jakarta, Indonesien
- 16.-17.3.2023: Projekttreffen und Workshop aller deutschen Partner am DLR Oberpfaffenhofen.
- 08.11.2023: Online/Webinar gemeinsam mit Indonesischen Partnern, und Vorbereitung Policy Letter
- 18.-20.2.2024: Abschluss Workshop am GFZ in Potsdam, alle deutschen Partner sowie Delegation aus Indonesien.

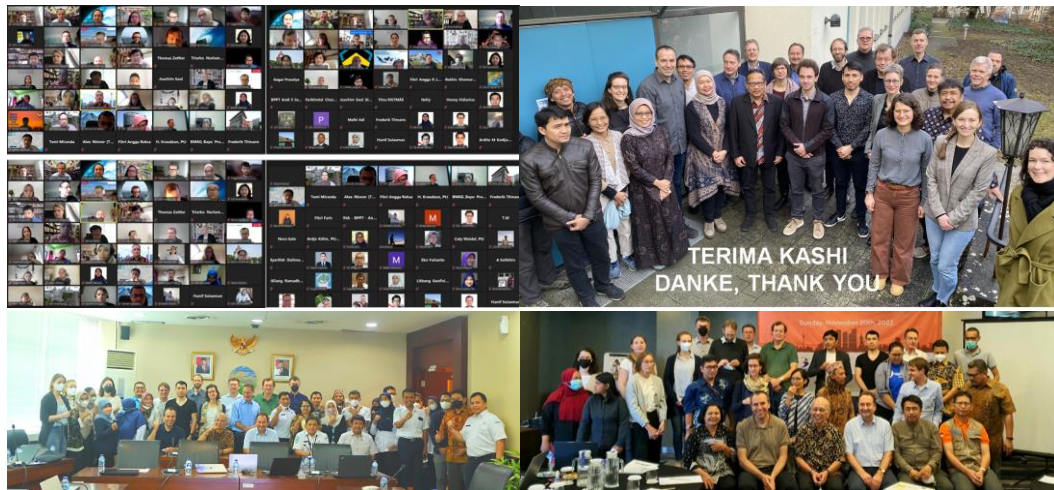


Abbildung 1: Links oben: Pandemiebedingt fanden zahlreiche Projekttreffen nur online statt, dies oftmals mit mehr als 100 Teilnehmerb. In Präsenztreffen erlaubten deutlich tiefere und längere Diskussionen (Links unten: Projekttreffen der deutschen Tsunami_Risk Delegation in Jakarta bei BMKG, Amt für Meteorologie, Klimatologie und Geophysik. Rechts unten: Projekttreffen in Jakarta bei BRIN, Nationale Agentur für Forschung und Innovation. November 2022., Rechts oben: Abschlusstreffen am GFZ Potsdam 02/2024).

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Rahmen der Durchführung des Projektes sind Ausgaben in Form von Personalkosten, Reisekosten und sonstigen unmittelbaren Vorhabenkosten entstanden, über die im Detail im zahlenmäßigen Nachweis berichtet wurden.

Personalkosten (Kontennummer 0837; 351.456,05 Euro): Diese Kosten umfassen die Gehälter und Sozialabgaben für das Projektteam, das an der Durchführung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten beteiligt war. Dies war vor allem Edgar Zorn, der von Projektstart bis Februar 2021 als Doktorand, und ab März 2021 als Postdoc in Tsunami_Risk angestellt wurde und zu den AP 200 und AP 300 arbeitete. Fortgeführt wurde das Projekt dann durch Daniel Müller, der ab 1.12.2022 als Doktorand angestellt wurde. Ferner wurde Felipe Vera als Doktorand der Seismologie angestellt. Projektschwerpunkt des GFZ Vorhabens war die Forschung zu der geowissenschaftlichen Forschung, und hier zu Risikoidentifikation und Monitoring (AP200 – 22 PM) sowie zu Modellierung und Analyse (AP300 – 15 PM), während alle anderen Aufgaben in-kind bereitgestellt wurden.

Reisekosten (Kontennummer 0838; 11.208,51 Euro): Diese Position beinhaltet alle Ausgaben für Dienstreisen, die im Zusammenhang mit dem Projekt standen, einschließlich des Workshops in Indonesien.

Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten (Pos. 0850; 76.265,97 Euro):

Für die Umsetzung und Steuerung des Arbeitspakets zur Katastrophenvorsorge auf lokaler Ebene im Rahmen des geplanten TsunamiRisk Vorhabens in Indonesien wurde ein Unterauftrag (Spahn Consulting Services & Training) vergeben. Dadurch wurden die AP 430.1-3 erarbeitet.

Am Deutschen Institut für Entwicklungspolitik (DIE) arbeitet in den nächsten Jahren Frau Irina Raflina über ein DAAD Stipendium. Frau Raflina hat bereits im GITEWS und im PROTECTS Projekt eine wichtige Rolle im nationalen Downstreambereich gespielt und war schon zu der Zeit eine wichtige Kooperationspartnerin. Die Arbeit vor Ort unter der Anleitung von Frau Irina Raflina wurde durch Pos. 0850 finanziert.

Das GFZ hat für die Unterstützung des Projekts vor Ort die Bereitstellung von Mitteln für die tageweise Bezahlung von indonesischen Fachkräften vor Ort (Aufgaben: Vorbereitung von Terminen und Workshops, Kontaktaufnahme und Kontaktpflege mit Behörden und Einrichtungen vor Ort, Persönliche Erledigung von dringenden Anfragen) getätigt.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Rahmen des Projekts „Client II - TsunamiRisk“ geleisteten Arbeiten waren sowohl notwendig als auch angemessen und entsprachen weitgehend dem geplanten Umfang. Die Forschung zu durch Vulkane und Hangrutschungen induzierte Tsunamis erfordert die Zusammenarbeit von Experten verschiedener Disziplinen und bedarf einer öffentlichen Förderung. Dies ist nicht alleine durch Mittel der Programmorientierten Förderung des GFZ realisierbar. Die durchgeführten Arbeiten waren zum Erreichen der angestrebten Projektziele allesamt erforderlich. Die verwendeten Ressourcen waren erforderlich und angemessen.

4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die wissenschaftliche Verwertung der Projektergebnisse wurde durch Veröffentlichungen in Peer-reviewed Wissenschaftsjournalen und durch Präsentationen auf nationalen und internationalen Fachtagungen sichergestellt. Das GFZ förderte zudem den wissenschaftlichen Nachwuchs, in dem Bachelor- und Masterarbeiten im Themenbereich „Fernerkundung“ an der Universität Potsdam vergeben und begleitet wurden. Zudem wurden universitäre Pflichtpraktika von Studierenden ermöglicht und inhaltlich betreut sowie Erkenntnisse aus dem Vorhaben in die Lehre an Universitäten eingebracht.

5. Während der Durchführung bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Durch die aktive Teilnahme an (inter-)nationalen Konferenzen und Tagungen sowie durch die Studie aktueller Fachliteratur erfolgte während der Projektanbahnung und der Projektlaufzeit ein kontinuierlicher Austausch zu den entwickelten Methoden zum satellitengestützten Monitoring von Vulkanen. Durch Veröffentlichungen von dritter Seite wurden die Ziele und der Verlauf des Vorhabens jedoch nicht berührt.

6. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Veröffentlichungen in Fachzeitschriften:

Rafliana, I., F. Jalayer, A. Cerase, L. Cugliari, M. Baiguera, D. Salmanidou, Ö. Necmioğlu, I.A. Ayerbe, S. Lorito, S. Fraser, F. Løvholt, A. Babeyko, M.A. Salgado-Gálvez, J. Selva, R. De Risi, M.B. Sørensen, J. Behrens, I. Aniel-Quiroga, M. Del Zoppo, S. Belliazzi, I.R. Pranantyo, A. Amato, and U. Hancilar, 2022, Tsunami risk communication and management: Contemporary gaps and challenges. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 70: p. 102771. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102771>.

Darmawan, H., V.R. Troll, T.R. Walter, F.M. Deegan, H. Geiger, M.J. Heap, N. Seraphine, C. Harris, H. Humaida, and D. Müller, 2022, Hidden mechanical weaknesses within lava domes provided by buried high-porosity hydrothermal alteration zones. *Scientific Reports*. 12(1): p. 3202. DOI: 10.1038/s41598-022-06765-9. www.nature.com/articles/s41598-022-06765-9

Zorn, E. U., Orynbaikyzy, A., Plank, S., Babeyko, A., Darmawan, H., Robbany, I. F., and Walter, T. R. (2022) Identification and ranking of volcanic tsunami hazard sources in Southeast Asia, *EGUsphere* [preprint], <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-130>.

Zorn, E.U., Orynbaikyzy, A., Plank, S., Babeyko, A., Darmawan, H., Robbany, I.F., Walter, T.R., (2022) Identification and ranking of subaerial volcanic tsunami hazard sources in Southeast Asia. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 22, 3083–3104. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-3083-2022>

Zorn, Edgar U., Magdalena Vassileva, Thomas R. Walter, Herlan Darmawan, Leonie Röhler, Falk Amelung (2023) Interactions of magmatic intrusions with the multiyear flank instability at Anak Krakatau volcano, Indonesia: Insights from InSAR and analogue modeling. *Geology*; doi: <https://doi.org/10.1130/G50693.1>

Spahn, H., Lauterjung, J., (2023) Tsunami preparedness in Indonesia with special consideration of landslide and volcanic induced events: Characterization of the Threat - What do communities in risk areas need to be prepared for? Scientific Technical Report STR 23/07, Potsdam, GFZ German Research Centre for Geosciences, 19 p. <https://doi.org/10.48440/gfz.b103-23079>

Spahn H., Hybbeneth, N., Lauterjung, J. (2023) Frühwarnung neu denken – was Deutschland aus den Erfahrungen der langjährigen Zusammenarbeit mit Indonesien bei Aufbau und Betrieb des Tsunamifrühwarnsystems lernen kann. Februar 2023. Gastbeitrag im DKKV Newsletter <https://dkkv.org/gastbeitrag-fruehwarnung-neu-denken/>

Zorn, Edgar U.; Vassileva, Magdalena; Walter, Thomas R.; Darmawan, Herlan; Röhler, Leonie; Amelung, Falk (2023): Processed Sentinel-1 InSAR data of the multi-year gradual flank destabilisation of Anak Krakatau volcano, Indonesia. GFZ Data Services. <https://doi.org/10.5880/GFZ.2.1.2022.003>

Beiträge bei Konferenzen/Kongressen/Workshops (Aufgrund der Pandemie-Situation wurden bis 2022 nur wenige Konferenzen besucht):

Zorn, E.U., Orynbaikyzy, A., Plank, S., Walter, T.R., Babeyko, A., Darmawan, H., Robbany, I.F., (2022) A comprehensive assessment of the tsunami hazard from volcanic sources in Southeast Asia. Physics of Volcanoes Workshop 2022, 3-4 March 2022, online.

Vera F., Tilmann F., Saul J. & Karyono (2023). Seismic-based characterization for Volcano-Induced landslides: a feasibility study based on the 2018 Anak-Krakatau volcano flank collapse. The 28th IUGG General Assembly, Berlin, Germany.

Hybbeneth, N., Spahn, H., Lauterjung, J. (2023): Institutionelle Aspekte des operationellen Katastrophenrisiko-managements in Indonesien und Deutschland am Beispiel von Frühwarnung für schnell einsetzende Naturgefahren (Sturzfluten / Tsunamis) – Beitrag für Tagungsband zum BBK-Fachkongress „Forschung für den Bevölkerungsschutz“ 12-14 Januar 2023

Müller, D., Walter, T., Motagh, M., Stefanova Vassileva, M. (2023): The evolution of hydrothermal activity and instability of Anak Krakatau 2018-2023, analyzed from satellite and drone data, XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG). <https://doi.org/10.57757/IUGG23-2910>

Vera, F., Tilmann, F., Saul, J., Karyono, K. (2023): Seismic-based characterization for Volcano-Induced landslides: a feasibility study based on the 2018 Anak-Krakatau volcano flank collapse, XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) (Berlin 2023). <https://doi.org/10.57757/IUGG23-4138>

Doktor-, Master- und Bachelorarbeiten:

Frau Leonie Röhler (Fachrichtung Geophysik) September 2020. Masterarbeit zu dem Thema „Pre-collapse deformation analysis of Anak Krakatau, Indonesia“. Betreuung durch Prof. Korn (Uni Leipzig) und apl. Prof. Walter (Uni Potsdam). Note 1,3.

Herr Felipe Vera (Fachrichtung Geophysik/Seismologie). Doktorarbeit zum Thema Back-projection of seismic events. Betreuung durch Prof. F. Tilmann (Uni Potsdam). Verteidigung noch ausstehend.

Herr Daniel Müller (Fachrichtung Fernerkundung) September 2023. Doktorarbeit zu dem Thema "Identification and monitoring of structures, controls, and evolution dynamics of hydrothermal systems and associated alteration through high-resolution remote sensing and in situ analysis". Betreuung durch apl. Prof. Walter (Uni Potsdam) und Prof. Eva Eibl (Uni Potsdam). Note 1,0.



Teil II Eingehende Darstellung

Förderkennzeichen: 03G0906B

Zuwendungsempfänger: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

Projektleitung: Prof. Dr. Günter Strunz

Verbundprojekt: **Client-II Tsunami_Risk: Durch Vulkane und Hangrutschungen induzierte Tsunamis**

Vorhaben: **Forschung zu satellitengestütztem Vulkan-Monitoring**

Laufzeit: 01.03.2021 – 29.02.2024

Berichtszeitraum: 01.03.2021 – 29.02.2024

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03G0906B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen / den Autoren.

1. Erzielte Ergebnisse und Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Ziel des durchgeführten TSUNAMI_RISK-DLR Vorhabens war die Entwicklung innovativer Verfahren für eine Multiskalen- und Multisensor-Erdbeobachtung zur Erfassung und Analyse von Aktivitäten und Ausbruchsprozessen an indonesischen Vulkanen, die ein hohes Risiko für eine Tsunamiauslösung darstellen. Dabei sollten Daten von zeitlich hochauflösenden Thermalsensoren mit Daten von räumlich hochauflösenden multispektral und Radarsensoren kombiniert werden. Schwerpunkt der Forschungsarbeiten des DLR lagen im Arbeitspaket **AP 220 Fernerkundungsbasiertes Vulkanmonitoring**.

Hierbei wurden insbesondere nachfolgende wissenschaftliche und technische Arbeitsziele verfolgt:

(1) „Erfassung und Analyse thermaler Anomalien“:

Im Bereich der thermalen Fernerkundung von Vulkanen kooperiert das DLR seit mehreren Jahren mit dem italienischen National Research Council (CNR). Das CNR hat ein Verfahren zur automatisierten Erfassung thermaler Anomalien an Vulkanen mittels hochaufgelösten kurzwelligen Infrarot Sensordaten der Landsat-8/9 und Sentinel-2 Missionen entwickelt. Darauf basierend hat das DLR im Projekt TSUNAMI_RISK Weiterentwicklungen betrieben, die es nun ermöglichen, für erfasste Thermalanomalien quantitative Aussagen hinsichtlich der Temperatur und der freigesetzten Energie und deren zeitliche Entwicklung bei z.B. aktiven Lavaströmen zu geben. Bei Tagaufnahmen wird dabei der Einfluss der Sonneneinstrahlung auf das kurzwellige Infrarot durch Vergleichsanalysen mit dem Nahen Infrarot abgeschätzt, um den Einfluss der Sonneneinstrahlung aus dem Messsignal herauszurechnen und damit die Thermalanomalie unabhängig vom Einfluss der Sonneneinstrahlung zu charakterisieren. Eine weitere Entwicklung betraf die Kombination der oben erwähnten polar-orbit Infrarot Sensoren mit geo-

stationären Sensoren. Hinsichtlich der Erfassung thermaler Anomalien mittels geostationärer Sensoren zeigten unsere Analysen deutliche Vorteile des kurzwelligen Infrarots gegenüber dem herkömmlich verwendeten mittleren Infrarot. Die Arbeiten zur Erfassung und Analyse thermaler Anomalien an Vulkanen war eine wichtige Vorarbeit und wurde als zusätzliche Eingangsinformation für die nachfolgend beschriebenen Analysen zu Veränderungen an der Vulkanoberfläche verwendet.

(2) „Erfassung von Veränderung an der Vulkanoberfläche“:

Zur Erfassung und Analyse vulkanischer Aktivität wurden vom DLR im Rahmen von TSUNAMI_RISK drei Veränderungsdetektionsverfahren basierend auf Multi-Sensor Satellitendaten entwickelt.

a) Basierend auf optischen Satellitendaten

Dabei wurde das erste Verfahren basierend auf räumlich sehr hoch aufgelösten optischen Satellitendaten der PlanetScope Mission erarbeitet. PlanetScope nimmt die Erdoberfläche mit 3 m räumlicher Auflösung im sichtbaren und im Nahen Infrarot auf. Die aktuell etwa 130 kleinen Cubesat Satelliten der PlanetScope Konstellation ermöglichen eine tägliche Abdeckung aller Landmassen der Erde. Ziel des entwickelten Verfahrens ist die detaillierte Kartierung von Ablagerungen von Lavaströmen und Pyroklastischen Strömen. Von vulkanischen Ablagerungen bedeckte / zerstörte Vegetation ist im Nahen Infrarot über den Vergleich von Satellitendaten, die vor und nach einer Vulkaneruption aufgenommen wurden, gut erfassbar. Aber insbesondere in vegetationsfreien Bereichen aktiver Vulkane stößt die auf optischen Daten basierte Erfassung der Ablagerung neuer Lavaströme an ihre Grenzen, da diese neuen Ablagerungen sehr hohe spektrale Ähnlichkeiten zu umgebenden älteren Lavaströmen haben. Deshalb wurde ein neuartiger objektorientierter Klassifikationsansatz zur Kartierung der neuen Lavaströme sowohl in vegetationsbedeckten als auch in vegetationsfreien Bereichen entwickelt. Das Verfahren wurde zur Analyse mehrerer eruptiver Phasen folgender indonesischer Vulkane angewandt: Karangetang 2018/2019, Agung 2017, Anak Krakatau 2018/2019. Die entwickelte Methodik kombiniert PlanetScope Daten basierte Veränderungsanalysen zur Erfassung von Vegetationsverlusten auf Grund vulkanischer Aktivität (z.B. durch Lavaströme) mit der Analyse von Textur- und Helligkeitsveränderungen, mit hydrologischen Abflussmodellierungen (auf Basis digitaler Geländemodelle) und mit Analysen (der oben beschriebenen) thermaler Anomalien abgeleitet aus den kurzwelligen Infrarot Kanälen der Sentinel-2 und Landsat-8 Mission (im Zeitraum zwischen den Vorher und Nachher PlanetScope Daten). Die thermalen Anomalien und die Vegetationsverluste sind starke Veränderungsindikatoren und dienen als Startpixel für ein Wachstumsverfahren in benachbarte Bereiche, die sich durch Textur- und Helligkeitsveränderungen in den PlanetScope Daten auszeichnen. Durch die Kombination der aufgeführten Parameter ist es möglich, den gesamten vom neuen Lavastrom erfassten Bereich detailliert zu kartieren. Abbildung 1 zeigt das Ablaufdiagramm der entwickelten Methodik und beispielhaft die Kartierung der Lavaströme an der Westflanke des Karangetang Vulkans 2019. Bei den verwendeten PlanetScope Daten handelt es sich um kommerzielle Daten, die über ein Wissenschaftsdatenproposal bezogen wurden. In einem nächsten Schritt wurde erfolgreich die Übertragbarkeit der entwickelten Methodik auf kostenfreie Daten der systematisch aufnehmenden Satellitenmission Sentinel-2 getestet. Trotz deren gröberer Auflösung (10 m) im Vergleich zu den PlanetScope Daten (3 m) wurde die neue Lavastromfläche mit Sentinel-2 Daten mit 80% Übereinstimmung relativ gut erfasst. Durch die Verwendung der kostenfreien Sentinel-2 Daten wird eine breitere Anwendbarkeit der im Projekt entwickelten Methodik gewährleistet. Details zum entwickelten Verfahren sind in Rösch & Plank (2022)¹ beschrieben.

¹ Rösch, M., Plank, S., 2022. Detailed Mapping of Lava and Ash Deposits at Indonesian Volcanoes by Means of VHR PlanetScope Change Detection. Remote Sensing 14, 1168. <https://doi.org/10.3390/rs14051168>

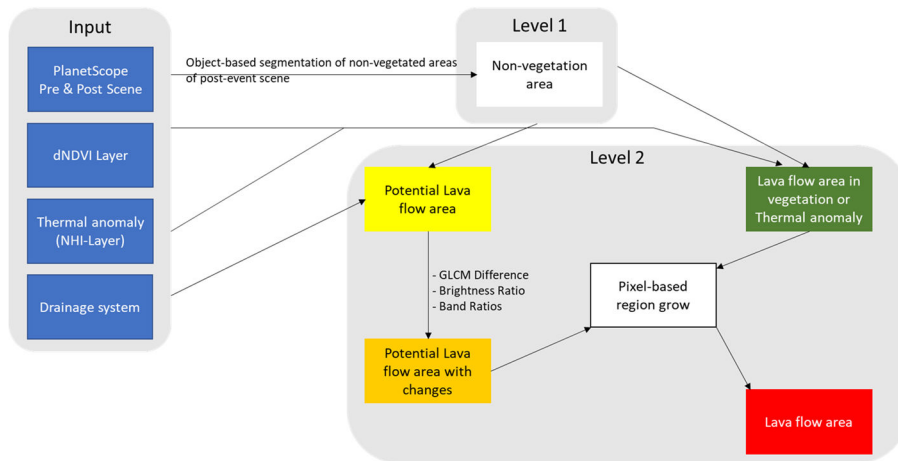


Abbildung 1a: Ablaufdiagramm (verändert nach Rösch & Plank 2022).



Abbildung 1b: Karangetang Vulkan, Indonesien PlanetScope Vorher-Aufnahme 04.05.2019 (verändert nach Rösch & Plank 2022).



Abbildung 1c: Karangetang Vulkan, Indonesien PlanetScope Nachher-Aufnahme 03.05.2020 (verändert nach Rösch & Plank 2022).

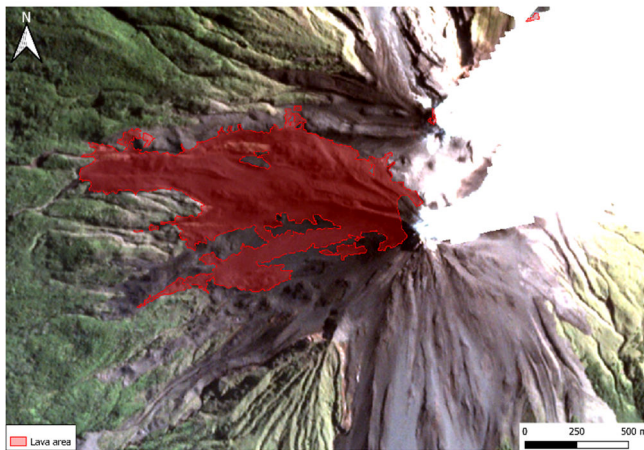


Abbildung 1d: Kartierte Lavastromablagerung an der Westflanke des Karangetang Vulkans (verändert nach Rösch & Plank 2022).

b) Kombination optischer und Radar Satellitendaten

Zusätzlich zu dem oben beschriebenen, auf optischen Satellitendaten basierten Verfahren wurde am DLR in Kooperation mit indonesischen Partnern (BRIN) eine weitere Methodik entwickelt, die als Grundlage auf wetterunabhängige Radarsatellitendaten zurückgreift. Dieser Ansatz zur automatischen Erfassung von Veränderungen an der Oberfläche von Vulkanen ist insbesondere in der oft stark bewölkten Untersuchungsregion Südostasien sehr hilfreich. Radarwellen ermöglichen des Weiteren auch einen Blick „durch“ vulkanische Aschewolken, sodass man mit Radarsatellitendaten im Gegensatz zu Daten optischer Sensoren auch während eines explosiven Ausbruchs Veränderungen an der Vulkanoberfläche erfassen und analysieren kann.

Die entwickelte Methodik zielt darauf ab, die mit dem Vulkanausbruch verbundenen Veränderungen an der Oberfläche von Vulkanflanken zu erfassen. Abbildung 2 zeigt den Workflow der Methodik. In einem ersten Schritt werden dabei vegetationsbedeckte und vegetationsfreie Flächen (vor einem möglichen Vulkanausbruch) anhand des Normalisierten Differenziellen Vegetationsindex (NDVI) auf Basis eines wolkenfreien Mosaiks optischer Sentinel-2 Satellitendaten unterschieden. Die Erfassung von Veränderungen durch Eruptionseignisse basiert dann ausschließlich auf den wetterunabhängigen Radarsatellitendaten.

Für die Kartierung von Veränderungen auf vegetationsfreien Flanken wird die interferometrische Kohärenz analysiert. Diese gibt die Ähnlichkeit der Phaseninformation zweier nacheinander unter gleichen geometrischen Parametern aufgenommenen Radarsatellitendaten wieder. Vegetationsfreie Flächen zeichnen sich durch hohe Kohärenzwerte aus. Veränderungen wie die Ablagerung von neuen Lavaströmen oder vulkanischer Asche führen zu einer starken Dekorrelation des interferometrischen Radarsignals und damit zu einer Reduktion der Kohärenz.

In vegetationsbewachsenen Bereichen werden Veränderungen über die Analyse der Radarrückstreuung und des polarimetrischen Radarsignals erfasst. Die Kreuzpolarisation VH der dual-polarimetrischen Sentinel-1 Radardaten ist sensitiv für Vegetation. Polarimetrische Dekompositionsverfahren wie die *Entropy/Alpha* Dekomposition ermöglichen die Zerlegung des Radarrückstreusignals in Flächenstreuer (typisch für Lavaflächen), Volumenstreuer (typisch für Vegetation) und sog. Doublebouncestreuer (typisch für Gebäude). Dabei charakterisiert *Alpha* den Radarrückstreungstyp und die *Entropy* den Vergleich zwischen von der Radarantenne gesendeter und empfangener Polarisation. Hohe Entropy Werte deuten auf Vegetationsbedeckung hin, während niedrige Entropy Werte auf vegetationsfreie Flächen wie z.B. einem neuen Lavastrom hinweisen. Ein Vorher-/Nachher-Vergleich ermöglicht somit sowohl mit der VH Radarrückstreuung allein als auch mittels der polarimetrischen Dekomposition eine Erfassung von z.B. neuen Lavaströmen in ehemals vegetationsbedeckten Bereichen.

Die entwickelte Methodik verwendet ein Wachstumsverfahren, das als Startbereiche zur Erfassung von Veränderungen einerseits bekannte aktive Vulkanschlote als auch durch Infrarotsatellitensensoren erfasste thermale Anomalien (siehe oben) verwendet.

Das Verfahren wurde anhand von fünf Eruptionseignissen entwickelt und getestet, die sich in den der jüngsten Vergangenheit in Indonesien und Papua-Neuguinea ereigneten (Abbildung 3). Die Methodik ermöglicht unabhängig von Wetterbedingungen und Sichtverhältnissen eine automatisierte Erfassung und Kartierung von neuen vulkanischen Ablagerungen verschiedenster Art (z.B. Lahare, pyroklastische Ströme, Lavaströme oder Vulkanasche) mit vielversprechender Genauigkeit. Details zur Methodik sind in Orynbaiyzy et al. (2023)² beschrieben.

² Orynbaiyzy, A., Plank, S., Vetrita, Y., Martinis, S., Santoso, I., Dwi Ismanto, R., Chusnayah, F., Tjahjaningsih, A., Suwarsono, Genzano, N., Marchese, F., Khomarudin, M.R., Strunz, G., 2023. Joint use of Sentinel-2 and Sentinel-1 data for rapid mapping of volcanic eruption deposits in Southeast Asia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 116, 103166. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103166>

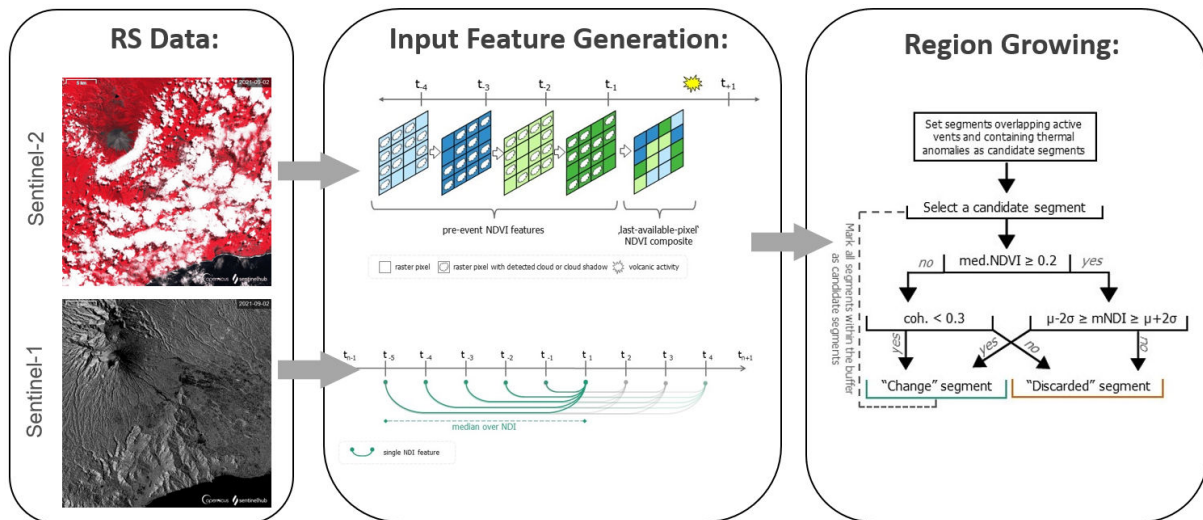


Abbildung 2: Ablaufdiagramm der Methodik zur Erfassung von Veränderungen an der Oberfläche von Vulkanen (verändert nach Orynbaikyzy et al. 2023).

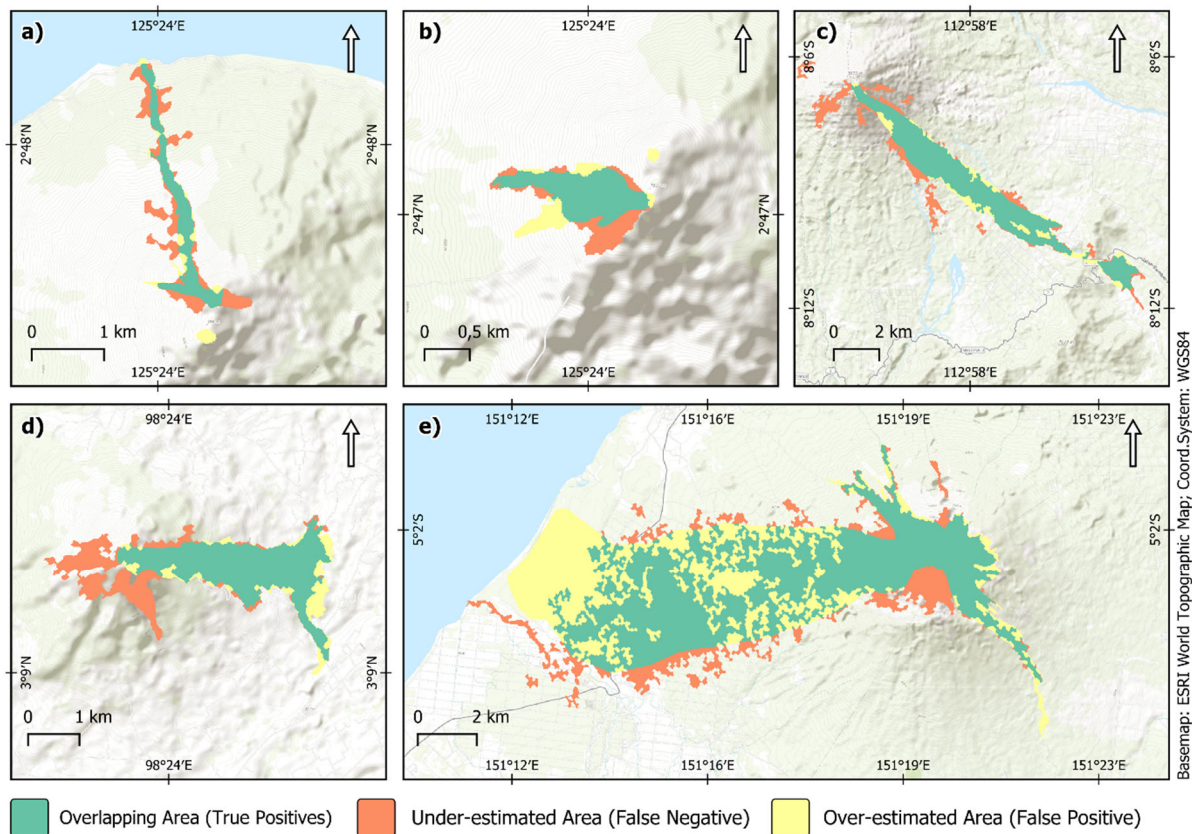


Abbildung 3: Erfassung von Veränderungen an der Oberfläche von Vulkanen auf Basis des entwickelten automatischen Radar-Verfahrens (verändert nach Orynbaikyzy et al. 2023).

c) Übertragbarkeit von maschinellen Lernverfahren zur Erfassung von Veränderungen an Vulkanen

Im Rahmen des Aufenthalts eines indonesischen Gastwissenschaftlers von BRIN am DLR (**AP 530 Ausbildung u. wissenschaftlicher Austausch**) wurde gemeinsam an der Übertragbarkeit von maschinellen Lernverfahren zur Erfassung von Veränderungen an Vulkanen gearbeitet. Es wurden hierbei drei Szenarien getestet. Im ersten Schritt wurde mittels Informationen abgeleitet aus Vorher und Nachher Satellitendaten des Radarsensors Sentinel-1 und des optischen Sensors Sentinel-2 ein Random Forest

Model zur Erfassung von Veränderungen an drei indonesischen Vulkanen (Sinabung, Semeru und Karangetang) trainiert. Dabei wurden insgesamt fünf Eruptionseignisse betrachtet. Dieses Model dient als Grundlage für die nächsten beiden Szenarien. Im zweiten Schritt wurde dann die räumliche Übertragbarkeit getestet, indem Trainingsinformationen von jeweils zwei Vulkanen kombiniert wurden um die durch Eruptionseignisse verursachten Veränderungen am dritten Vulkan zu erfassen. Eine rein räumliche Übertragung ohne Informationen zum zu untersuchenden Vulkan erwies sich als nicht ausreichend genau genug. Deshalb wurde in einem dritten Schritt zusätzlich zu den Trainingsinformationen aus den jeweils anderen Vulkanen auch die Trainingsinformation aus einem vorhergehenden Vulkanausbruch des zu untersuchenden Vulkans herangezogen. Die Ergebnisse dieses dritten Szenarios, das einen räumlichen und zeitlichen Transfer der Trainingsinformationen beinhaltet, sind deutlich besser als jene des rein räumlichen Transfers (Szenario 2). Zur Verbesserung der Genauigkeiten wurde anschließend ein Post-Processing durchgeführt. Hierbei werden mittels hydrologischer Abflussmodellierung (auf Basis digitaler Geländemodelle; siehe Rösch & Plank 2022) ausgehend von Segmenten mit hoher Veränderungswahrscheinlichkeit die entsprechenden Abflusskanäle erfasst und anschließend die kompletten Ablagerungen des Lavastroms, Pyroklastischen Stroms oder Lahars durch die stückweise Verschmelzung von benachbarten Segmenten modelliert. Dabei wird ein Wachstumsverfahren angewandt, das benachbarte Segmente anhand ihrer Veränderungswahrscheinlichkeit mit einander verbindet. In einem zyklischen Verfahren wird Schritt für Schritt der Grenzwert der Veränderungswahrscheinlichkeit reduziert. Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse für ein Ereignis am Mt. Semeru trainiert anhand vergangener Eruptionseignisse am Mt. Semeru und anhand von Trainingsinformationen von Eruptionen der Vulkane Karangetang und Sinabung. Eine gemeinsame wissenschaftliche Veröffentlichung von BRIN und DLR ist kurz vor der Fertigstellung³.

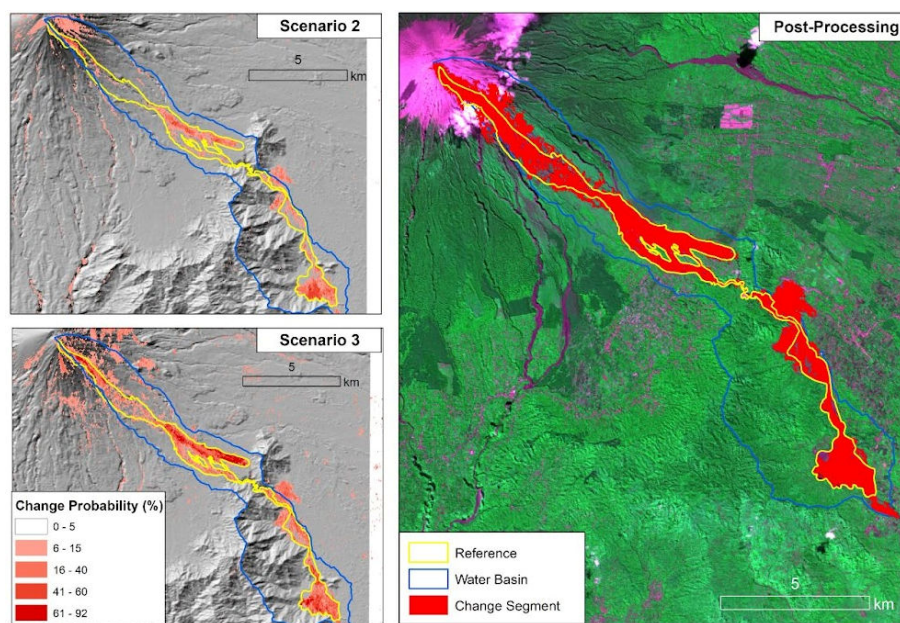


Abbildung 4: Mt. Semeru, Indonesien: Am 4. Dezember 2022 löste ein Domkollaps einen Pyroklastischen Strom und anschließenden Lahar aus. Links oben: Szenario 2 (räumlicher Transfer der Trainingsinformationen); links unten: Szenario 3 (zeitlicher und räumlicher Transfer der Trainingsinformationen); Rechts: Ergebnis nach Post-processing (Santoso et al. in prep.).

³ Santoso, I., Orynbaikyzy, A., Martinis, S., Khomarudin, M.R., Vetrita, Y., Strunz, G., Plank, S. (in prep.). Land Surface Change Detection after Major Volcanic Eruption: Machine Learning and Spatial Transferability.

d) Unterstützung der indonesischen Zivilschutzbehörde durch die Aufnahme und Auswertung sehr hochauflösender Radardaten

Der oben beschriebene Domkollaps und dadurch ausgelöste Pyroklastische Strom und nachfolgende Lahar am Mt. Semeru, Indonesien ereignete sich am 4. Dezember 2022, also während des Projektzeitraums. Im Rahmen einer Aktivierung der International Charter ‚Space and Major Disasters‘⁴ unterstützte das DLR die indonesische Zivilschutzbehörde BNPB durch die Bereitstellung von Kartenprodukten auf Basis von sehr hochauflösenden TerraSAR-X Radardaten. Abbildung 5 zeigt im Detail den Bereich des Domkollaps und die Veränderungen durch die Ablagerungen des Pyroklastischen Stroms.

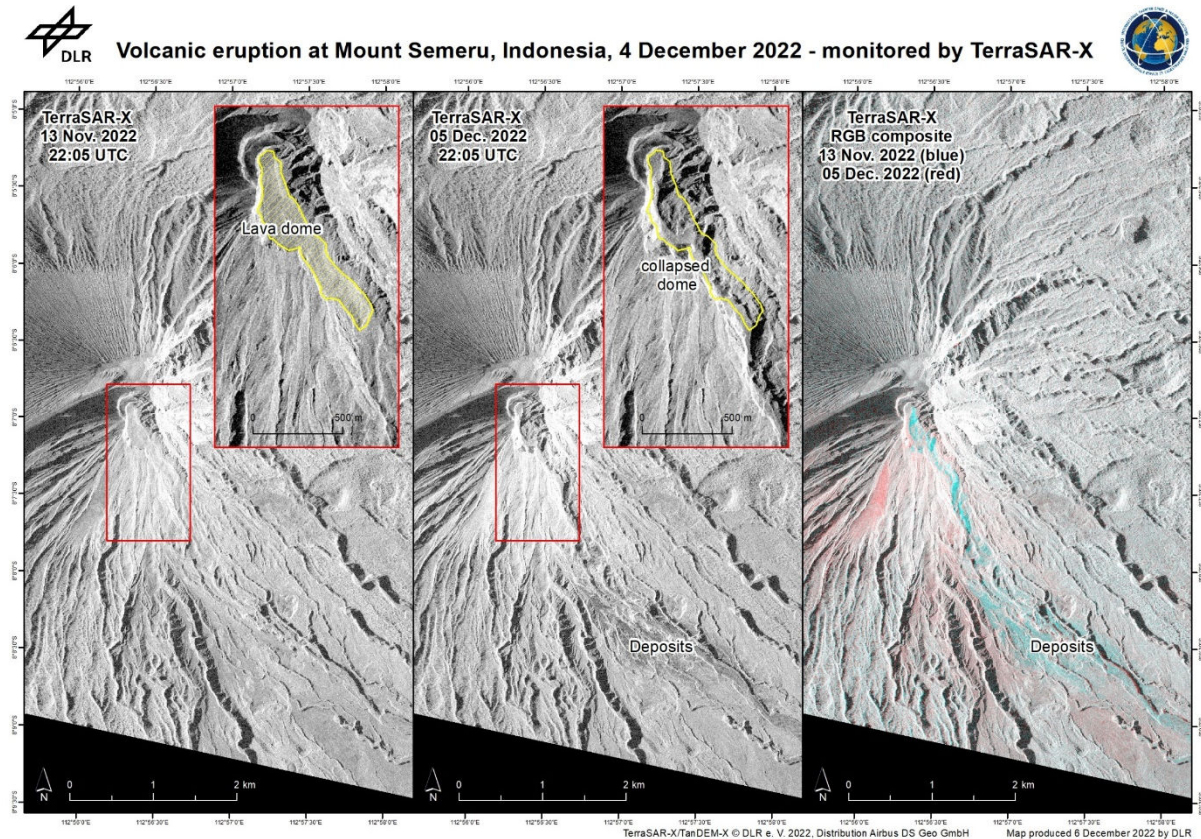


Abbildung 5: Mt. Semeru, Indonesien: Am 4. Dezember 2022 löste ein Domkollaps einen Pyroklastischen Strom und anschließenden Lahar aus. Kartenprodukt des DLR im Rahmen einer Aktivierung der International Charter ‚Space and Major Disasters‘.

(3) „InSAR Deformations-Monitoring“:

Das DLR akquirierte Aufnahmen des sehr hochauflösenden deutschen Radarsensors TerraSAR-X über den als kritisch eingestuft potentiell tsunamigenen Vulkanen in Indonesien und Papua-Neuguinea (siehe AP 210, unten). Auf Basis dieser Daten und zusätzlichen frei verfügbaren Sentinel-1 Radardaten wurden interferometrische Zeitreihen-Analysen zur Erfassung von Deformationen und Flankenbewegungen an ausgewählten Vulkanen wie Banda Api und Kadovar durchgeführt. Bzgl. der detaillierten interferometrischen Analyse am Anak Krakatau wird auf den Projektbericht des Projektpartners GFZ verwiesen (FKZ 03G0906A).

⁴ <https://disasterscharter.org/web/guest/activations/-/article/volcano-in-indonesia-activation-792->

Beteiligung des DLR an weiteren Projektarbeitspaketen

Im Projekt TSUNAMI_RISK war das DLR des Weiteren an den APs 100 *Projektkommunikation*, 210 *Identifizierung von Risikogebieten* und 510 *Politikempfehlungen zur Steigerung der gesellschaftlichen Resilienz* beteiligt.

AP 210 Identifizierung von Risikogebieten

Ziel des **AP 210** war die Identifizierung und Charakterisierung potentiell tsunamigener Vulkane in Indonesien. Das DLR unterstützt die Arbeiten des GFZ, das dieses AP leitete.

Im Rahmen einer Masterarbeit eines indonesischen Studenten am DLR (Robbany 2021) wurden historische Tsunamis in Indonesien analysiert, die durch Vulkanaktivität ausgelöst wurden. Des Weiteren wurde ein Multi-Kriterien-Ansatz zur Identifizierung und Klassifizierung von potentiell tsunamigenen Vulkanen in Indonesien erarbeitet. Dabei wurden alle küstennahen und auf Inseln gelegene Vulkane berücksichtigt. Zur Einteilung der potentiell tsunamigenen Vulkane bzgl. ihrer Gefahr einen Tsunami auszulösen wurden folgende Kriterien betrachtet und in einem gewichteten Ansatz miteinander kombiniert (Abbildung 6):

- H/D Ratio: Höhe des Vulkangipfels über dem Meeresspiegel im Verhältnis zur Distanz zur Küste.
- Klassifizierung hinsichtlich der geographischen Lage des Vulkans: im Landesinnern, direkt an der Küste, Vulkaninsel (wobei sich das eigentliche Vulkangebäude unter Wasser fortsetzt und der Gipfel des Vulkans die Insel bildet).
- Basierend auf indonesischen Geoinformationen:
 - Lage der verschiedensten Vulkangefahrenzonen im Verhältnis zur Küste.
 - Informationen aus Hangrutschungsgefährdungskarten

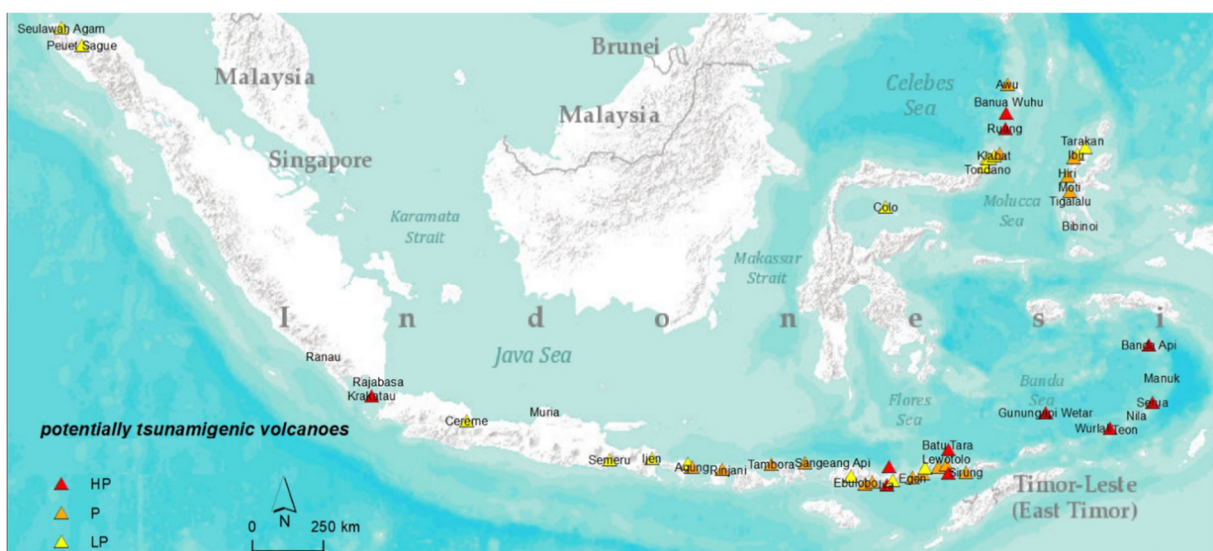


Abbildung 6: Identifizierte potentiell tsunamigene Vulkane in Indonesien basierend auf Robbany 2021 (DLR).

Zu Beginn des Projekts TSUNAMI_RISK wurden am GFZ und am DLR unabhängig voneinander erste Verfahren zur Identifizierung und Charakterisierung potentiell tsunamigener Vulkane in Indonesien entwickelt. Dieses parallele Arbeiten ermöglichte ein unabhängiges Testen verschiedener Methoden. Anschließend wurden beide Verfahren miteinander verglichen und ihre Vor- und Nachteile analysiert. Trotz teilweise unterschiedlicher Ansätze wurden vergleichbare Ergebnisse erzielt. Es wurde ein gemeinsames Verfahren aufgesetzt, das die Vorteile beider Ansätze miteinander kombiniert. Anschließend wurde das Verfahren zur Identifizierung potentiell tsunamigener Vulkane auf die benachbarten

Regionen Papua-Neuguinea, Philippinen und Indien ausgedehnt (Abbildung 7). Das kombinierte Verfahren wird im Projektbericht des Projektpartners GFZ (FKZ 03G0906A) und detailliert in der gemeinsam mit indonesischen Partnern erstellten GFZ-DLR Publikation Zorn et al. (2022)⁵ beschrieben (Abbildung 7).

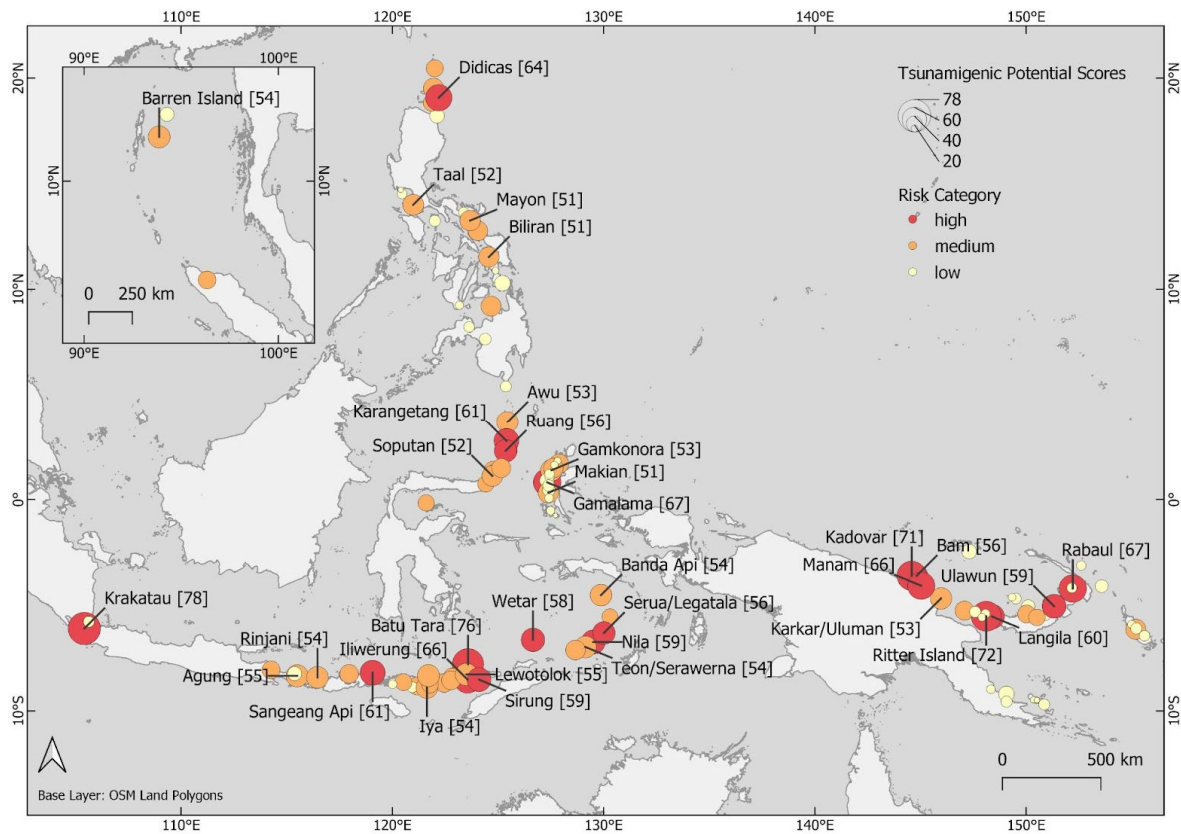


Abbildung 7: Identifizierte potentiell tsunamigene Vulkane in Indonesien, Papua-Neuguinea, Indien und auf den Philippinen (finale Verfahren, Zorn et al. 2022).

AP 510 Politikempfehlungen zur Steigerung der gesellschaftlichen Resilienz:

Die beiden Tsunamis, die sich Ende 2018 in Sulawesi und Anak Krakatau (Indonesien) ereigneten, haben eindrucksvoll gezeigt, wie anfällig Gemeinden für Tsunamis sind, die durch Erdrutsche und vulkanische Mechanismen ausgelöst werden. Beide Tsunamis waren das Ergebnis einer Kette (Kaskade) von Ereignissen und in beiden Fällen trafen die daraus resultierenden Tsunamis die lokale Bevölkerung weitgehend unvorbereitet und verursachten eine hohe Zahl von Todesopfern. Dies wurde auf das begrenzte Wissen über die Entstehung von Tsunamis durch andere Mechanismen als Erdbeben zurückgeführt und bei den zuständigen Behörden die Frage nach geeigneten Strategien für eine verbesserte Vorsorge, Frühwarnung und Schadensbegrenzung bei solchen Ereignissen aufgeworfen. Die Perspektive lokaler Gemeinschaften muss dabei besonders berücksichtigt werden, da sie es sind, die einerseits mit den direkten Auswirkungen solcher Ereignisse konfrontiert sind und andererseits eine bessere Vorbereitung und langfristige Schadensbegrenzung vor Ort umsetzen müssen.

Basis dafür ist ein besseres Verständnis der Tsunami-Gefahren, denen die Gemeinden ausgesetzt sind. Dazu wurde basierend auf der Publikation Zorn et al. (2022) gemeinsam mit dem AP 430 ein

⁵ Zorn, E.U., Orynbaikyzy, A., Plank, S., Babeyko, A., Darmawan, H., Robbany, I.F., Walter, T.R., 2022. Identification and ranking of subaerial volcanic tsunami hazard sources in Southeast Asia. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 22, 3083–3104. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-3083-2022>

Papier erstellt: "Tsunami preparedness in Indonesia at the local level with special consideration of landslide and volcanic induced events; Characterization of the Threat, What do communities in risk areas need to be prepared for?" (Spahn & Lauterjung, 2023⁶). Dieses Papier bildete die Grundlage für eine später von allen deutschen und indonesischen Projektpartnern erarbeitete Politikempfehlung des Projekts „Joint Research between Indonesia and Germany on Volcanic and Landslide induced Tsunamis: Recommendations for the Way Ahead“. Diese Politikempfehlung wird in Kürze an verschiedene indonesische Behörden übergeben und soll auch international veröffentlicht werden.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Rahmen der Durchführung des Projektes sind Ausgaben in Form von Personalkosten, Reisekosten und sonstigen unmittelbaren Vorhabenkosten entstanden, über die im Detail im zahlenmäßigen Nachweis berichtet wurden.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Forschung zu durch Vulkane und Hangrutschungen induzierte Tsunamis erfordert die Zusammenarbeit von Experten verschiedener Disziplinen und bedarf einer öffentlichen Förderung. Dies ist nicht alleine durch Mittel der Programmorientierten Förderung des DLR realisierbar.

Die durchgeführten Arbeiten waren zum Erreichen der angestrebten Projektziele allesamt erforderlich. Die verwendeten Ressourcen waren erforderlich und angemessen.

4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die wissenschaftliche Verwertung der Projektergebnisse wurde durch Veröffentlichungen in Peer-reviewed Wissenschaftsjournalen und durch Präsentationen auf nationalen und internationalen Fachtagungen sichergestellt. Das DLR förderte zudem den wissenschaftlichen Nachwuchs, in dem Bachelor- und Masterarbeiten im Themenbereich „Satellitengestütztes Vulkan Monitoring“ vergeben und begleitet wurden. Zudem wurden universitäre Pflichtpraktika von Studierenden ermöglicht und inhaltlich betreut sowie Erkenntnisse aus dem Vorhaben in die Lehre an Universitäten eingebracht.

5. Während der Durchführung bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Durch die aktive Teilnahme an (inter-)nationalen Konferenzen und Tagungen sowie durch die Studie aktueller Fachliteratur erfolgte während der Projektanbahnung und der Projektlaufzeit ein kontinuierlicher Austausch zu den entwickelten Methoden zum satellitengestützten Monitoring von Vulkanen. Durch Veröffentlichungen von dritter Seite wurden die Ziele und der Verlauf des Vorhabens jedoch nicht berührt.

⁶ Spahn, H., Lauterjung, J., 2023. Tsunami preparedness in Indonesia with special consideration of landslide and volcanic induced events: Characterization of the Threat - What do communities in risk areas need to be prepared for? Scientific Technical Report STR 23/07, Potsdam, GFZ German Research Centre for Geosciences, 19 p. <https://doi.org/10.48440/gfz.b103-23079>

6. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Veröffentlichungen in Fachzeitschriften:

- Orynbaikyzy, A., Plank, S., Vetrita, Y., Martinis, S., Santoso, I., Dwi Ismanto, R., Chusnayah, F., Tjahjaningsih, A., Suwarsono, Genzano, N., Marchese, F., Khomarudin, M.R., Strunz, G., 2023. Joint use of Sentinel-2 and Sentinel-1 data for rapid mapping of volcanic eruption deposits in Southeast Asia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 116, 103166. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103166>
- Rösch, M., Plank, S., 2022. Detailed Mapping of Lava and Ash Deposits at Indonesian Volcanoes by Means of VHR PlanetScope Change Detection. *Remote Sensing* 14, 1168. <https://doi.org/10.3390/rs14051168>
- Zorn, E.U., Orynbaikyzy, A., Plank, S., Babeyko, A., Darmawan, H., Robbany, I.F., Walter, T.R., 2022. Identification and ranking of subaerial volcanic tsunami hazard sources in Southeast Asia. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 22, 3083–3104. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-3083-2022>

Veröffentlichungen in anderen Zeitschriften:

- Spahn, H., Lauterjung, J., 2023. Tsunami preparedness in Indonesia with special consideration of landslide and volcanic induced events: Characterization of the Threat - What do communities in risk areas need to be prepared for? Scientific Technical Report STR 23/07, Potsdam, GFZ German Research Centre for Geosciences, 19 p. <https://doi.org/10.48440/gfz.b103-23079>

Geplante Veröffentlichung in Fachzeitschriften:

- Santoso, I., Orynbaikyzy, A., Martinis, S., Khomarudin, M.R., Vetrita, Y., Strunz, G., Plank, S. (in prep.). Land Surface Change Detection after Major Volcanic Eruption: Machine Learning and Spatial Transferability.

Beiträge bei Konferenzen/Kongressen/Workshops:

- Orynbaikyzy, A., Plank, S. M., Martinis, S., Tjahjaningsih, A., Ismanto, R. D., Chusnayah, F., Santoso, I., Suwarsono, Khomarudin, M.R., Vetrita, Y., 2022. SAR-based Automated Unsupervised Rapid Mapping of Land Surface Changes after Volcanic Eruptions in Indonesia. EARSel Symposium 2022, 13-16 Sep 2022, Paphos, Zypern.
- Rösch, M., Plank, S., 2022. Combining VHR PlanetScope imagery, HR short-wave infrared data and digital elevation models for mapping of lava flow deposits. ESA Living Planet Symposium 2022, 23-27 May 2022, Bonn, Deutschland.
- Zorn, E.U., Orynbaikyzy, A., Plank, S., Walter, T.R., Babeyko, A., Darmawan, H., Robbany, I.F., 2022: A comprehensive assessment of the tsunami hazard from volcanic sources in Southeast Asia. Physics of Volcanoes Workshop 2022, 3-4 March 2022, online.

Master- und Bachelorarbeiten:

- Ismail Fata Robbany, 2021: Identification and Analysis of Tsunamigenic Volcanoes in Indonesia using Satellite-Based Earth Observation Data. Masterarbeit an der HafenCity Universität Hamburg. Supervisor: Prof. Dr.-Ing. Jochen Schiewe (HC Uni Hamburg) und Dr. Simon Plank (DLR).
- Moritz Rösch, 2021: Monitoring vulkanischer Naturgefahren in Indonesien - Veränderungsanalysen basierend auf hochaufgelösten PlanetScope Daten kombiniert mit weiteren Erdbeobachtungsdaten. Bachelorarbeit an der Julius-Maximilians-Universität Würzburg. Supervisor: Dr. Tobias Ullmann (Uni Würzburg) und Dr. Simon Plank (DLR).



Teil II Eingehende Darstellung

Förderkennzeichen: 03G0906C

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Braunschweig, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Abtl. Hydromechanik, Küsteningenieurwesen und Seebau

Teilprojektleitung: Prof. Dr.-Ing. habil. Nils Goseberg

Verbundprojekt: **Client-II TsunamiRisk: Durch Vulkane und Hangrutschungen induzierte Tsunamis**

Vorhaben: **Modellierung der Tsunami-Erzeugung und -ausbreitung**

Laufzeit: 01.03.2021 – 29.02.2024

Berichtszeitraum: 01.03.2021 – 29.02.2024

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03F0888C gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen / den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	3
Tabellenverzeichnis	3
Abkürzungsverzeichnis	3
1. Erzielte Ergebnisse und Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele.....	4
a. Zielsetzung.....	4
b. Analyse des derzeitigen Wissenstands.....	4
c. Aufbau der Laborversuche	6
i. Vibrationsinduzierte Rutschungen	6
ii. Weiterentwicklung 2D Versuchsstand	7
d. Ergebnisse der Laborversuche	9
e. Numerische Modellierung.....	13
f. Zusammenfassung und Ausblick	15
2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	15
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	15
4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	16
5. Während der Durchführung bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	16
6. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	16
Literaturverzeichnis.....	16

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Skizze des 2D Versuchsaufbaus für vibrationsinduzierte Rutschungen.....	6
Abbildung 2: Schematische Skizze des Testaufbaus am Beispiel der IMU-Konfiguration 6, Draufsicht .	7
Abbildung 3: Skizze des erweiterten 2D Versuchsstands (WG: Wave Gauge (Wellenmesspegel), Δx : Distanz zwischen WGs H, L : Kanalabmessungen, h : Wasserstand, α : Rampenneigung, l_s, s : Maße Rutschungskörper, m_s : Rutschungsmasse, V_s : Rutschungsvolumen, φ_s : Dichte Rutschungsmaterial)	8
Abbildung 4: oben: Mittelwerte von v_{total} für zunehmende Abstände zwischen den einzelnen Steinen, wie durch die Grautöne angegeben, unten: Segmentierung der Rampe in drei Bereiche mit individuellen Gleiteigenschaften.....	10
Abbildung 5: Kumulative Verschiebung in y -Richtung für STR ID 6.....	10
Abbildung 6: oben: Ausbreitung der Wasserstandsänderung η über die Zeit an WGs 0, 4 und 8, Vergleich repräsentativer Tests für jedes getestete Material ($dM = 12$ mm, $M = 0,42$), unten: Ausbreitung der Wasserstandsänderung η über die Zeit an WGs 0, 4 und 8, Vergleich von repräsentativen Tests jeder getesteten Korngröße (Granitsplitt, $M = 0,42$)	11
Abbildung 7: Mittelwerte der maximalen Wellenamplitude a_{max} . Links: Vergleich verschiedener Korngrößen des Granitsplitts, rechts: Vergleich verschiedener Rutschungsmaterialien mit $dM = 12,0$ mm. Rote Symbole markieren Rutschungen mit $m_s = 5$ kg, schwarze Symbole markieren Rutschungen mit $m_s = 10$ kg. Horizontale Striche reichen vom ersten Quartil bis zum dritten Quartil.	12
Abbildung 8: Boxplots der Froude Zahl der Rutschung (Slide Froude number) bei Eintritt in die Wasseroberfläche <i>Froude</i> . Links: Vergleich verschiedener Korngrößen, rechts: Vergleich verschiedener Rutschungsmaterialien, oben: $M = 0,42$, unten: $M = 0,83$. Rote Quadrate markieren einzelne Messungen. Boxplots reichen vom ersten Quartil bis zum dritten Quartil; die weiße Linie bezeichnet den Median.....	13
Abbildung 9: Skizze des Modellaufbaus	14
Abbildung 10: Charakteristische Turbulenz in der Spritzzone und Lufteintrag (Strömungsgeschwindigkeit durch Vektoren gekennzeichnet).....	14

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Parametervariationen der Versuche zum Einfluss des Materials und der Korngröße (Breite der Rutschung $b_s = 0,3$ m, Dichte von Wasser $\rho_w = 1$ g/cm ³).....	8
Tabelle 2: Parametervariationen der Versuche mit signifikant größeren Steinen (Breite der Rutschung $b_s = 0,3$ m, Dichte von Wasser $\rho_w = 1$ g/cm ³)	9
Tabelle 3: Eingangsparameter der Testfälle.....	14

Abkürzungsverzeichnis

DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
FZK	Forschungszentrum Küste
GFZ	Deutsches GeoForschungsZentrum
GWK	Großer Wellenkanal
IMU	Inertia Measurement Unit
LES	Large Eddy Simulation
NSE	Navier-Stokes Equations
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
STR	Structure

1. Erzielte Ergebnisse und Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse des Teilarbeitspaket 330 dargestellt.

a. Zielsetzung

Trotz der seit 2011 in Indonesien implementierten Frühwarnsysteme für seismisch ausgelöste Erdbeben ereigneten sich im Jahr 2018 verheerende Tsunamis, die eine hohe Zahl von Opfern forderten. Diese Tsunamis wurden durch Hangrutschungen ausgelöst, die durch das Abrutschen oder Zusammenbrechen von Bergflanken verursacht wurden. Solch hangrutschinduzierte Tsunamis entstehen zum Beispiel durch vulkanische Aktivität oder Erdbeben.

Das TSUNAMI_RISK-Projekt hatte zum Ziel, die Vorsorge, Frühwarnung und Schadensminderung solcher kaskadierenden Ereignisse zu verbessern. Durch die Analyse dieser hangrutschinduzierten Tsunamis sollten Maßnahmen entwickelt werden, um die Auswirkungen auf betroffene Kommunen zu minimieren. Eine effektive Frühwarnung und verbesserte Präventionsmaßnahmen waren zentrale Aspekte des Projekts, um die Widerstandsfähigkeit der Bevölkerung gegenüber derartigen Naturkatastrophen zu stärken.

Das Hauptziel des Teilarbeitspaketes 330 bestand darin, tsunamigene Hangrutschungen mithilfe von physikalischen Modellen zu untersuchen sowie numerische Simulationsverfahren anzuwenden, die in bestehende Frühwarnsysteme integriert werden können. Im Einzelnen beinhaltete dies:

- **AP 330.1 Physikalische 2D Versuche:** Erprobung und Entwicklung eines verbesserten Laborverfahrens für die Vulkan-/Hanginstabilität und Untersuchung unterschiedlicher Kollapsmassen.
- **AP 330.2 Physikalische 3D Versuche:** Modellierung vergangener Ereignisse im Zielland Indonesien mittels Datenbasis der Verbundpartner (DLR, GFZ) und Analyse von Tsunamientstehung und -ausbreitung.
- **AP 330.3 Numerische Simulation:** Aufbau eines 3D Modells auf Basis der Navier-Stokes-Gleichungen zur umfassenden Simulation der physikalischen Prozesse und Parameter und die Bereitstellung tiefengemittelter, weniger rechenintensiver Simulationsverfahren für Frühwarnsysteme

b. Analyse des derzeitigen Wissensstands

Early-Warning hangrutschinduzierte Tsunamis

Der derzeitige Wissensstand zur Entstehung von Tsunamis durch gravitative Massenbewegungen offenbart erhebliche Wissenslücken, insbesondere im Vergleich zu durch Erdbeben ausgelösten Tsunamis. Etablierte Frühwarnsysteme sind zwar in der Lage, seismische Ereignisse zu erkennen, aber ihre Effizienz bei der Identifizierung von Tsunamis, die durch Massenströme verursacht werden, wird durch begrenztes Verständnis und unzureichende numerische Modelle behindert.

Die bestehenden Systeme erkennen zuverlässig Tsunamiwellen, die durch tektonische Plattenverschiebungen am Meeresboden entstehen, wie z.B. der Tsunami im Indischen Ozean im Jahr 2004 (Ghobarah et al., 2006). Eine Vielzahl vergangener Tsunamis (bspw. beide Tsunamis 2018 in Indonesien) wurde jedoch in der Nähe der Wasseroberfläche ausgelöst; dabei wurden Impulswellen erzeugt, die nicht unbedingt Bodenkontakt hatten und daher von den auf Drucksensoren basierenden Frühwarnsystemen nicht erkannt wurden.

Laborversuche

Subaerische Hangrutsche wurden bereits häufig mit starren Blöcken verschiedener Formen modelliert (Di Risio et al., 2009; Enet & Grilli, 2007; Panizzo et al., 2005) oder mit granularem Material, das in sich zusammenfällt (Robbe-Saule et al., 2021) oder in ein Gewässer rutscht. Mohammed und Fritz (2010) verwendeten einen pneumatischen Schlitten, um eine granulare Masse aus feinem Kies an einem Hang zu beschleunigen. Sie analysierten die Eigenschaften der Welle in Korrelation mit dem Volumen, der Form und der Aufprallgeschwindigkeit des Hangrutsches und fanden heraus, dass die anfänglichen Welleneigenschaften von den Parametern des Hangrutsches bestimmt werden. Die Wellenausbreitung wird jedoch ausschließlich von den Wellenparametern und der Wassertiefe bestimmt. Fritz et al. (2009) verwendeten den identischen pneumatischen Schlitten, jedoch mit einem Gefälle und gleichmäßigem Granulat mit einem Durchmesser von 4 mm, um den Tsunami in der Lituya-Bucht im Labor zu reproduzieren, und stellten eine gute Übereinstimmung zwischen den physikalischen Tests und den analytischen Gleichungen zur Vorhersage des Wellenaufbaus auf der Grundlage der Theorie der solitären Welle fest. Mohammed und Fritz (2012) führten umfangreiche dreidimensionale Tests mit oben erwähntem Tsunami-Generator durch und stellten fest, dass nur 1% bis 15% der Energie der Rutschungen in die erzeugten Wellen umgewandelt werden, die nicht vom solitären Typ sind, sondern nichtlineare oszillierende Wellen oder Wellen vom Übergangstyp. Heller und Hager (2014) überprüften den sogenannten Impuls-Produkt-Parameter P , einen semiempirischen Parameter zur Vorhersage der von einem subaerischen Hangrutsch erzeugten Wellenmerkmale, der ursprünglich von Heller und Hager (2010) eingeführt wurde. Die meisten Autoren nutzten starre Blöcke oder granulares Material, wobei starre Rutschungen unter ansonsten gleichen Bedingungen größere Wellen erzeugen, als granulares Material (Evers et al., 2019). Zumeist werden einheitliche Kugeln mit geringer Rauheit als Rutschungsmaterial verwendet (Mulligan et al., 2019; Sarlin et al., 2021; Tang et al., 2018; Viroulet et al., 2014). Wenige Veröffentlichungen sind bekannt, in welchen scharfkantiges Material oder Material mit naturnahen Größenverteilungen als Rutschungsmaterial verwendet wurde (Lindstrøm, 2016).

Numerische Modellierung

Als mathematische Gleichungen für die numerische Modellierung tsunamigener Hangrutschungen kommen tiefengemittelte Gleichungen (Flachwassergleichungen oder Boussinesq-Gleichungen), breitengemittelte Gleichungen oder dreidimensionale, in Raum und Zeit diskretisierte Gleichungen (z.B. Navier-Stokes-Gleichungen (NSE), Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) oder Large Eddy Simulation (LES)) in Frage. Tiefen-, bzw. breitengemittelte Gleichungen können Phänomene wie Dispersion, starke Turbulenz und Lufteintrag nicht berücksichtigen, welche wichtige Prozesse in der Wellenerzeugung und -ausbreitung darstellen.

Am besten geeignet sind daher die NSE-Modelle, welche die komplexe Interaktion der drei Phasen akkurat darstellen und Turbulenz und Dispersion ausreichend genau auflösen. Einer der Nachteile dieser Modelle ist der große Rechenaufwand. Tsunamigene Hangrutschungen wurden bereits im Lagrangeschen Framework als auch im Eulerschen Framework modelliert. Lagrangesche Methoden haben den Nachteil, dass sie bei großskaligen Simulationen einen extrem hohen Rechenaufwand mit sich bringen, während bei Eulerschen Modellen Schwierigkeiten auftreten können, große Deformationen der freien Wasseroberfläche korrekt darzustellen. (Yavari-Ramshe & Ataie-Ashtiani, 2016)

Hangrutschungen können in numerischen Simulationen als starr oder verformbar betrachtet werden. Der starre Ansatz ist nicht geeignet, um die Wechselwirkungen zwischen Rutschungskörper und Wasser im Detail zu untersuchen. Beim verformbaren Ansatz wird das Rutschungsmaterial als Fluid betrachtet, um das dynamische Verhalten der Rutschung zu erfassen. Eine Schlüsselrolle bei der korrekten Simulation von Gleitkinematik und Wellenerzeugung spielt das rheologische Modell,

welches von Materialeigenschaften (insb. geomechanische Parameter und Porosität) abhängt (Ancey, 2007; Iverson & Vallance, 2001). Dabei beschreibt die Rheologie den Zusammenhang zwischen Scherspannung und Scherrate. Um granulares Fließen wie bei Schlammrutschungen oder Geröllrutschungen zu simulieren, werden typischerweise die rheologischen Modelle von Newton, Bingham (Bingham, 1922), Herschel-Bulkley (Coussot, 1994) oder das $\mu(I)$ -Modell (Jop et al., 2006) angewendet.

Die größte Herausforderung besteht aktuell darin, die Hangrutschsimulationen, insbesondere Simulationen von realen Events, mit Labor- und Felddaten zu validieren. Insbesondere wurden folgende Wissenslücken bearbeitet:

- a) Verwendung und Verständnis der Auswirkungen realistischer Gesteinsmischungen auf die Entstehung der Wellenhöhe,
- b) Klärung geeigneter experimenteller Methoden der Rutschungsabbildung im Labor (Vibrationsmethode stellt sich als ungeeignet heraus)

c. Aufbau der Laborversuche

Im Folgenden werden die Konzeption und Durchführung von Laborversuchen zur Analyse der Gleitkinematik granularer Rutschmassen adressiert. Zunächst wird ein neu entwickelter Versuchsaufbau zur Analyse vibrationsinduzierter Rutschungen dargestellt und auf seine Eignung hin getestet. Des Weiteren werden weiterführende Versuchsreihen zur Analyse des Einflusses der Kornform und -größe auf die Gleitkinematik erläutert.

i. Vibrationsinduzierte Rutschungen

Die Versuche wurden im Langwellenkanal des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau am Standort Marienwerder des Forschungszentrums Küste (FZK), Hannover, durchgeführt. Der Langwellenkanal ist 80 m lang, 4 m breit und 1,20 m tief. Die Böschung wurde durch eine 2,0 m breite und 4,0 m lange Rampe aus Holz dargestellt, welche an einem Ende des Wellenkanals installiert wurde. Auf der Böschung wurde ein Granulat mit weitgestufter Körnungsverteilung platziert, wobei die Korngrößen farbkodiert sind. Die Böschung wurde durch innere Reibung und Bodenreibung gehalten, wobei diese Reibungsansätze in den geplanten Versuchen variiert werden konnten. Shaker, die Vibrationen mit variabler Intensität erzeugen, initiierten die Rutschung. Hochgeschwindigkeitskameras mit einem referenzierten Bildausschnitt dokumentieren den Rutschungsprozess quantitativ und ermöglichen eine räumlich-zeitliche Analyse der Desintegration der Rutschungsmasse. Die Anordnung des Versuchsaufbaus vor einer gläsernen Wand des Wellenkanals ermöglicht die Beobachtung der Wellengenerierung durch das Eintreten der Rutschmasse in den Wasserkörper. Diese Beobachtungen werden ebenfalls durch Hochgeschwindigkeitskameras unterstützt. Zusätzlich wurden Wellenpegel genutzt, um die Wellenausbreitung im Nah- und Fernfeld zu analysieren. Abbildung 1 und Abbildung 2 zeigen Skizzen des Versuchsaufbaus.

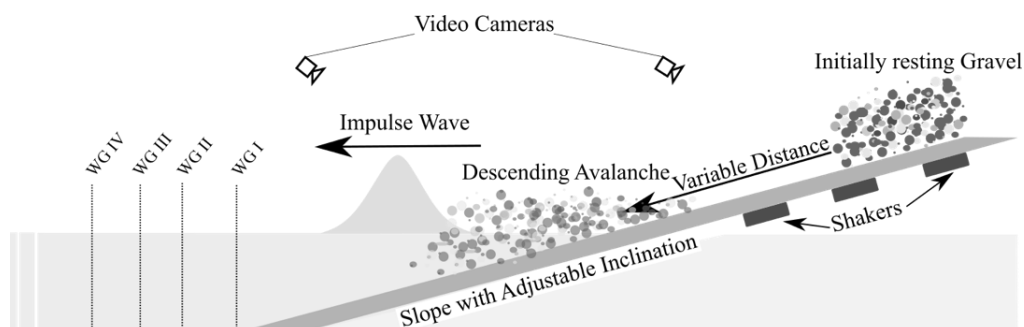


Abbildung 1: Skizze des 2D Versuchsaufbaus für vibrationsinduzierte Rutschungen

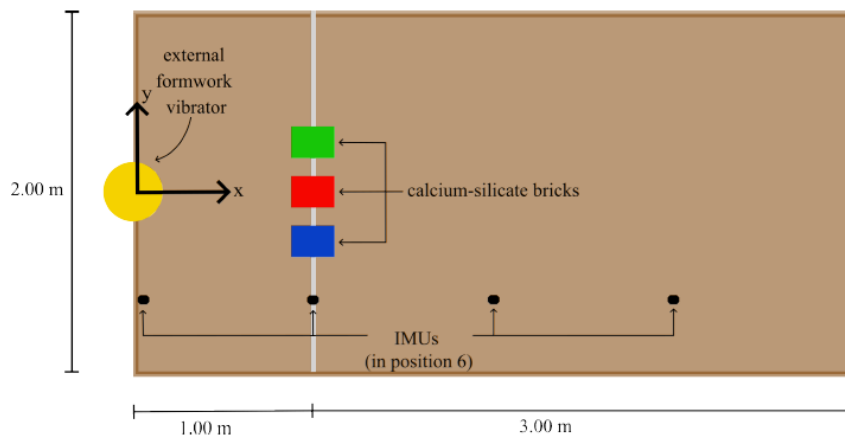


Abbildung 2: Schematische Skizze des Testaufbaus am Beispiel der IMU-Konfiguration 6, Draufsicht

Die Durchführung systematischer Experimente erfolgt sowohl mit Einzelsteinen als auch mit Steingruppen. Dabei werden Messdaten von Beschleunigungssensoren und Hochgeschwindigkeitskameras analysiert. Der Fokus liegt auf der Untersuchung und Bewertung des Auslösemechanismus zur Indizierung einer Rutschung sowie der Materialbewegung auf der Böschung. Als Material wurden Kalziumsilikat-Steine (herkömmliche Ziegelsteine) mit einem Griffloch und 250 mm in der Länge, 175 mm Breite und 113 mm Höhe verwendet. Die Masse eines Ziegels beträgt 7,8 kg und die Rohdichteklasse beträgt 1,8 kg/dm³. Die Ziegel sind in den Farben rot, blau und grün eingefärbt, um die Datenverarbeitung und Analyse zu erleichtern. Folgende Parameter wurden in der Testserie variiert:

- Anzahl der Steine,
- Ausrichtung der Ziegelsteine, d.h. horizontal oder vertikal,
- Abstand, d.h. 0 cm, 5 cm oder 10 cm Abstand zwischen jedem Ziegelstein.

Insgesamt wurden 15 Konfigurationen mit 1 bis 9 Steinen in verschiedenen Ausgangslagen getestet.

ii. Weiterentwicklung 2D Versuchsstand

Die weitere Versuchsdurchführung erfolgte in einem Wellenkanal in der Versuchshalle des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau in Braunschweig. Der Wellenkanal hat die Dimensionen 10 m Länge, 0,3 m Breite und 0,38 m Tiefe. Am Ende des Kanals befand sich eine schräge Holzrampe mit einem Neigungswinkel von 30°. Für einen fließenden Übergang von der Rampe zur Rinne wurde ein gewölbtes Metallblech angebracht. Das Koordinatensystem wurde so gewählt, dass der Übergang von Blech zu Boden den Punkt $x = 0$ m darstellt. Die horizontale Komponente wird hierbei als x bezeichnet. Die Verwendung eines Absorbers am Ende der Rinne wurde bewusst vermieden, da die Messungen beim Erreichen des Rinnenendes durch die erste Welle gestoppt wurden. Auf der geneigten Platte wurden zwei vertikale Tore eingebaut. Das vordere Tor, verbunden mit einem Gewicht von 15,29 kg (vgl. Abbildung 3), befand sich bei $x = -0,59$ m. Im geschlossenen Zustand lag das untere Ende des Tores bei $z = 0,3$ m, wobei z die vertikale Komponente ist. Ein Stift wurde angebracht, der das obere Ende des Tors fixiert. Durch das Entfernen des Stiftes öffnete sich das Tor mit einer Geschwindigkeit von ca. 0,7 m/s. Das zweite vertikale Tor wurde in Abhängigkeit vom Volumen der Rutschung so platziert, dass der Abstand zwischen beiden Toren entlang der schrägen Platte entweder 21,6 cm oder 30,55 cm betrug.

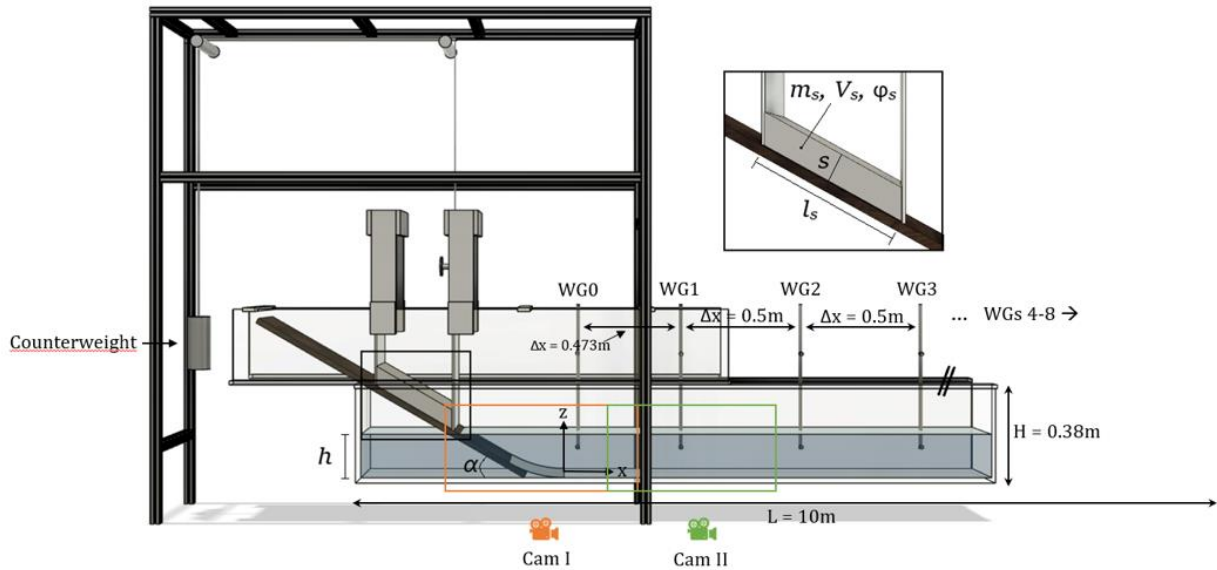


Abbildung 3: Skizze des erweiterten 2D Versuchsstands (WG: Wave Gauge (Wellenmesspegel), Δx : Distanz zwischen WGs, H, L : Kanalabmessungen, h : Wasserstand, α : Rampenneigung, l_s, s : Maße Rutschungskörper, m_s : Rutschungsmasse, V_s : Rutschungsvolumen, φ_s : Dichte Rutschungsmaterial)

Für die Datenerfassung wurden neun kapazitive Wellenpegel verwendet, wovon der erste bei $x = 0,027$ m platziert wurde. Alle folgenden Pegel wurden im Abstand von 50 cm angebracht. Die Datenerfassung mit den Pegeln erfolgte mit 100 Hz. Zwei High-Speed Kameras vom Typ Basler acA1300-200um wurden seitlich der Rinne mit einem Abstand $y = 0,81$ m angebracht. Beide Kameras hatten eine Auflösung von 1280×1024 Pixeln und wurden mit einer Bildrate von 120 bzw. 140 fps verwendet. Kamera 1 nimmt dabei den Bereich auf, indem die Rutschungsmasse den Ruhewasserspiegel durchstößt und die Welle entsteht (Kameraposition in x -Richtung: $x = -0,38$ m). Kamera 2 ist so platziert, dass das Ende der Rutschung und im Bild ist ($x = 0,23$ m).

Um die Datenerfassung zu synchronisieren ist der Stift, welcher das Tor fixiert, mit einem Signalgenerator verbunden. Wird der Stift gezogen, wird ein Triggersignal generiert, welches die Datenerfassung der Kameras und der Wellenpegel aktiviert. Die Wellenpegel haben über $t = 10$ s aufgezeichnet, die Kameras über $t = 8$ s, um die Datenmenge zu minimieren.

Da es das Ziel der ersten Testreihe war, den Einfluss scharfkantiger Materialien auf die Wellenerzeugung und -ausbreitung zu untersuchen, wurde Granitsplitt in vier verschiedenen Korngrößen als Rutschungsmaterial gewählt. Die Dichte des Materials beträgt $2,7 \text{ g/cm}^3$ und es wurden Rutschungsmassen $m_s = 5 \text{ kg}$ und 10 kg (od. rel. Masse $M = 0,42$ und $0,83$) getestet. Vergleichshalber wurden außerdem rundkantiger Kies und ideal runde Glaskugeln mit jeweils einer Partikelgröße getestet. Insgesamt ergab die Kombination von Material, Korngröße und Rutschungsmasse 12 Konfigurationen, welche jeweils mit 3 Wiederholungen getestet wurden. Die Parametervariationen können Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Parametervariationen der Versuche zum Einfluss des Materials und der Korngröße (Breite der Rutschung $b_s = 0,3 \text{ m}$, Dichte von Wasser $\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$)

Material	Durchmesser d_M [mm]	Wassertiefe h [m]	Rel. Rutschungsmasse $M = m_s / (\rho_w b_s h^2)$ [-]	Wiederholungen
Granitsplitt	7, 12, 16, 24	0,2	0,42; 0,83	3, 10 ($d_M = 24 \text{ mm}$)
Kies	12	0,2	0,42; 0,83	3
Glaskugeln	12	0,2	0,42; 0,83	3

In einer zweiten Versuchsreihe wurde der Einfluss signifikant größerer Steine auf die Gleitkinematik und die Wellenerzeugung untersucht. Dazu wurden 17 möglichst rechteckige Steine (ebenfalls Granitsplitt) mit einer Masse von 0,5 kg (Abweichungen < 7%) ausgewählt. Getestet wurden Rutschungen mit einem Anteil größerer Steine von 25 M.-%, 50 M.-% und 75 M.-% an der Gesamtmasse. Dabei wurden die größeren Steine sowohl am unteren als auch am oberen Ende der Rutschung positioniert. Als Füllmaterial wurde Granitsplitt mit $d_M = 16$ mm verwendet. Die variierten Parameter sind Tabelle 2 zu entnehmen.

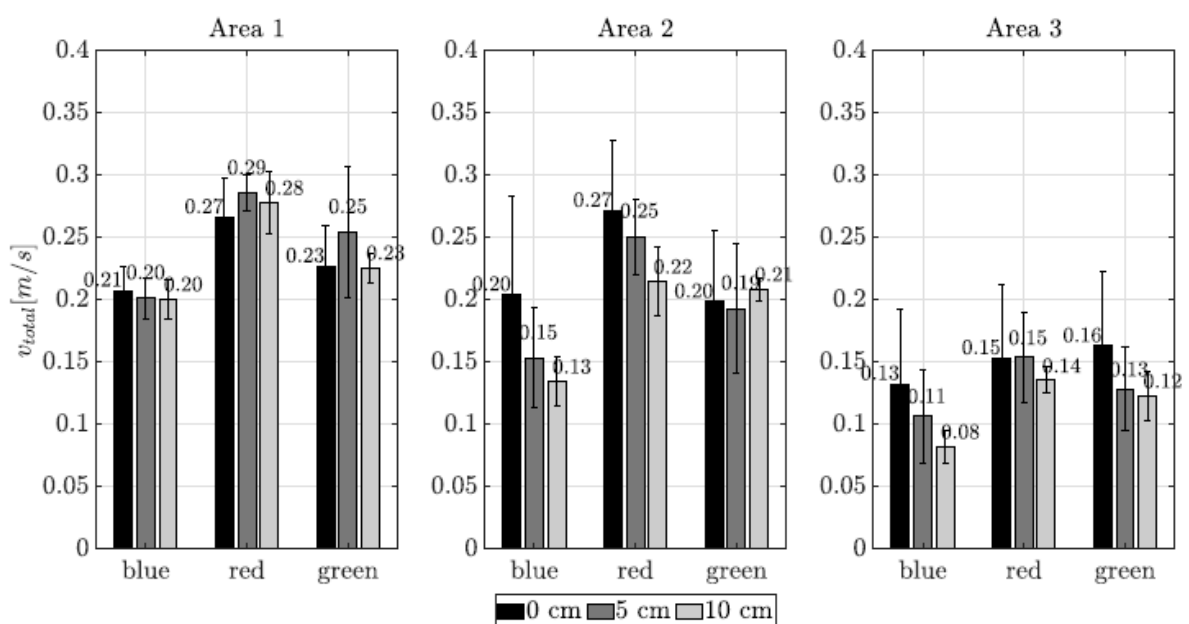
Tabelle 2: Parametervariationen der Versuche mit signifikant größeren Steinen (Breite der Rutschung $b_s = 0,3$ m, Dichte von Wasser $\rho_w = 1$ g/cm³)

Anteil gr. Steine [M.-%]	Position	Rel. Rutschungsmasse $M = m_s/(\rho_w b_s h^2)$ [-]	Wassertiefe h [m]	Wiederholungen
25 M.-%	vorne, hinten	0,83	0,2	5
50%	vorne	0,83	0,2	5
75%	vorne, hinten	0,83	0,2	5

d. Ergebnisse der Laborversuche

Vibrationsinduzierte Rutschungen

Die Auswertung der Versuchsdaten ergab, dass sich die Bewegung der Steine in Längsrichtung zunehmend verlangsamte (Abbildung 4). In einigen Fällen kam es zum vollständigen Stillstand der Steine, bevor sie das Rampenende erreicht hatten. Dies ist auf die Konstruktion zurückzuführen, da die Vibrationserzeuger durch die geringe Neigung der Rampe nur im oberen und mittleren Teil der Rampe angebracht werden konnten. Außerdem wurde beobachtet, dass die Steine zu Bewegungsbeginn einen starken Rechtsdrall entwickeln, welcher sich aber nach kurzer Zeit (ca. 10 s) wieder einstellte (Abbildung 5). Diese unterschiedliche Vibrationsdynamik der Rampe bezüglich der linken und rechten Seite kann auf eine unregelmäßige Vibrationsgenerierung durch den Formwork-Vibrator zurückzuführen sein, der oben auf der Rampe installiert ist und möglicherweise unausgeglichen ist. Eine andere mögliche Ursache für dieses Verhalten sind Unsicherheiten hinsichtlich der Installation der Rampe. Generell fällt auf, dass das Vibrationsmuster nicht einheitlich reproduziert werden konnte.



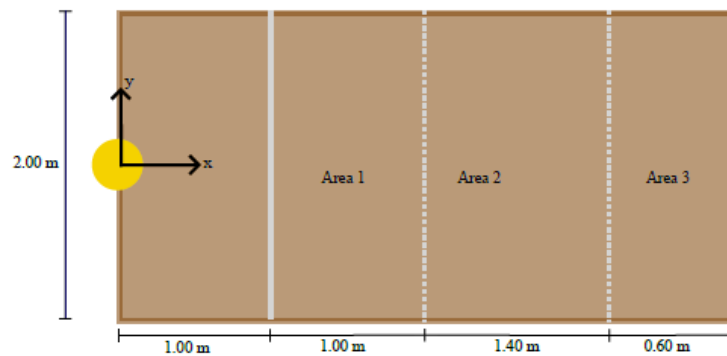


Abbildung 4: oben: Mittelwerte von v_{total} für zunehmende Abstände zwischen den einzelnen Steinen, wie durch die Grautöne angegeben, unten: Segmentierung der Rampe in drei Bereiche mit individuellen Gleiteigenschaften

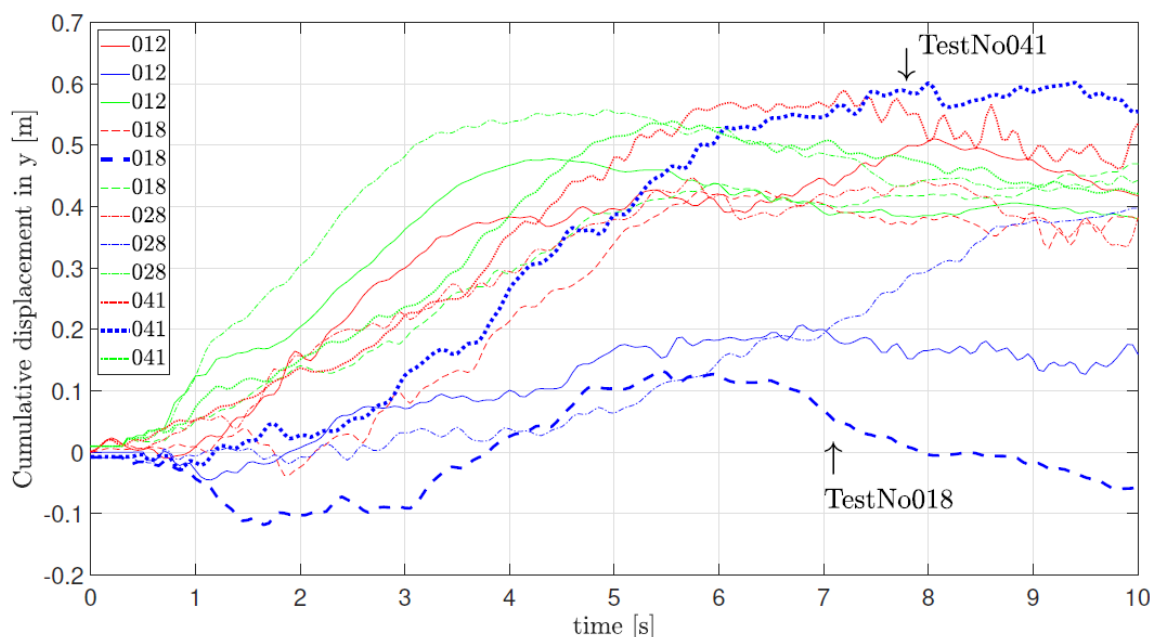


Abbildung 5: Kumulative Verschiebung in y-Richtung für STR ID 6

Da der Zweck des Versuchsaufbaus darin bestand, Tsunamiwellen zu erzeugen, war es notwendig, dass die Wechselwirkung zwischen Rutschungsmaterial und Wasser nicht ungleichmäßig über die Rampe verteilt auftraten. Dies kann die Ausbreitungsrichtung der erzeugten Tsunamiwellen im Kanal beeinflussen und zu Randeffekten aufgrund der Nähe zur Wand des Wellenkanals führen, was zu einer größeren Abweichung der praktischen Laborversuche von realen Ereignissen führen würde.

Der neu entwickelte Versuchsaufbau ist somit in der angewendeten Form nicht für die Modellierung tsunamigener Hangrutschungen geeignet, da die induzierten Schwingungen ungleichmäßig sind und nicht ausreichen, um die notwendige Rutschgeschwindigkeit zu erzeugen. Daraufhin wurde auf die Durchführung von 3D Experimenten verzichtet, da diese in der bis zu dieser entwickelten Verfahrensstufe keinen signifikanten Vorteil ggü. 2D Experimenten erwarten ließen. Weiterführende Untersuchungen oder erweiterte Shaker-Technologie vermag ggf. in zukünftigen Anordnungen jedoch realistischere Ergebnisse erzielen; dies konnte aufgrund der begrenzten budgetären Ausstattung innerhalb der Projektlaufzeit nicht realisiert werden. 2D Experimente bieten Vorteile durch systematische sowie kontrollierbare und reproduzierbare Ergebnisse. Aus diesem Grund wurde der 2D Versuchsstand fortlaufend optimiert (siehe Absatz c) ii).

Einfluss unterschiedlicher Korngrößen und Materialien

Die Laborversuche mit dem weiterentwickelten Versuchsstand wurden hinsichtlich des Einflusses der Rutschungsmaterialien Granitsplitt, Flussskies und Glaskugeln untersucht. Außerdem wurde der Einfluss unterschiedlicher Korngrößen des Granitsplitts analysiert.

In Abbildung 6 ist die Ausbreitung der relativen Wasserstandsänderung an den Wellenpegeln 0, 4 und 8 dargestellt. Es ist zu beobachten, dass die maximale Auslenkung der ersten Welle mit zunehmender Distanz abnimmt und die Welle flacher wird. Die zeitlich folgenden Wellen, welche am ersten Pegel kaum auszumachen sind, werden mit zunehmendem Abstand größer.

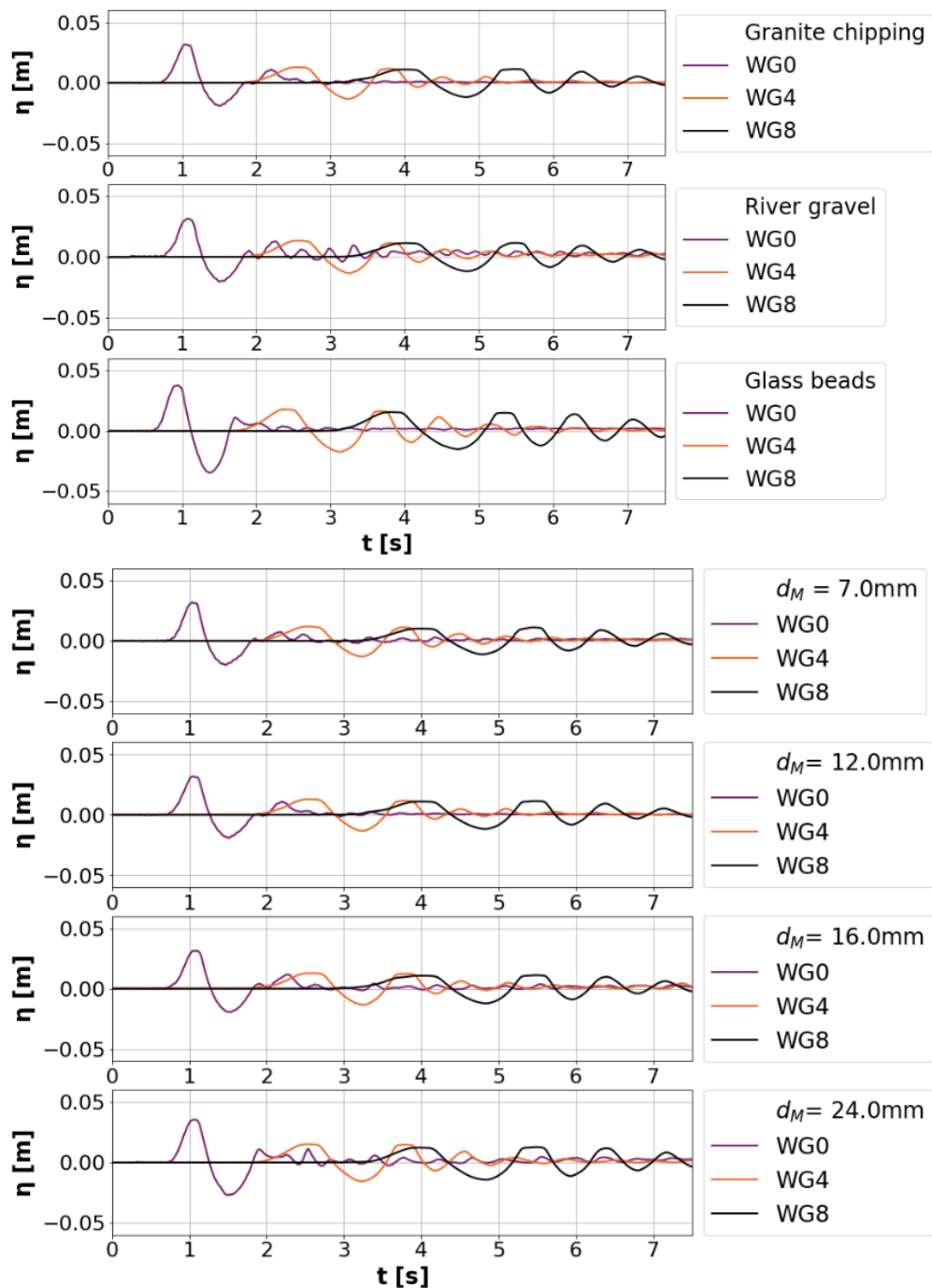


Abbildung 6: oben: Ausbreitung der Wasserstandsänderung η über die Zeit an WGs 0, 4 und 8, Vergleich repräsentativer Tests für jedes getestete Material ($d_M = 12\text{ mm}$, $M = 0,42$), unten: Ausbreitung der Wasserstandsänderung η über die Zeit an WGs 0, 4 und 8, Vergleich von repräsentativen Tests jeder getesteten Korngröße (Granitsplitt, $M = 0,42$)

Im oberen Diagramm in Abbildung 6 ist zu erkennen, dass sich die durch Glaskugeln erzeugte Welle deutlich von den von Kies und Granitsplitt erzeugten Wellen unterscheidet, insbesondere hinsichtlich maximaler Auslenkung und Steilheit. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Korngrößen sind deutlich geringer, sie unterscheiden sich v.a. hinsichtlich maximaler Auslenkung (Abbildung 6 unten).

Es ist zu erkennen, dass die maximale Wellenhöhe zunimmt, je größer der Splitt ist, wobei diese Beobachtung nicht für den ersten Wellenpegel gilt. Im Gegensatz zu den Pegeln 2 bis 7 befindet sich Pegel 1 im Bereich der finalen Ausbreitung des Rutschungsmaterials, sodass die Aufzeichnung an diesem Pegel durch die individuell unterschiedlichen Rutschungen gekennzeichnet ist und starke Abweichungen der einzelnen Tests gleicher Konfigurationen erwartet werden.

Bezüglich der unterschiedlichen Materialien wurde festgestellt, dass die Glaskugeln deutlich höhere und steilere Wellen erzeugen als Granitsplitt und Flussskies, welche sich wiederum nicht signifikant bzgl. Wellenhöhe und -ausbreitung unterscheiden. Da die Reibung zwischen den einzelnen Kugeln und zwischen Material und Rampe bei den Glaskugeln sehr gering ist, treffen diese mit einer höheren Geschwindigkeit auf die Wasseroberfläche. Diese größere Bewegungsenergie wird u.a. in Wellenenergie transformiert, sodass die Wellenhöhe größer ist als bei den Materialien mit rauerer Oberfläche. Abbildung 7 verdeutlicht dies und zeigt außerdem, dass das Verhalten für beide Rutschungsmassen ähnlich ist.

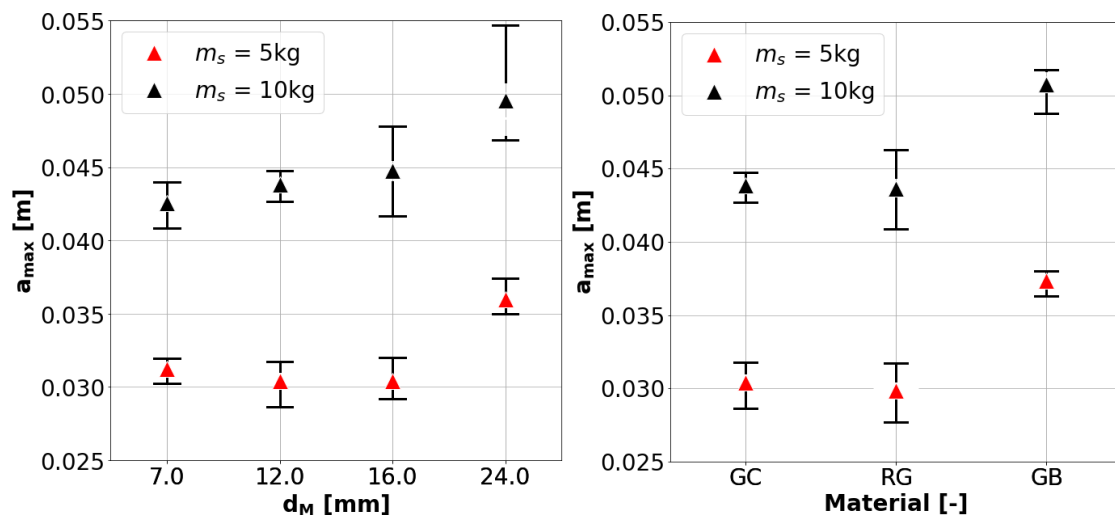


Abbildung 7: Mittelwerte der maximalen Wellenamplitude a_{max} . Links: Vergleich verschiedener Korngrößen des Granitsplitts, rechts: Vergleich verschiedener Rutschungsmaterialien mit $d_M = 12.0$ mm. Rote Symbole markieren Rutschungen mit $m_s = 5$ kg, schwarze Symbole markieren Rutschungen mit $m_s = 10$ kg. Horizontale Striche reichen vom ersten Quartil bis zum dritten Quartil.

Abbildung 8 zeigt die Froude Zahl der Rutschungsmasse zum Zeitpunkt des Eintretens in die Wasseroberfläche, vergleichend für die verschiedenen Korngrößen und Materialien und die beiden relativen Rutschungsmassen. Während die unterschiedlichen Korngrößen nur geringfügige Abweichungen aufweisen, ist zu beobachten, dass die Glaskugeln eine signifikant höhere Geschwindigkeit erreichen, als Granitsplitt und Kies gleicher Korngröße. Dies ist im Einklang mit den Beobachtungen aus den vorherigen Abschnitten und erklärt die steilere Wellenform in Abbildung 6.

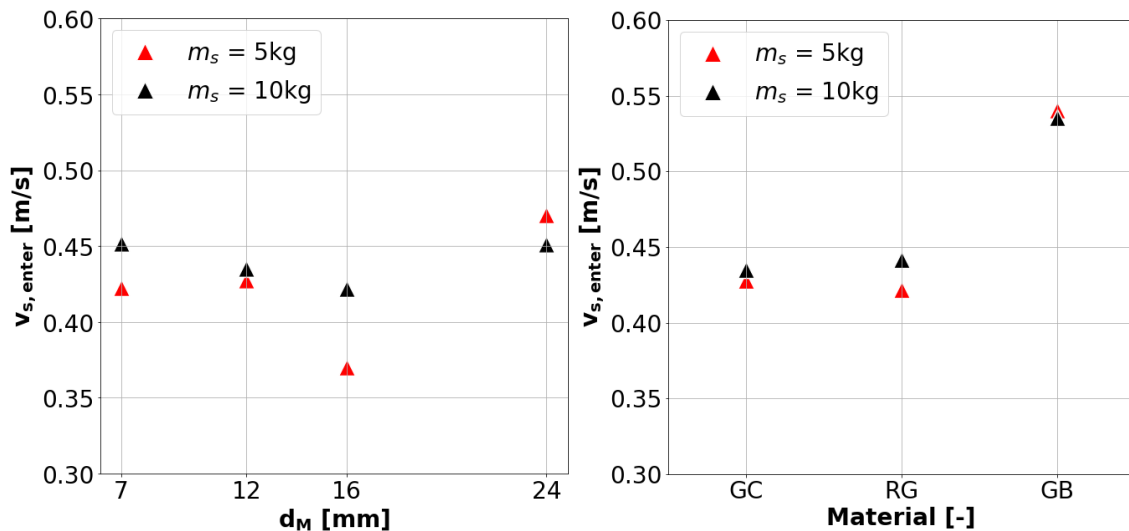


Abbildung 8: Boxplots der Froude Zahl der Rutschung (Slide Froude number) bei Eintritt in die Wasseroberfläche Fr_{enter} . Links: Vergleich verschiedener Korngrößen, rechts: Vergleich verschiedener Rutschungsmaterialien, oben: $M = 0,42$, unten: $M = 0,83$. Rote Quadrate markieren einzelne Messungen. Boxplots reichen vom ersten Quartil bis zum dritten Quartil; die weiße Linie bezeichnet den Median.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Versuche zu verschiedenen Rutschungsmaterialien ergaben, dass scharfkantiges Material Wellen mit signifikant kleineren Amplituden erzeugt, als ideal-glattes, kugelförmiges Material. Im Vergleich mit glattkantigem, aber ähnlich rauem Material ergaben sich keine signifikanten Unterschiede in der Wellenerzeugung und Ausbreitung. Es ist daher anzunehmen, dass bisherige Untersuchungen zu tsunamigenen Hangrutschungen mit Glaskugeln oder ähnlichen glatten, kugelförmigen Materialien die erzeugten maximale Wellenhöhe und die Geschwindigkeit der Rutschung überschätzen.

Bezüglich der Korngröße lässt sich feststellen, dass bei größeren Rutschungsmassen gröberes Material zu höheren Wellenamplituden führt, allerdings keine signifikanten Unterschiede in der Rutschungsgeschwindigkeit zu beobachten sind.

e. Numerische Modellierung

Modell:

Es wurde eine Datenbank möglicher Simulationswerkzeuge angelegt. Basierend auf der Datenbank wurde das Modell KRATOS Multiphysics ausgewählt, um das Kollabieren einer Vulkanflanke qualitativ zu simulieren. Aufgrund des Multiphysics-Frameworks ist das Modell in der Lage, die verschiedenen Phasen (Fluid (Wasser), Feststoff (Rutschungsmaterial), Gas (Luft)) zu modellieren. Dabei wird eine Kombination aus partikelbasiertem Ansatz und Finite Elemente Methode angewendet. An jedem Knoten wird ein 2-Schritt Geschwindigkeits-Druck Schema gelöst. Der Hangrutsch wird als rechteckige Form mit einem Volumen von $2,45 \text{ m}^3/\text{m}$ oder $4,9 \text{ m}^3/\text{m}$ modelliert, die Neigung der Rampe im Modell beträgt $26,6^\circ$ ($m = 1:2$) und die Wassertiefe beträgt $3,5 \text{ m}$ (Abbildung 9). Die Simulation ist 2D und die Hangrutschung wird vorerst im Modus Fluid-Fluid-Wechselwirkung simuliert. Dafür werden 4 beispielhafte Testfälle definiert, wobei das Rheologische Modell, das Volumen und die Schüttdichte der Rutschung variiert werden, sowie die Korngröße (s. Tabelle 3). Als Randbedingung wird die Geschwindigkeit an den starren Wänden gleich null gesetzt und die Simulationsdauer beträgt $t = 20 \text{ s}$.

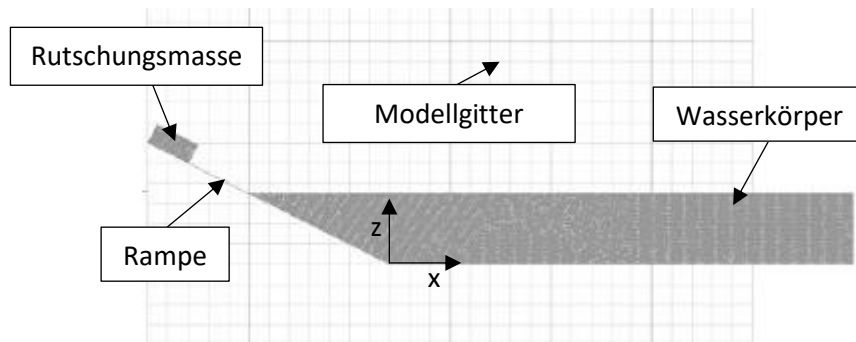


Abbildung 9: Skizze des Modellaufbaus

Tabelle 3: Eingangsparameter der Testfälle

Parameter	Einheit	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
Rheologie-Modell	--	$\mu(l)$ -Rheologie	$\mu(l)$ -Rheologie	$\mu(l)$ -Rheologie	viskoplastische Reibung
Dimension	--	2D	2D	2D	2D
Gefälle	°	26,6	26,6	26,6	26,6
Wassertiefe	m	3,5	3,5	3,5	3,5
Rutschungsvolumen	m ³ /m	2,246	4,908	4,908	4,908
Schüttdichte	kg/m ³	1920	2500	1920	2500
Dichte Wasser	kg/m ³	1000	1000	1000	1000
Korngröße	mm	12	24	12	--
Gitterweite	m	0,08	0,08	0,08	0,04

Ergebnis:

Ziel war es vorerst, das Modell hinsichtlich seiner Einsatzfähigkeit für den Anwendungsfall hangrutschinduzierte Wellenerzeugung zu bewerten. Grundsätzlich sind die Ergebnisse der Simulationen als physikalisch zu bewerten. Bei Eintauchen des Materials ins Wasser wird eine Welle erzeugt. Je höher die Dichte, desto steiler die Wellenkrone. Beim Eintreten des Materials ins Wasser wird Luft miteingeschlossen und Turbulenz erzeugt, was in Abbildung 10 zu erkennen ist.

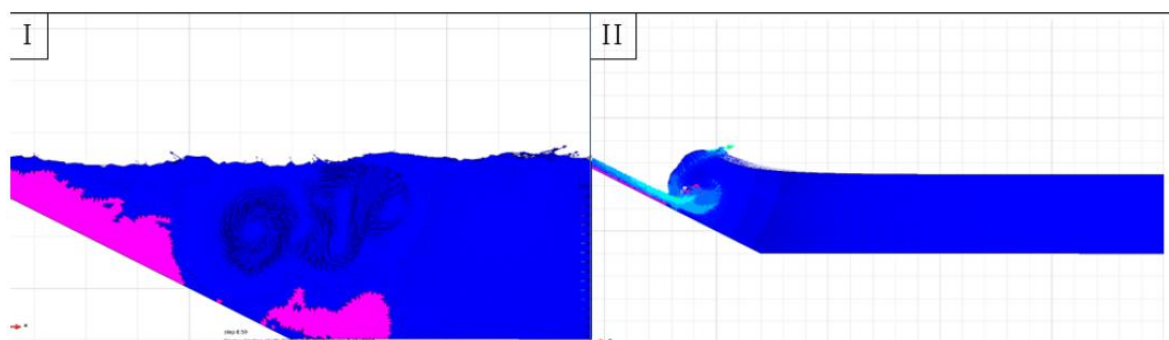


Abbildung 10: Charakteristische Turbulenz in der Spritzzone und Lufteintrag
(Strömungsgeschwindigkeit durch Vektoren gekennzeichnet)

Nachdem das Rutschungsmaterial in den Wasserkörper eingetreten ist, wurden einige Diskrepanzen beobachtet. In den Testfällen 2 und 3 entwickelten die Wellenkämme unregelmäßige Oberflächenbewegungen, wie in 5.3 zu sehen ist. Die Bewegungsentwicklung der Rutschung unter Wasser stimmt nicht mit den Erwartungen aus früheren Studien überein. Anstelle einer kontinuierlichen Bewegung des Materials entlang der Rampe bis zum Boden der Rinne ist zu beobachten, wie sich der vordere Teil der Rutschung abscheidet und sich durch das Fluid bewegt,

während das verbleibende Material noch auf der Rampe liegenbleibt. Eine mögliche Erklärung ist die Parameterwahl der Materialeigenschaften, insbesondere des $\mu(I)$ -Rheologie-Modells. In der Simulation, in der viskoplastische Reibung als Rheologisches Modell gewählt wurde, kann eine kontinuierlichere Rutschung beobachtet werden. Die Rechenzeit für die grobe Gitterweite betrug weniger als 24 h, für die feinere Gitterweite etwa 52 h.

Eine Weiterentwicklung des Modells ist erforderlich, um die Gleitkinematik und Wellenerzeugung zu optimieren und die Ergebnisse zu quantifizieren. Außerdem ist eine umfangreiche Validierung mit Versuchsdaten notwendig.

f. Zusammenfassung und Ausblick

Das Projekt TSUNAMI_RISK hat das Ziel, die Vorsorge, Frühwarnung und Schadensminderung von hangrutschinduzierten Tsunamis zu verbessern. Im Arbeitspaket 330 wurden tsunamigene Hangrutschungen mittels physikalischer Modelle und numerischer Simulationen analysiert. Hierzu wurde auf Basis einer umfangreichen Analyse früherer Publikationen 2D Laborversuche konzipiert, welche die Entstehung der Welle adressierten. Es folgte die Durchführung systematischer Experimente mit Einzelsteinen und Steingruppen. Aufgrund der ungleichmäßigen und unzureichenden Schwingungen, die nicht ausreichten, um die erforderliche Rutschgeschwindigkeit zu erzeugen, erwies sich der neu entwickelte Versuchsaufbau in seiner aktuellen Form als ungeeignet für die Modellierung von hangrutschinduzierten Tsunamis. Daraufhin wurde der Versuchsaufbau optimiert und systematische Experimente zum Einfluss von Korngröße und Materialform (scharfkantig vs. Rundkantig vs. kugelförmig) auf Gleitkinematik und Wellenerzeugung durchgeführt. Diese Laborversuche ergaben, dass scharfkantiges Material im Vergleich zu ideal-glattem, kugelförmigen Material signifikant kleinere Wellenamplituden erzeugt. Im Vergleich mit glattem, aber ähnlich rauem Material ergaben sich keine signifikanten Unterschiede in der Wellenerzeugung und Ausbreitung. Um die Ergebnisse der Laborversuche zukünftig auch auf den Naturmaßstab zu übertragen, werden Daten zu Bathymetrie, Wasserständen und Gesteinsparameter von gefährdeten Standorten benötigt. Parallel wurde ein numerisches Modell mit der Software KRATOS Multiphysics aufgebaut und verschiedene Parametervariationen in Simulationen getestet. Die Software zeigte vielversprechende Ergebnisse, jedoch sind eine Weiterentwicklung des Modells und eine umfangreiche Validierung mit Daten aus Laborversuchen und Feldmessungen erforderlich. Insbesondere sind Untersuchungen hinsichtlich eines geeigneten rheologischen Modells für die Simulation der granularen Phase notwendig.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind dem separaten Dokument zu entnehmen.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die fachliche Notwendigkeit liegt darin begründet, dass die Vorhersage von tsunamigenen Hangrutschungen und Vulkanausbrüchen nach wie vor von großer Bedeutung sind, um in betroffenen Regionen die Auswirkungen der Naturkatastrophen auf die Gesellschaft zu vermindern.

Die Grundlage für das Arbeitspaket 330 lieferte eine detaillierte Analyse des aktuellen Wissensstands, woraus sich die Voraussetzungen für die Entwicklung der physikalischen Versuche ergab. Darüber hinaus wurden durch die Modellversuche im Rahmen des Arbeitspakets 330 das Verständnis von Interaktionen zwischen Hangrutschung und Welle vertieft und wichtige Erkenntnisse für die Wellenausbreitung erzielt. Diese Informationen sind essentiell, um die Vorhersagbarkeit und Frühwarnung solcher Ereignisse zu verbessern und der lokalen Gesellschaft eine Anpassung an diese zu ermöglichen.

4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die in Teilarbeitspaket 330 geleistete Arbeit stellt einen wichtigen Beitrag zum Verständnis hangrutschinduzierter Tsunamis da. Es wurden wichtige Erkenntnisse in Bezug auf die numerische Simulation dieser Ereignisse erlangt, die die Grundlage für weiterführende Forschungsarbeit bilden. Die Ergebnisse werden in Veröffentlichungen dargestellt.

5. Während der Durchführung bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit wurde fortlaufend zu Publikationen recherchiert, die für das Vorhaben relevant sind. Diese Erkenntnisse sind in der Analyse des aktuellen Wissensstands in Abschnitt 1 b) dargestellt.

6. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Eine Publikation in einem Peer-Review Journal unter folgendem vorläufigen Arbeitstitel ist in Vorbereitung: Physical modelling of landslide-induced tsunami waves.

Literaturverzeichnis

- Ancey, C. (2007). Plasticity and geophysical flows: A review. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 142(1-3), 4–35. <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2006.05.005>
- Bingham, E. C. (1922). *Fluidity And Plasticity*. McGraw-Hill Book Company, Inc. <https://archive.org/details/fluidityandplast007721mbp/page/n13/mode/2up>
- Coussot, P. (1994). Steady, laminar, flow of concentrated mud suspensions in open channel. *Journal of Hydraulic Research*, 32(4), 535–559. <https://doi.org/10.1080/00221686.1994.9728354>
- Di Risio, M., Girolamo, P. de, Bellotti, G., Panizzo, A., Aristodemo, F., Molfetta, M. G. & Petrillo, A. F. (2009). Landslide-generated tsunamis runup at the coast of a conical island: New physical model experiments. *Journal of Geophysical Research*, 114(C1). <https://doi.org/10.1029/2008JC004858>
- Enet, F. & Grilli, S. T. (2007). Experimental Study of Tsunami Generation by Three-Dimensional Rigid Underwater Landslides. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 133(6), 442–454. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2007\)133:6\(442\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2007)133:6(442))
- Evers, F. M., Hager, W. H. & Boes, R. (2019). Spatial Impulse Wave Generation and Propagation. Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000331784>
- Fritz, H. M., Mohammed, F. & Yoo, J. (2009). Lituya Bay Landslide Impact Generated Mega-Tsunami 50th Anniversary. *Pure and Applied Geophysics*, 166(1-2), 153–175. <https://doi.org/10.1007/s00024-008-0435-4>
- Ghobarah, A., Saatcioglu, M. & Nistor, I. (2006). The impact of the 26 December 2004 earthquake and tsunami on structures and infrastructure. *Engineering Structures*, 28(2), 312–326. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.09.028>

- Heller, V. & Hager, W. H. (2010). Impulse Product Parameter in Landslide Generated Impulse Waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 136(3), 145–155. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000037](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000037)
- Heller, V. & Hager, W. (2014). A Universal Parameter to Predict Subaerial Landslide Tsunamis? *Journal of Marine Science and Engineering*, 2(2), 400–412. <https://doi.org/10.3390/jmse2020400>
- Iverson, R. M. & Vallance, J. W. (2001). New views of granular mass flows. *Geology*, 29(2), 115. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<0115:NVOGMF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0115:NVOGMF>2.0.CO;2)
- Jop, P., Forterre, Y. & Pouliquen, O. (2006). A constitutive law for dense granular flows. *Nature*, 441(7094), 727–730. <https://doi.org/10.1038/nature04801>
- Lindstrøm, E. K. (2016). Waves generated by subaerial slides with various porosities. *Coastal Engineering*, 116, 170–179. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.07.001>
- Mohammed, F. & Fritz, H. M. (2010). Experiments on Tsunamis Generated by 3D Granular Landslides. In D. C. Mosher, R. C. Shipp, L. Moscardelli, J. D. Chaytor, C. D. P. Baxter, H. J. Lee & R. Urgeles (Hrsg.), *Submarine Mass Movements and Their Consequences* (S. 705–718). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3071-9_57
- Mohammed, F. & Fritz, H. M. (2012). Physical modeling of tsunamis generated by three-dimensional deformable granular landslides. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C11). <https://doi.org/10.1029/2011JC007850>
- Mulligan, R. P., Take, W. A. & Bullard, G. K. (2019). Non-Hydrostatic Modeling of Waves Generated by Landslides with Different Mobility. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(8), 266. <https://doi.org/10.3390/jmse7080266>
- Panizzo, A., Girolamo, P. de & Petaccia, A. (2005). Forecasting impulse waves generated by subaerial landslides. *Journal of Geophysical Research*, 110(C12). <https://doi.org/10.1029/2004JC002778>
- Robbe-Saule, M., Morize, C [C.], Henaff, R., Bertho, Y., Sauret, A [A.] & Gondret, P [P.] (2021). Experimental investigation of tsunami waves generated by granular collapse into water. *Journal of Fluid Mechanics*, 907, Artikel A11, F04012.
- Sarlin, W., Morize, C [Cyprien], Sauret, A [Alban] & Gondret, P [Philippe] (2021). Nonlinear regimes of tsunami waves generated by a granular collapse. *Journal of Fluid Mechanics*, 919. <https://doi.org/10.1017/jfm.2021.400>
- Tang, G., Lu, L., Teng, Y., Zhang, Z. & Xie, Z. (2018). Impulse waves generated by subaerial landslides of combined block mass and granular material. *Coastal Engineering*, 141, 68–85. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.09.003>
- Viroulet, S., Sauret, A [Alban] & Kimmoun, O. (2014). Tsunami generated by a granular collapse down a rough inclined plane. *EPL (Europhysics Letters)*, 105(3), 34004.
- Yavari-Ramshe, S. & Ataie-Ashtiani, B. (2016). Numerical modeling of subaerial and submarine landslide-generated tsunami waves—recent advances and future challenges. *Landslides*, 13(6), 1325–1368. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0734-2>



Teil II Eingehende Darstellung

Förderkennzeichen: 03G0906D

Zuwendungsempfänger: Krisen- und Katastrophenforschungsstelle (KFS) der Freien Universität Berlin (FUB) Projektleitung: Prof. Dr. Martin Voss

Verbundprojekt: Client-II TsunamiRisk: Durch Vulkane und Hangrutschungen induzierte Tsunamis

Vorhaben: Wissenskulturen und Praktiken des Katastrophenrisikomanagements in Indonesien

Laufzeit: 01.03.2021 – 29.02.2024

Berichtszeitraum: 01.03.2021 – 29.02.2024

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03G0906D gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen / den Autoren.

1. Erzielte Ergebnisse und Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Das Teilvorhaben „Wissenskulturen und Praktiken des Katastrophenrisikomanagements in Indonesien“ wurde seitens der Krisen- und Katastrophenforschungsstelle (KFS) der Freien Universität Berlin (FUB) durch Dr. Isabelle Desportes unter der Leitung von Prof. Dr. Martin Voss bearbeitet. Die bewilligte Förderung erstreckte sich auf drei Hauptbereiche: Personalmittel, Mittel für Dienstreisen und Sachmittel (einschließlich der Vergabe zweier Werkverträge und Mittel zur Einladung einer indonesischen Gastwissenschaftlerin zum Abschlussworkshop). Die Ressourcen sind im Detail in den beigefügten Formularen aufgeführt. Die im weiteren Verlauf beschriebenen Ergebnisse wurden fachgerecht erzielt und verwertet. Im Rahmen aller Arbeitspakete, für die die KFS zuständig war bzw. in die sie zentral einbezogen war (AP410 mit AP410.1 zum Nexus zu Katastrophen und Kultur und AP410.2 zur Anschlussfähigkeit geowissenschaftlicher Forschung; AP420; AP510), konnten alle Arbeitsziele und definierten vorhabenbezogene Meilensteine (VBMS) erzielt werden:

- VBMS-410-01: Entwurf Interviewleitfaden für Interviews mit geowissenschaftlichen Fachleuten – dies wurde nach Plan vor dem 12. Fördermonat erreicht.
- VBMS-410-02: Forschungsbericht „Katastrophe und Kultur Indonesien“ (Entwurfssfassung zur Diskussion) – dies wurde nach Plan vor dem 18. Fördermonat erreicht.
- VBMS-410-03: Diskussionspapier „Wissensproduktion und Anwendung: Geowissenschaftliche Forschung, praktische Anschlussfähigkeit und Handlungsoptionen“ – dies wurde nach Plan vor dem 33. Fördermonat erreicht.

- VMBS-410-04: Politikempfehlungen zur Steigerung der gesellschaftlichen Resilienz (KFS mit Beiträgen von allen) – dies wurde nach Plan vor dem 36. Fördermonat erreicht.

Im Forschungsantrag wurde Arbeitspaket 410.2 als auf Arbeitspaket 410.1 aufbauend beschrieben. Tatsächlich sind beide Arbeitspakete eng verzahnt. Der konzeptionelle Ansatz der *Katastrophen*Kultur* wurde ausgearbeitet und im Rahmen des Teilvorhabens auf vier Schlüsselebenen angewendet:

1. Auf theoretischer Ebene
2. Auf (sub-)nationaler Ebene: anhand soziohistorisch geformter *Katastrophen*Kulturen* in Indonesien
3. Auf lokaler Ebene: anhand der Fallstudie Banten
4. Auf Forschungsprojektebene: anhand der Multiplizität von *Katastrophen*Kulturen*, die in und um das Forschungsprojekt TsunamiRisk zu verorten sind.

1.1 Arbeitspaket 410.1

Gegenstand des AP410.1 war die Analyse soziokultureller Aspekte, welche für die Stärkung eines effektiven integrierten und systemischen Katastrophenrisikomanagements von tragender Relevanz sind. Ziel war dabei, einen systematischen Überblick über den derzeitigen Forschungs- und Praxisstand zur kulturspezifischen Architektur des Schutzes der Menschen in Indonesien (*Katastrophen*Kultur*), die die soziokulturellen Aspekte des Umgangs mit und des Managements von (sozial-)raumspezifischen Katastrophenrisiken und Gefahren prägt, zu erlangen. Die Betrachtung von Katastrophenschutzstrukturen bzw. -kulturen erfolgte entlang des Verständnisses, dass sie historisch gewachsene Antworten auf spezifische Wahrnehmungen von Risiken und Gefahren vor dem Hintergrund kultureller Normen und Werte, (wahrgenommener) Vulnerabilitäten sowie in Relation zu distribuierenden Ressourcen abbilden. Diese grundlegenden Bedingungen geben Aufschluss über die gesellschaftlichen Handlungslogiken, die dem Management und Umgang mit multiplen Risiken, insbesondere mit Blick auf Erdbeben und Tsunamis aber auch unter Berücksichtigung weiterer, bislang weniger häufig auftretender Gefahren wie beispielsweise Pandemien, unterliegen.

- Methodologisches Vorgehen: Literaturrecherche, Interviews, Fokusgruppendifkussionen und Workshops

Nach der Auftaktveranstaltung (März 2021) und einem Onlineaustausch zu den Erwartungen und Arbeitsgrundlagen zwischen TsunamiRisk und den indonesischen PartnerInnen (April 2021) wurden zunächst ein Überblick über den aktuellen Stand der Forschung erstellt, bestehende für das Teilvorhaben relevante Ansätze identifiziert und die Ergebnisse in einer intensiven Literaturrecherche gesammelt. Zum Ende des Forschungsprojektes umfasste die Literaturdatenbank 446 Einträge in Englisch, Deutsch und Indonesisch (Bahasa Indonesia). Neben akademischer Literatur wurden auch Berichte von Katastrophenschutzorganisationen sowie Policy Dokumente analysiert, z. B. die Presidential Regulation 24/2007, die die Basis für den gegenwärtigen Katastrophenschutz in Indonesien darstellt und die Presidential Regulation 93/2019, die die institutionellen Rollen im Katastrophenschutz darlegt. Die Literaturrecherche bestand aus drei Teilen, mit besonderem Fokus auf der theoretisch-konzeptionellen, nationalen Ebene (Indonesien und das Tsunami-Warnsystem) und auf der lokalen Ebene (Fallstudie Banten).

Die Arbeit an den Teilen 2 und 3 erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem Indonesischen Staatsbürger Willy Wicaksono, der im Rahmen eines Werkvertrages von der KFS eingestellt wurde. Seine Hauptverantwortungen waren die Durchführung eines Stakeholder-Mapping und die Analyse nicht-englischsprachiger Literatur zum Thema *Katastrophen*Kultur* in Indonesien. Der Werkvertragsnehmer war neben einem qualifizierenden Masterstudium im Fach Katastrophenmanagement (Universitas Indonesia) an der indonesischen Katastrophenschutzbehörde

BNPB tätig. Aufgrund seiner Sprach-, Institutionen-, Orts- und Kulturkenntnisse erwies er sich als qualifizierte und äußerst vernetzte Person für diesen Werkvertrag, die nicht nur über Einblicke in formelle Prozesse verfügte, sondern auch über gegenwärtige Strukturänderungsbestrebungen und informelle Unterstützungsakteure.

Zusätzlich zur Literaturrecherche wurden Interviews und Fokusgruppendifkussionen geführt, um die Analyseergebnisse kritisch zu reflektieren, zu erweitern, weiter zu kontextualisieren und Bedarfe herauszuarbeiten. Die Projektmitarbeiterin Isabelle Desportes führte insgesamt 16 Interviews mit indonesischen GeowissenschaftlerInnen; zwei mit GeowissenschaftlerInnen, die dem TsunamiRisk Projekt angehören; und sieben mit MitarbeiterInnen der relevantesten Katastrophenschutz-institutionen: BIG (Indonesische Agentur für Geoinformation), BMKG (Meteorologie- und Geophysikbehörde, an der das Tsunamiwarnzentrum angesiedelt ist), BNPB (Nationale Behörde für Katastrophenmanagement, die für die Vorbereitung und Durchführung geeigneter Maßnahmen auf Grundlage der eingegangenen Warnungen zuständig ist) und PVMBG (Vulkanologiebehörde). Weitere Interviews und Fokusgruppendifkussionen wurden von MasterstudentInnen geführt, die in das Teilvorhaben eingebunden waren und von der KFS co-betreut wurden. Luzia Schleip, Studentin an der FUB und studentische Hilfskraft an der KFS, führte u. a. selbstständig 11 Interviews mit TsunamiRisk-Mitgliedern durch und dokumentierte Workshop 2 mit (siehe unten). Willy Wicaksono, Student an der Universitas Indonesia, führte Interviews und Fokusgruppendifkussionen mit 37 KüstenbewohnerInnen (darunter jene, die in zivilgesellschaftlichen Gruppen wie der Seerettungsgruppe der Balawista aktiv sind) und mit 35 PraxisakteurInnen in der Provinz Banten, die beispielsweise im Anak Kratau-Observationsposten oder in der Bezirksverwaltung Labuan tätig sind. Insgesamt flossen informelle Austausche und Aussagen von mehr als 130 StudienteilnehmerInnen, z. B. aus Interviews, Workshops, Vorträgen, in die Studie ein. Die Interviews mit indonesischen WissenschaftlerInnen, TsunamiRisk-WissenschaftlerInnen, indonesischen PraxisakteurInnen und anderen relevanten AkteurInnen umfassten folgende Schritte: Leitfadenerstellung und Pre-Test, Akquise der InterviewpartnerInnen (insbesondere die Teilnahme an der United Nations Global Platform for Disaster Risk Reduction im Juni 2022 war von Bedeutung), Durchführung der Interviews teilweise mit Dolmetscher (hier wurde ein Werkvertrag mit Rafi Ronny, einem Masterstudenten an der Universitas Indonesia, abgeschlossen), Transkription der Audiodateien sowie Transkriptanalysen mithilfe von MaxQDA.

Wie in der Tabelle 1 zusammengefasst, war die KFS federführend in die Konzeption und Organisation der Workshops 1, 2 und 3 involviert und intensiv in die Organisation von Workshop 4 (bei dem das Technische Hilfswerk die Hauptkoordination übernahm) und Workshop 5 (für die Abschlussveranstaltung, bei der das GFZ die Hauptkoordination übernahm) einbezogen. Die nachfolgenden Beschreibungen zu den einzelnen Arbeitsschritten berücksichtigen die pandemiebedingten, gegenüber der Antragsstellung leicht angepassten Anforderungen. Daher entsprechen die Themenschwerpunkte der Workshops nur teilweise der Struktur des Antrags und können sowohl AP410.1 und AP41.2 betreffen (insbesondere im Workshop 3, der hier unter 1.2 „Arbeitspaket 410.2“ eingehend beschrieben wird). Die Organisation der Workshops umfasste folgende Schritte: Inhaltliche und methodische Vorbereitung, organisatorische Vorbereitung (Raum, Catering, Einladungen), Ergebnisdokumentation und Nachbereitung.

AP	Endgültiger Titel	Teilnehmende	Durchführende PartnerInnen	Durchführungsdatum und Ort
410.1	Workshop 1: „Disaster*cultures, actors, structures, and challenges in Indonesia“	Indonesische SozialwissenschaftlerInnen, inkl. NachwuchswissenschaftlerInnen	KFS in Zusammenarbeit mit der Universitas Indonesia	07.06.2022, Universitas Indonesia, Jakarta
410.2	Workshop 2: „STS-Perspektive: Sozialwissenschaften und Geowissenschaften, zur Praxisrelevanz geowissenschaftlichen Wissens“	TsunamiRisk-KollegInnen, hauptsächlich GeowissenschaftlerInnen	KFS	31.03.2022, GFZ, Potsdam
410.1 und 410.2	Workshop 3: „Disaster*risk cultures and the science-policy interface“	TsunamiRisk und indonesische Sozial- und GeowissenschaftlerInnen inkl. NachwuchswissenschaftlerInnen, MitarbeiterInnen von Katastrophenschutzbehörden (u. a. BMKG und BNPB)	KFS in Zusammenarbeit mit der National Research and Innovation Agency (BRIN)	17.11.2022, BRIN, Jakarta
420	Workshop 4: „SWOT-Analyse“	TsunamiRisk und indonesische Sozial- und GeowissenschaftlerInnen inkl. NachwuchswissenschaftlerInnen, MitarbeiterInnen von nationalen (u. a. BMKG und BNPB) und internationalen (u. a. UNESCO-IOC) Katastrophenschutzbehörden	THW in Zusammenarbeit mit KFS, GFZ und BRIN	18.11.2022, BRIN, Jakarta
510	Workshop 5: „Abschlussveranstaltung“	TsunamiRisk und indonesische Sozial- und GeowissenschaftlerInnen, BMKG und BMBF	KFS, GFZ, BRIN	19.-20.02.2024, GFZ, Potsdam

Tabelle 1: Übersicht thematischer Workshops in den AP410, 420 und 510

Der von der KFS organisierte Workshop 1 „Disaster*cultures, actors, structures, and challenges in Indonesia“ diente der Validierung und Ergänzung der Ergebnisse der AP410-Literaturrecherche. Die KFS präsentierte dabei ihren theoretischen Ansatz eines epistemologischen Zugangs zu *Katastrophen*Kultur* und PartnerInnen von der National Research and Innovation Agency (BRIN) ihren „Risk Culture“-Ansatz sowie Ergebnisse ihrer Feldforschung in Palu. Zwei durch die KFS und die Universitas Indonesia moderierte partizipative Aktivitäten fokussierten ganz gezielt (i) die soziohistorisch geformten *Katastrophen*kulturen* in Indonesien sowie die (ii) Institutionen und Bedarfe des Tsunamiwarnsystems in Indonesien. Durch eine von der KFS graphisch aufbereitete Zeitleiste (siehe Abbildung 1) konnten soziohistorisch bedeutende Ereignisse und Dynamiken (wie etwa politische, ökologische und sozioökonomische Faktoren, Konflikte, Katastrophen oder internationale Trends im Katastrophenschutz) vorgestellt und von den Teilnehmenden mit Beispielen oder zusätzlichen Ereignissen und Dynamiken ergänzt werden. Ein „Stakeholder-Mapping“ diente der Identifikation von Akteuren und Prozessen im Zusammenhang mit multiplen und eskalierenden Gefahren, insbesondere nicht-seismisch induzierter Tsunamis, unter Berücksichtigung weiterer Risiken und Gefahren wie beispielsweise von Pandemien. Die Ergebnisse des Stakeholder-Mappings wurden graphisch präsentiert und von den WorkshopteilnehmerInnen ergänzt.



Abbildung 1: Partizipative Aktivität, Workshop 1 in Jakarta (Wicaksono, 2022)

Im Workshop 3 „*Disaster*risk cultures and the science-policy interface*“ wurden u. a. die sozialwissenschaftlichen Zwischenergebnisse präsentiert und diskutiert, um eine passgenaue und kulturell angemessene Ausrichtung der geowissenschaftlichen Forschung sowie eine effektive Vermittlung der Ergebnisse zu gewährleisten. Das Morgenprogramm zielte darauf ab, epistemologische *Katastrophen*Kulturen* zu identifizieren, die im Kontext des TsunamiRisk-Projekts relevant sind. In einer ersten Aktivität wurden die geographischen und sprachlichen Aspekte von *Katastrophen*Kulturen* herausgearbeitet. Die TeilnehmerInnen wurden gebeten, sich im Raum entsprechend ihrer Herkunftsregion zu positionieren und folgende Fragen zu reflektieren: Gibt es Besonderheiten bezüglich Katastrophen oder Risikowahrnehmung, die Sie über Ihre Herkunftsregion teilen möchten? Gibt es Ihrer Kenntnis nach einen Begriff im Zusammenhang mit Katastrophen/Risiken, der ausschließlich in Ihrer Sprache existiert? Die TeilnehmerInnen aus Chile, den Vereinigten Staaten, Deutschland, Frankreich, Indonesien und Japan teilten hier ihre Erfahrungen. Nach fachlichen Präsentationen und anschließender Diskussion (darunter „Risk cultures and the 2018 tsunami in Palu“ durch Gusti Ayu Ketut Surtiari und „Beyond geography: multiple applications of the *disaster*culture* concept“ von Isabelle Desportes) wurden die TeilnehmerInnen in einer nächsten partizipativen Aktivität gebeten, sich einer ‚Fachdisziplingruppe‘ zuzuordnen und anhand von sechs Fragen (siehe

Abbildung 2) ihre „Gebrauchsanleitung“ herauszuarbeiten. Fünf Fachdisziplingruppen wurden gebildet: „coastal engineering“; „social sciences“; „remote sensing“; „social psychology“; „geology“ und „oceanography“. Diese Aktivität verfolgte das Ziel, zum einen fachspezifische *Katastrophen*Kulturen* herauszuarbeiten und zum anderen die Zusammenarbeit innerhalb des TsunamiRisk-Projekts und zwischen den indonesischen PartnerInnen zu fördern.

Activity block #2



1. What is a key measurement unit for your group and why?
2. What is your favourite research tool and why?
3. Explain one key concept which other tables might not know.
4. Which specific words do you use when communicating with a non-scientific audience?
5. What is a disaster from your point of view?
6. What do you mean by risk?
7. Who are 'tsunami scientists'?

Abbildung 2: Leitfragen für Workshop-TeilnehmerInnen für die Entwicklung von „Gebrauchsanleitungen“ in ihrer Disziplin (Desportes, 2022)

Am Nachmittag stand die Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Politik verstärkt im Fokus. Nach Vorträgen von Irina Rafliana („Travelling knowledge: A tsunami science historiography“) und Isabelle Desportes („Research leading to action? Pitfalls and promises from the literature and first results from the TsunamiRisk project“) wurden TeilnehmerInnen, die sich innerhalb des TsunamiRisk-Projekts und/oder ihrer eigenen Forschung mit denselben Forschungsschwerpunkt beschäftigen, gebeten, folgende Fragen zu reflektieren (siehe Abbildung 3): (i) Wie gehen Sie mit nicht-seismisch ausgelösten Tsunamis um? (ii) Wie beabsichtigen Sie, dies für die Praxis noch nützlicher zu gestalten? (iii) Wie beabsichtigen Sie, dies für PraktikerInnen benutzerfreundlicher zu machen? (iv) Mit welchen Einschränkungen und Herausforderungen haben Sie zu kämpfen, wenn Sie dies tun? (v) Wie können die anderen Fachdisziplinengruppen Sie in diesem Prozess unterstützen (konkrete Beispiele, z. B. Erstellung einer Karte, Bereitstellung von Daten, Vermittlung von Ergebnissen an eine bestimmte Zielgruppe)? (vi) Was könnte andere Akteure daran hindern, sie so zu unterstützen, wie sie es benötigen? Diese Gruppenarbeit diente der besseren Abstimmung der Forschung mit Bedarfen aus der Praxis.



Abbildung 3: Partizipative Aktivität, Workshop 3 in Jakarta (Desportes, 2022)

Übersicht der Ergebnisse auf theoretisch konzeptioneller Ebene

Im ersten Teil der Literaturrecherche wurden bestehende Studien zu Katastrophen und Kultur im Bereich der „disaster studies“ ausgewertet. Die Schlüsselfragen, die in der ersten Phase beantwortet wurden, werden in Box 1 aufgelistet:

- Was sind die Hauptmerkmale und -erkenntnisse der Literatur, die den Zusammenhang zwischen Katastrophen und Kultur thematisiert?
- Welche Desiderate und Forschungslücken lassen sich anhand der bestehenden Literatur feststellen?
- Was können uns andere Disziplinen über Kultur und somit über den Nexus von Katastrophen und Kultur lehren?
- Welches *Katastrophen*Kultur*-Rahmenkonzept erfolgt daraus?

Box 1: Schlüsselfragen auf theoretisch-konzeptioneller Ebene

Folgende Desiderate wurden festgestellt: einerseits stellen die Studien nur vereinzelte Hinweise auf tiefgründigere soziale und diskursive Prozesse bereit, die „Kultur“ ausmachen (z. B. Weltanschauungen, Werte und Deutungsmuster); andererseits sind die Studien oft durch einen anthropozentrischen, westlichen und positivistischen Blickwinkel geprägt, der mit vielfältigen Annahmen bezüglich z. B. der Mensch-Natur-Differenzierung einhergeht. Um diesem Trend entgegenzuwirken, wurden theoretische Ansätze zum Kulturbegriff aus den Sozial- und Kulturwissenschaften, sowie Erkenntnisse zu Wissenskulturen und epistemischer Ungleichheit (im Kontext der „decolonial studies“) herangezogen, um davon ausgehend das Rahmenkonzept der *Katastrophen*Kultur* zu entwickeln.

Die Resultate wurden im siebten Projektmonat mit den indonesischen sozialwissenschaftlichen PartnerInnen besprochen und in einem Bericht von ca. 20 Seiten festgehalten. Diese Ergebnisse werden derzeit für eine akademische Publikation mit dem Titel „Towards an epistemological understanding of *disaster*culture*“ ausgearbeitet (Voss und Desportes, in Bearbeitung). Zusätzlich veröffentlichte Voss (2022) in der Zeitschrift „Aus Politik und Zeitgeschichte“ (APuZ) einen Artikel mit dem Titel „Institutionelles Risikomanagement“, in dem verschiedene Risikokonzepte im europäischen Kontext erörtert und Grundsätze eines *Katastrophen*Kulturansatzes* erläutert werden. Demnach werden Risiken als „Produkt einer Kulturgeschichte“ betrachtet: „[w]as wir als Risiko wahrnehmen, ist nicht einfach gegeben, sondern hängt davon ab, wie wir uns selbst und die Welt an sich erfahren und interpretieren“ (Voss 2022, S. 19). Darüber hinaus wird in einem Buchkapitel mit dem Titel „Theories of power: Disaster paradigms and what they aim to stifle“ (Desportes, in Druck) untersucht, wie Katastrophenparadigmen bestimmte Maßnahmen und Akteure (z. B. IngenieurInnen oder PriesterInnen und andere geistliche FührerInnen) in den Vorder- bzw. Hintergrund stellen. Das Kapitel stützt sich insbesondere auf indonesische Beispiele, die zeigen, wie verschiedene erkenntnistheoretische Ansätze in einem Kontext koexistieren und welche wechselseitigen Auswirkungen die zu Paradigmen gehörenden Diskurse auf Machtdynamiken und Katastrophenprävention und -bewältigung haben.

Ergebnisse auf (sub)nationaler Ebene

Dieser Abschnitt beruht in Teilen auf Literaturrecherchen, die Willy Wicaksono im Rahmen eines Werkvertrags ausgeführt hat.

Im zweiten Teil der Literaturrecherche wurden anhand des erarbeiteten Rahmenkonzeptes der Fall Indonesien und das Tsunami Frühwarnsystem analysiert – Schlüsselfragen dazu befinden sich in Box 2. Dazu wurden in der Literaturrecherche Sekundärdaten (d. h. akademische Literatur und graue Literatur, wie z. B. politische Dokumente, auf Englisch aber auch indonesische Sprachen) und

Primärdaten (eigene Interviews und Workshop-Ergebnisse) ausgewertet. Erste Ergebnisse wurden während eines Workshops an der Universitas Indonesia in Jakarta im Juni 2022 validiert, korrigiert, vertieft und vervollständigt.

- Welche Merkmale von Katastrophenrisiken, Vulnerabilität und Katastrophenschutzkapazitäten gelten für Indonesien?
- Welche unterschiedlichen epistemologischen Ansätze gibt es zur Untersuchung der Beziehung zwischen den Einwohnern Indonesiens und ihrer Umwelt?
- Was sind soziokulturell und historisch gewachsene Arten, durch die das, was die Wissenschaft als „Katastrophen“ bezeichnet, in Indonesien wahrgenommen, gedacht und damit umgegangen wird? Welchen Einfluss haben diese auf das heutige Katastrophenschutzmanagement in Indonesien?
- Wie entwickeln sich die verschiedenen Katastrophen*kulturen in Indonesien und wie gehen sie ineinander über?
- Welches sind die wichtigsten Merkmale und Akteure des heutigen indonesischen Tsunami-Frühwarnsystems?
- Welche Stärken und Herausforderungen lassen insbesondere bezüglich der Frühwarnung von nicht-seismisch induzierter Tsunamis erkennen?

Box 2: Schlüsselfragen auf indonesischer Ebene

Die Ergebnisse wurden im Forschungsbericht „A multiplicity of socio-historically grown *disaster*cultures* in Indonesia“ zusammen mit einer 6-seitigen Executive Summary vor der gemeinsamen Indonesienreise im November 2022 an die TsunamiRisk-ProjektpartnerInnen verteilt. Später wurden sie zudem in einem 72-seitigen KFS Working Paper mit dem Titel „Indonesia and its tsunami warning system: A multiplicity of socio-historically grown *disaster*cultures*“ veröffentlicht (Desportes, Wicaksono und Voss, 2024). Abbildung 4 ist letzterem entnommen.

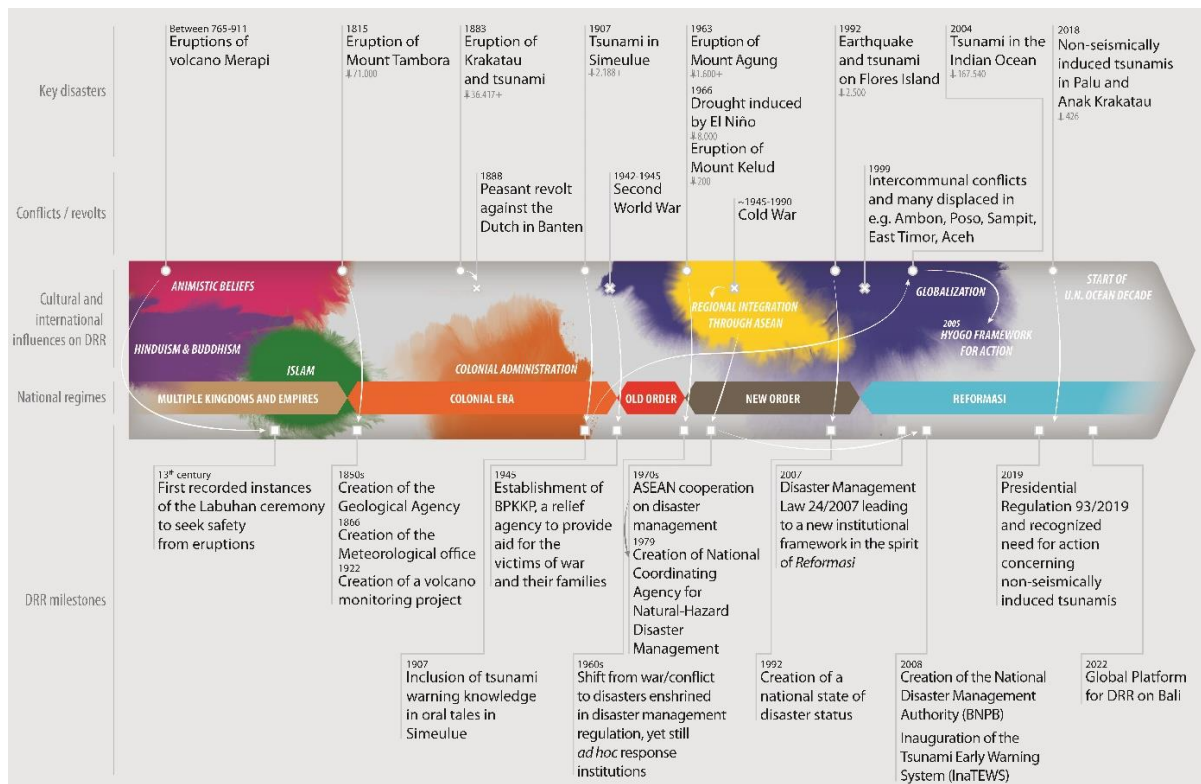


Abbildung 4: Eine Vielzahl von sozio-historisch gewachsenen *Katastrophen*Kulturen* in Indonesien (Desportes, Wicaksono und Voss, 2024, S. 14, Grafikerstellung Emmanuel Dahan)

Ergebnisse auf lokaler Ebene: Fallstudie Banten

Dieser Abschnitt beruht auf Arbeiten, die Willy Wicaksono im Rahmen seiner Masterarbeit durchgeführt hat.

Der dritte Teil der Recherche befasste sich mit der lokalen Fallstudie in Labuan, Banten, einer der am stärksten von dem durch Anak Krakatau ausgelösten Tsunami im Jahr 2018 betroffenen Provinzen. Da für diese Arbeit erneut Kenntnisse der indonesischen Sprache erforderlich waren, erfolgte sie von Willy Wicaksono, einem indonesischer Masterstudent, der von der KFS mitbetreut wurde. Die Arbeit zielte darauf ab, ein Verständnis zu lokalen *Katastrophen*Kulturen* zu entwickeln und ihre Perspektiven auf die offiziellen Tsunamiwarnpraktiken zu untersuchen. Es wurde eruiert, inwiefern verschiedene *Katastrophen*Kulturen* auf lokaler Ebene präsent sind und ineinandergreifen und inwiefern sich das Zusammenspiel mit dem Tsunami von 2018 veränderte. Primäre Datenerhebung auf lokaler Ebene war laut Antrag nicht vorgesehen, jedoch führte Willy Wicaksono im Rahmen seiner Masterarbeit Interviews und Fokusgruppendifkussionen durch und konnte so ein tieferes Verständnis der Dynamiken zwischen Katastrophe und Kultur erreichen.

Die Ergebnisse sind in einer Masterarbeit mit dem Titel „Community disaster cultures and the Indonesia tsunami warning system“ (Original auf Bahasa Indonesia, eine Übersetzung ins Englische ist intern erhältlich, Wicaksono 2023) sowie in zwei Fachpublikationen, die in Zusammenarbeit mit seinen MasterarbeitsbetreuerInnen der KFS und der Universitas Indonesia erstellt wurden zugänglich (Wicaksono, 2023; Wicaksono et al., 2024). Diese Publikationen wurden auch in AP420 (Warnketten inkl. auf lokaler Ebene) und AP430 (Fokus auf die lokale Ebene) berücksichtigt.

1.2 Arbeitspaket 410.2

Basierend auf den in Arbeitspaket 410.1 erarbeiteten Grundlagen zu indonesischen *Katastrophen*Kulturen* wurden in diesem AP Fragen zur Anschlussfähigkeit von geowissenschaftlichen Forschungsergebnissen und operativer Empfehlungen des THW für den soziokulturellen Kontext erforscht. Maßnahmen können nur dann nachhaltig zur Kapazitäts-, Effektivitäts- und Effizienzsteigerung des indonesischen Bevölkerungsschutzes beitragen, wenn sie in diese tradierten Strukturen eingebettet werden, so die zugrundeliegende These. Ziel dieses Arbeitspakets war daher die Identifikation von Herausforderungen und Potenzialen zur Integration geowissenschaftlicher Forschungsergebnisse in die Praxis.

Methodologisches Vorgehen: Literaturrecherche, Interviews, Workshops und teilnehmende Beobachtung

Arbeitspaket 410.2 befasste sich mit geowissenschaftlicher Forschung, deren Praxisrelevanz und wie diese gestärkt werden kann. Es wurde Literatur zu Themen wie Wissenskulturen, Geoforschung und Praxis, Geoethik und Science and Technology Studies gesammelt und ausgewertet. Luzia Schleip, die im Rahmen des TsunamiRisk-Projekts ihre Masterarbeit verfasste, spielte hierbei eine maßgebliche Rolle.

Um die Herausforderungen und Potentiale zur Integration geowissenschaftlicher Forschungsergebnisse in den indonesischen Kontext zu identifizieren, wurden Interviews sowohl mit deutschen als auch mit indonesischen VerbundpartnerInnen (insbesondere aus den Geowissenschaften) und AkteurInnen des indonesischen Katastrophenmanagements (insbesondere im Bereich der Tsunamifrühwarnung) geführt. Die Interviews mit deutschen und indonesischen ForschungsakteurInnen orientierten sich an sozialwissenschaftliche Ansätzen im Kontext der sogenannten Science- and Technology-Studies (STS) und untersuchten Entstehungshintergründe, Forschungslogiken sowie Kommunikationsprozesse und -probleme bezüglich geowissenschaftlichen Wissens. In den Interviews wurde aufbauend auf den zuvor

gewonnenen Erkenntnissen zur *Katastrophen*Kultur* eruiert, inwieweit geowissenschaftliches Wissen politik- und praxisanschlussfähig ist bzw. welche formellen und informellen Kriterien und Prozesse dafür ausschlaggebend sind. Die Gespräche zielten darauf ab, Herausforderungen und Barrieren sowie Lösungsoptionen zu einer effektiveren Zusammenarbeit von Wissenschaft und Praxis im indonesischen Kontext zu identifizieren. Folgende Arbeitsschritte waren notwendig: Leitfadenerstellung und Pre-Test, Akquise von InterviewpartnerInnen, Interviewführung teilweise mit Dolmetscher (Vergabe extern an einen Masterstudenten der Universitas Indonesia, Rafi Ronny), Transkription der Audiodateien und Transkriptanalysen mithilfe von MaxQDA. Die Projektmitarbeiterin Isabelle Desportes erstellte die Leitfäden, leitete den Pre-Test und führte, z.T. mit Hilfe eines im Rahmen eines Werkvertrages engagierten Dolmetschers, die Interviews der indonesischen GeowissenschaftlerInnen und PraxisakteurInnen in Jakarta, Yogyakarta, Bandung und Bandar Lampung durch. Die Interviews mit den TsunamiRisk-GeowissenschaftlerInnen wurden von der Masterstudentin Luzia Schleip geführt. Dies ermöglichte, eine angemessene Distanz, sowohl zu den KollegInnen im Projekt als auch zu den InterviewteilnehmerInnen, aufrechtzuerhalten. Die Masterstudentin benutzte dafür den im Pre-Test validierten semi-strukturierten Fragebogen der Projektmitarbeiterin, und führte zu Beginn zwei Interviews gemeinsam mit ihr durch. Parallel zur Projektbearbeiterin führte Schleip anhand von MaxQDA ihre eigene thematische Analyse durch, protokollierte und fasste zudem Ergebnisse von Workshop 2 (siehe unten) zusammen.

Aufgrund der Pandemie konnte der Workshop „STS-Perspektive: Sozialwissenschaften und Geowissenschaften, zur Praxisrelevanz geowissenschaftlichen Wissens“ erst zu Beginn des zweiten Projektjahrs (am 31.03.2022) ausschließlich mit GeowissenschaftlerInnen des TsunamiRisk-Projekts am GFZ Potsdam stattfinden. Der von der KFS konzipierte Workshop widmete sich dem Thema der praktischen Anschlussfähigkeit geowissenschaftlicher Forschung. Die Ergebnisse wurden von Luzia Schleip protokolliert und zusammengefasst. Die geowissenschaftlichen PartnerInnen wurden dazu eingeladen, auf der projektinternen Zusammenfassung ihr Feedback einzubringen. Der Workshop 2 hatte zum Ziel, Herausforderungen und Barrieren sowie Lösungsoptionen für eine effektivere Zusammenarbeit von Geowissenschaften und Praxis zu identifizieren, insbesondere im indonesischen Kontext. In einer Vorstellungsrunde sollten sich die TeilnehmerInnen zu ihren Erfahrungen bezüglich Indonesien, den TsunamiRisk-Vorprojekten GITEWS und PROTECTS, dem Kontakt mit AkteurInnen in Praxis und/oder Politik in ihrer bisherigen Laufbahn, ihrer Einordnung als Sozial- und/oder GeowissenschaftlerIn sowie der Charakterisierung ihrer Forschung als eher Grundlagenforschung, angewandte Forschung oder einer Mischung davon äußern (siehe Abbildung 5).



Abbildung 5: Eigene Einordnung im Wissenschafts-Praxis-Nexus (Schleip, 2022)

Eine weitere Aufgabe für die TeilnehmerInnen war, basierend auf ihren eigenen Erfahrungen an dem Geoscience-Policy-Interface (in vergangenen oder jetzigen Projekten), Herausforderungen, Barrieren sowie Lösungsoptionen herauszuarbeiten. Die erste Frage lautete: Welches war ein Erfolgserlebnis und was der größte Frustrationsmoment? Nachdem die Teilnehmenden ihre Antworten auf Karten geschrieben hatten, sollten sie auf weiteren Karten jeweils zu ihrem Erfolgserlebnis und ihrem

Frustrationsmoment drei Hauptfaktoren notieren. Die Fragen lauteten dann: Welche Faktoren haben das möglich gemacht? Was hat die Sache so schwierig gestaltet? Nachdem auch die Faktoren aufgeschrieben wurden, stellten die TeilnehmerInnen ihre Karten vor (siehe Abbildung 6).



Abbildung 6: Im Workshop 2 identifizierte Frustrationsfaktoren an der Science-Policy-Interface (Schleip, 2022)

Am 17.11.2022 fand in Jakarta Workshop 3 statt. Dort wurden vor TsunamiRisk-Mitwirkenden und indonesischen KollegInnen die Ergebnisse von Workshop 2 präsentiert und in deutsch-indonesischen Arbeitsgruppen vertieft (siehe eingehende Beschreibung des Nachmittagsprogramms von Workshop 2 unter 1.1).

TsunamiRisk brachte indonesische und deutsche TeilnehmerInnen aus unterschiedlichen Disziplinen, Kulturen, Sprachhintergründen und vielem mehr zusammen: Es war in mehrfacher Hinsicht „interkulturell“. Die selbstreflektierte Teilnahme an und die aktive Beobachtung von Prozessen, die Teil von TsunamiRisk und seinen PartnerInnen sind, boten eine Gelegenheit, die Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen einer Vielzahl von *Katastrophen*Kulturen* bei der Arbeit zu untersuchen. Die Schnittstelle zwischen (Geo-)Wissenschaft und Politik konnte konkret am Fallbeispiel des TsunamiRisk-Projektes untersucht werden. Alle während der projektinternen Treffen getroffenen Aussagen zum Thema geowissenschaftliche Forschungslogik und Praxisrelevanz wurden als Daten erfasst und gespeichert. Einige TsunamiRisk-WissenschaftlerInnen wurden gebeten, nach ihrem Treffen mit indonesischen PraxisakteurInnen in einem „Meeting-Protokoll“ folgende Fragen zu beantworten: (i) Was wollten Sie mit diesem Treffen erreichen? (ii) Inwiefern war es erfolgreich oder nicht erfolgreich? (iii) Was haben die Personen von Ihnen verlangt/erwartet? (iv) Glauben Sie, dass Sie diese Erwartung erfüllen können, und warum (nicht)? (v) Auf einer Skala von 1 bis 10, hatten Sie das Gefühl, dass Sie Ihre Sprache während des Treffens anpassen mussten (10 = Sie sprachen, als ob Sie mit einem anderen Spezialisten Ihres Fachgebiets sprechen würden)? Bitte begründen Sie dies; (vi) Haben Sie eine bemerkenswerte Beobachtung zu dieser Sitzung gemacht?

Zusätzlich kam es mit vereinzelt GeowissenschaftlerInnen und ProjektpartnerInnen zu informellen Diskussionen, z. B. während der gemeinsamen Forschungsreise nach Indonesien. Die von der KFS gehaltenen sozialwissenschaftlichen Vorträge an geowissenschaftlichen Universitäten (wie z. B. das geowissenschaftliche Seminar der TU Berlin, sowie Vorträge an indonesischen Partnerinstitutionen wie dem Institut Teknologi Bandung, der Universitas Gadjah Mada und der Universitas Lampung) boten Gelegenheiten zu intensivem interdisziplinären Austausch, Feedback zu ersten Forschungsergebnissen und somit zu neuen Erkenntnissen.

Ergebnisse auf Projektebene: Die Anschlussfähigkeit geowissenschaftlicher Forschung

Dieser Abschnitt beruht ebenfalls auf Arbeiten, die Luzia Schleip im Rahmen ihrer Masterarbeit durchgeführt hat.

Die Hauptergebnisse lassen sich als Antworten auf die hier genannten vier Schlüsselfragen (siehe Box 3) zusammenfassen.

- Warum ist internationale, interdisziplinäre und transdisziplinäre Forschung wichtig, wenn es um Katastrophen und insbesondere um nicht-seismisch induzierte Tsunamis geht?
- Welche Lehren lassen sich aus der Literatur und den bisherigen Erfahrungen der GeowissenschaftlerInnen von TsunamiRisk ziehen, um die Interaktion an der Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Politik zu verbessern?
- Konnten diese Lehren im Kontext von TsunamiRisk angewandt werden, was waren hinderliche und fördernde Faktoren?
- Wie haben diese Forschungslogiken und -prozesse die Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Praxis mitgestaltet?

Box 3: Schlüsselfragen auf Projektebene

Die Erkenntnisse der Literaturrecherche und der primären Datenerhebung, einschließlich der Workshops, flossen in eine Masterarbeit mit dem Titel „Practices at the Science-Policy Interface in the TsunamiRisk Projekt – A Qualitative Analysis“ (Schleip, 2024). Dabei lag der Fokus auf der Perspektive der deutschen GeowissenschaftlerInnen von TsunamiRisk. Des Weiteren wurden sie in einem Beitrag für das United Nations Office for Disaster Risk Reduction mit dem Titel „Applying a ‘cascading disasters’ research approach across silos and epistemic cultures? The challenge of warning of non-seismically induced tsunamis in Indonesia“ (Desportes, Dalimunthe, Surtiari und Reksa, 2024) integriert. Hierbei stand die Zusammenarbeit verschiedener AkteurInnen im Rahmen von TsunamiRisk, dem indonesischen Projektpendant Ina2Core sowie weiterer involvierter indonesischer WissenschaftlerInnen und PraxisakteurInnen im Fokus. Die Haupteckdaten wurden vor der Veröffentlichung während projektinterner Präsentationen vorgestellt. Die Beiträge thematisieren, warum es speziell bezüglich multipler kaskadierender Gefahren wichtig ist, Forschung international, interdisziplinär und transdisziplinär zu gestalten. Sie zeigen die damit einhergehenden Schwierigkeiten auf und geben praktische Handlungsempfehlungen, um die Zusammenarbeit zwischen GeowissenschaftlerInnen und PraxisakteurInnen zielführender zu gestalten, mit konkreten Effekten für die betroffenen KüstenbewohnerInnen.

1.3 Arbeitspaket 420

Das vom THW geleitete Arbeitspaket, in dem die KFS eine unterstützende Rolle übernahm, zielte auf die Analyse institutioneller und operationeller Aspekte des Katastrophenrisikomanagements sowie von Kommunikationsstrukturen und -prozessen in Indonesien ab, um Vorschläge zur Effektivitäts- und Resilienzsteigerung zu erarbeiten. Da das BMKG bereits mit renommierten Beratungsinstituten wie

dem GFZ und der Gempa GmbH zusammenarbeitet, zeigte die Behörde kein Interesse an einem zusätzlichen Stresstest, den das THW laut Antrag durchführen wollte. Infolgedessen wurden die geplanten Maßnahmen für den Stresstest angepasst. Eine partizipative SWOT-Analyse (Herausarbeitung der Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken des InaTEWS bezüglich nicht-seismisch induzierter Tsunamis) erschien als geeignetere Alternative, da sie eine umfassende und interdisziplinäre Bewertung des Tsunami-Risikomanagements in Zusammenarbeit mit allen Partnerorganisationen ermöglichte.

Methodologisches Vorgehen und erzielte Ergebnisse: Unterstützung bei der Workshop Vor- und Nachbereitung

Zur Vorbereitung des Workshops und basierend auf ihrer Arbeit in AP410 bereitete die KFS ihre Kenntnisse zur soziokulturellen Historie und Einbettung des indonesischen Katastrophenrisikomanagements und der Schlüsselakteure im indonesischen Tsunamiwarnprozess auf (Desportes, Wicaksono und Voss, 2024) und stellte sie dem THW zur Verfügung. Auch die Ergebnisse der im Rahmen von AP410.1 betreuten Masterarbeit, die spezifisch die Warnprozesse um den durch Anak Krakatau im Jahr 2018 ausgelösten Tsunami in Labuan betreffen, wurden in einer Publikation zusammengefasst (Wicaksono et al., 2023) und mit dem THW geteilt.

Der vom THW organisierte Workshop hatte zum Ziel, ein umfassendes Bild des Tsunami-Risikomanagements zu erstellen. Durch eine SWOT-Analyse stand insbesondere die Vorbereitung und Warnung vor nicht-seismisch induzierten Tsunamis im Rahmen des aktuellen indonesischen Tsunami-frühwarnsystems im Fokus. Die KFS beteiligte sich aktiv am Workshop und brachte ihre eigenen Forschungsergebnisse ein. Die Ergebnisse des Workshops wurden dokumentiert (siehe Abschlussbericht des Teilvorhabens des THW) und flossen in die Politikempfehlungen in AP510 ein.

1.4 Arbeitspaket 500

Ein Ziel des AP war die Beratung der geowissenschaftlichen PartnerInnen. Dazu co-editierte die KFS einen Policy Brief, welcher, basierend auf den Erkenntnissen der einzelnen Teilvorhaben im Gesamtverbund, Politikempfehlungen zur Verbesserung der Vorbereitung, Monitoring und Warnung vor nicht-seismisch induzierter Tsunamis in Indonesien umfasst und bündelt. Ein „technical supplement“ und ein „community-level supplement“ bereiten für die entsprechenden Zielgruppen zusätzliche Informationen auf. Diese Empfehlungen, die auf den Ergebnissen aller anderen praxisorientierten Arbeiten aufbauen und gemeinsam mit den indonesischen ForschungspartnerInnen verfasst wurden, fördern in pragmatischer Weise eine engere Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Warnbehörden, Zivilschutzbehörden, EntscheidungsträgerInnen und der indonesischen Bevölkerung. Der Beitrag der KFS zu diesem Bericht konzentrierte sich auf soziokulturelle Aspekte und Praxishürden, die im Zusammenspiel verschiedener Praxis-, Policy- und (Geo)wissenschaftlicher AkteurInnen eine Rolle spielen können.

Methodologisches Vorgehen und erzielte Ergebnisse: Impulse zu einem iterativen Kontakt mit indonesischen PartnerInnen und PraxisakteurInnen, Handlungsempfehlungen sowie Outputs für nichtwissenschaftliche AkteurInnen und die Abschlussveranstaltung

Über das gesamte Projekt hinweg förderte die KFS die TsunamiRisk-PartnerInnen durch Vorträge, Interviews und Workshops zur Selbstreflexion bezüglich ihres Engagements an der Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Praxis. Maßgeblich war hier die Organisation der dreitägigen Exkursion nach Banten, bei der die GeowissenschaftlerInnen von TsunamiRisk direkt mit lokalen Warn-, Katastrophenschutz und Zivilgesellschaftlichen Akteuren im Austausch treten konnten (siehe Abbildung 7). Dass die Umsetzung von Empfehlungen in die Praxis durch einen iterativen, auf

Augenhöhe geführten Kontakt (und nicht allein durch das Verfassen eines Policy Briefs zu Projektende) am besten gelingt, wurde in internen Projekttreffen betont. Durch diese Impulse sollte schon vor der Projektendphase ein verstärkter Austausch über Nationalitäten und Wissenschafts-Praxisbarrieren hinweg stattfinden. Aufgrund struktureller Faktoren (begrenzte Zeit und Ressourcen seitens der GeowissenschaftlerInnen und PraxisakteurInnen), der Pandemie sowie der Neuorganisation indonesischer Forschungseinrichtungen durch die BRIN und konkurrierender Interessen zwischen Katastrophenschutzinstitutionen konnte dies jedoch nicht immer vollumfänglich realisiert werden.



Abbildung 7: Exkursion in Banten. Direkter Austausch mit lokalen Katastrophenschutzakteuren (TsunamiRisk, 2022)

Antragsgemäß wurden die Beiträge und Empfehlungen aus den anderen Teilvorhaben im Verbund gesammelt und redaktionell in den gemeinsamen Policy Brief „Volcanic and Landslide induced Tsunamis - Policy recommendations for the way ahead“ integriert. Sowohl auf Projekt- als auch auf Teilvorhabenebene wurden indonesische PartnerInnen in den Denk- und Schreibprozess eingebunden. Der „High-level Policy Brief“ richtet sich an die oberste Entscheidungsebene und wurde so kurz wie möglich gehalten: eine Seite fasst die wichtigsten Forschungsergebnisse zusammen, drei Seiten enthalten die Handlungsempfehlungen. Zusätzlich wurden ein „technical supplement“ und ein „community-level supplement“ verfasst, die sich spezifisch an die Zielgruppen der EntscheidungsträgerInnen (implementing actors) und die Vielzahl der AkteurInnen (u. a. MitarbeiterInnen von Katastrophenschutzbehörden, gewählte Regierungsmitglieder, zivilgesellschaftliche Gruppen) auf lokaler Ebene richtet. Die KFS steuerte Inhalte zur pragmatischen Identifizierung spezifischer Kooperationslücken zwischen verschiedenen Akteuren bei, beispielsweise im Bereich des Monitorings von Gefahren, der Erstellung von Gefährdungskarten oder Datenkompatibilität (siehe Abbildung 8). Die sozialwissenschaftlichen Forschungsergebnisse leisten einen Beitrag zu der Frage, wie geowissenschaftliches Wissen, Technologien und Lösungen optimal auf die Bedarfe und Kapazitäten der beteiligten Akteure auf den relevanten Ebenen ausgerichtet werden können. Es wurde besonders darauf geachtet, dass der Fokus nicht nur auf Technologien liegt, sondern auch auf soziokulturellen Aspekten, und dass die vorgeschlagenen Lösungen nachhaltig tragbar sind. So wird neben der Klärung von Mandaten auch eine Klärung der Budgets, einschließlich der für Wartungsarbeiten an Monitoring-Technologien, empfohlen. Zusätzlich sollen KüstenbewohnerInnen nicht nur als EmpfängerInnen, sondern auch als TrägerInnen von Wissen und Erfahrung im Bereich der Tsunamivorbereitung und -warnung betrachtet werden. Hier betonen die Empfehlungen die positiven Erfahrungen indonesischer ForscherInnen im Bereich der „Inexpensive Devices for Sea Level Monitoring“ (IDSL) – eine technisch einfache und kostengünstigere Monitoringoption, die von KüstenbewohnerInnen instandgehalten werden kann, und die weniger im Fokus der TsunamiRisk Forschung war. Die gemeinsam abgestimmten Handlungsempfehlungen werden auf indonesischer Seite „weiterleben“, indem sie beispielsweise im weiteren Austausch genutzt und gezielt für verschiedene Katastrophenschutzbehörden angepasst werden oder als Grundlage für Lobbyarbeit dienen können, um die entscheidende Presidential Regulation 93/2019 für die Tsunamiwarnung und -vorbereitung zu erweitern oder zu ändern.

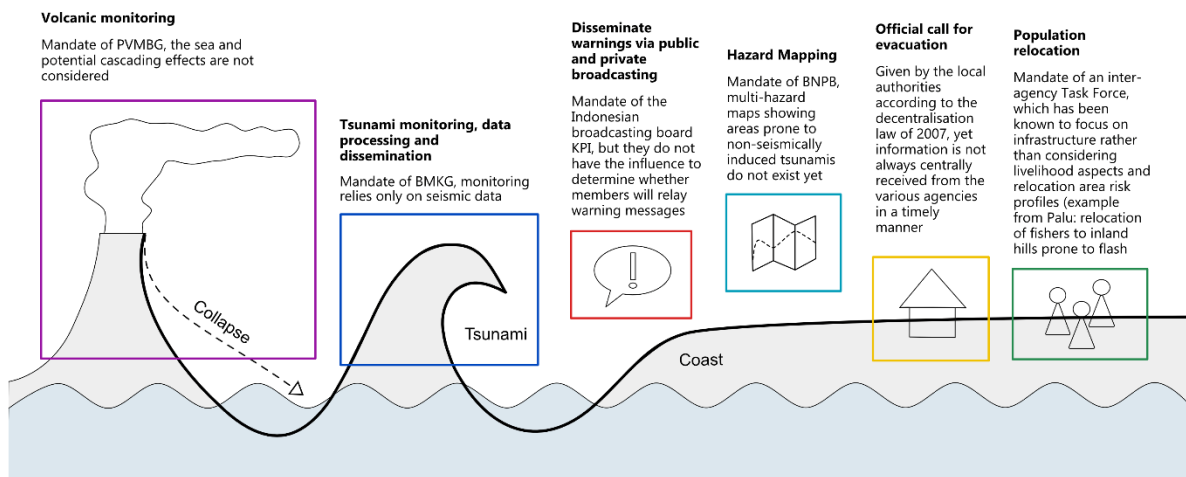


Abbildung 8: Eskalierende Gefahren vs. fragmentierte Institutionen (Desportes, Dalimunthe, Surtiari und Rekso 2024, Grafikerstellung Luzia Schleip)

Aufbauend auf den Erfahrungen des TsunamiRisk-Projekts befasst sich die Publikation „Applying a ‘cascading disasters’ research approach across silos and epistemic cultures? The challenge of warning of non-seismically induced tsunamis in Indonesia“ (Desportes, Dalimunthe, Surtiari und Rekso, 2024) auch mit der Frage, wie geowissenschaftliche Forschungsprojekte gestaltet werden können, um sicherzustellen, dass die Ergebnisse relevant sind und von den AkteurInnen in der Praxis akzeptiert und übernommen werden. Der Beitrag wird in der „Words into Action: Science – Policy- Society“ Reihe des United Nations Disaster Risk Reduction Office publiziert und somit weitere Zielgruppen in der Praxis und Forschung erreichen. Durch den Einsatz kreativer Formate wurden die Ergebnisse gezielt an die geowissenschaftlichen AkteurInnen und PraxisakteurInnen herangetragen. Zum Beispiel wurden die aufbereiteten Ergebnisse des Entwurfs des Working Papers zu „Katastrophe und Kultur in Indonesien“ sowie der wichtigsten indonesischen StakeholderInnen zusätzlich in einem sechsseitigen Executive Summary vor der Indonesienreise im November 2022 an die geowissenschaftlichen PartnerInnen gestreut, vor Ort in interaktiven Workshopsaktivitäten für die Teilnehmenden greifbar gemacht und durch Vorträge sowie durch eine von der Projektbearbeiterin und Willy Wicaksono eigens konzipierten Wanderausstellung präsentiert (siehe Abbildung 9). Die Ausstellung wurde auch an Orten gezeigt, an denen PraxisakteurInnen wenig mit sozialwissenschaftlichen Perspektiven zu Katastrophen konfrontiert sind, wie zum Beispiel an der indonesischen Behörde für Meteorologie, Klimatologie und Geophysik (BMKG), an der sich das Tsunami Warnzentrum befindet. Die Ausstellungsmaterialien befinden sich nun bei den PartnerInnen der Universitas Indonesia in Jakarta. Es wird erhofft, dass durch diese verschiedenen Maßnahmen auch ein verbessertes Verständnis zwischen Natur- und Sozialwissenschaften sowie zwischen Wissenschaft und Praxis erreicht werden konnte, was ein übergeordnetes Ziel der Arbeitspakete 410 und 510, Empfehlungen für die Praxis, darstellt.



Abbildung 94: Ein Mitarbeiter der indonesischen Katastrophenschutzbehörde BNPB vor der Wanderausstellung zu ‚disaster*culture in Indonesia‘ (Desportes, 2022)

Im Rahmen der dreitägigen Abschlussveranstaltung (Workshop 5) vom 18. bis 20. Februar 2024 am GFZ in Potsdam, an der indonesische PartnerInnen sowohl persönlich als auch online teilnahmen, lag der Schwerpunkt auf der gemeinsamen Reflexion und Finalisierung der Forschungsergebnisse und Politikempfehlungen. Am ersten Tag des Workshops wurde der Policy Brief-Anhang, der sich mit der lokalen Ebene befasst, abgestimmt. Am zweiten Tag wurden der „High-level Policy Brief“ diskutiert, wobei die KFS die Diskussionen mitmoderierte. Am dritten Tag wurden die Ergebnisse präsentiert, und in einer abschließenden Diskussion wurden Strategien zur gezielten Streuung der Handlungsempfehlungen sowie Perspektiven für zukünftige Anwendungsfelder und weiterer Zusammenarbeit erörtert. Die KFS war sowohl logistisch als auch inhaltlich an der Vorbereitung, Durchführung und Dokumentation der Abschlussveranstaltung beteiligt und präsentierte die Ergebnisse des sozialwissenschaftlichen Arbeitspakets.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Rahmen des Projekts entfielen die wesentlichen Kosten vonseiten der KFS auf Personalaufwendungen, Reiseausgaben und Sachkosten (inkl. der Vergabe von Werkverträgen). Die einzelnen Forschungsarbeiten wurden in diesem Dokument mit den erzielten fachlichen Ergebnissen veranschaulicht. Eine detaillierte Aufschlüsselung der Kosten erfolgt im Verwendungsnachweis und den entsprechenden Beleglisten.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Interesse der Bundesrepublik Deutschland an der Finanzierung des Vorhabens resultierte aus der Ausschreibung „CLIENT II - Internationale Partnerschaften für nachhaltige Innovationen“ im Rahmen des Programms „Forschung für Nachhaltige Entwicklung (FONA3)“. Das Teilvorhaben der KFS im Rahmen des Verbundprojekts TsunamiRisk wurde als universitäres Forschungsprojekt durchgeführt, wobei weitere Universitäten und PraxispartnerInnen im Bereich Tsunamiwarnung beteiligt waren. Die Realisierung der Projektaufgaben wurde ausschließlich durch die Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) ermöglicht.

Mit Ausnahme pandemiebezogener Anpassungen erfolgte die Arbeitsdurchführung gemäß dem Projektplan und wurde möglichst ressourcenschonend gestaltet. Zum Beispiel wurden mehrere geplante 10-tägige Dienstreisen nach Indonesien kombiniert, um Flugticketkosten und CO₂-Emissionen zu minimieren. Die bewilligten Mittel wurden gemäß den geplanten Positionen verwendet. Der Verlauf des Projekts entsprach im Wesentlichen der im Arbeitsplan und im Projektantrag skizzierten Planung. Aufgrund des dynamischen Verlaufs der Pandemie und des Zusammenschlusses mehrerer ProjektpartnerInnen zur neuen Einrichtung BRIN kam es zu Verzögerungen im Projektablauf, die im Verlauf der letzten beiden Projektjahre aufgeholt werden konnten.

4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Der Nutzen des Vorhabens lag entsprechend der Zielstellung in der grundlegenden Analyse der Strukturen, Prozesse und Zuständigkeiten im Falle von nicht-seismisch induzierter Tsunamis, analysiert unter Einbeziehung des soziohistorisch geformten Kontextes und multipler *Katastrophen*Kulturen*. Konkrete, wissenschaftlich begründete und in ihrer praktischen Relevanz geprüften Empfehlungen zur Weiterentwicklung des indonesischen Tsunamiwarnsystems im Kontext von multiplen eskalierenden Gefahren wurden in enger Zusammenarbeit mit den indonesischen PartnerInnen entwickelt. Durch zahlreiche Formen des Kontakts (Interviews, Workshops mit partizipativen Aktivitäten, Vorträge) mit GeowissenschaftlerInnen und KatastrophenschutzakteurInnen wurde erreicht, dass dieselben AkteurInnen die Besonderheiten und möglichen Fallstricke bezüglich *Katastrophen*Kulturen* stärker berücksichtigen. Aus diesen Gründen resultiert langfristig eine wirkungsvolle Verbesserung der Tsunamiwarnung und des Bevölkerungsschutzes, was sowohl auf nationaler als auch internationaler Ebene einen humanitären und volkswirtschaftlichen Nutzen mit sich bringt. Dies umfasst nicht nur die Reduktion von Sachschäden und Todesfällen, sondern auch die Verringerung sekundärer und tertiärer Schäden. Diese Aspekte führen zu Kosteneinsparungen durch eine optimierte Bewältigung von Krisen und Katastrophen sowie deren gesellschaftlichen Auswirkungen.

Durch die im Teilvorhaben durchgeführte Meta-Forschungsanalyse und durch das Nachgehen der Frage, wie wissenschaftliches Wissen im behördlichen Katastrophenrisikomanagement in die Praxis umgesetzt wird, konnten konkrete Empfehlungen für die effektive Durchführung internationaler, interdisziplinärer und transdisziplinärer Forschung erarbeitet werden.

Zusätzlich trug das Projekt zur Weiterentwicklung der Grundlagenforschung im Bereich des Nexus von Katastrophe und Kultur bei. Dies geschah insbesondere durch die Integration epistemologischer Ansätze zur Kultur in den Sozial- und Kulturwissenschaften sowie der Science and Technology Studies in die Katastrophenforschung. Auf diese Weise konnte das Teilprojekt dazu beitragen, die zu Beginn des Projekts identifizierten Forschungslücken anzugehen.

Letztendlich flossen die Erkenntnisse des Projekts auch in die Lehre der Freien Universität Berlin und anderer Universitäten ein, u. a. im geowissenschaftlichen Kolloquium der Technischen Universität Berlin (Februar 2023, Vortrag der Projektbearbeiterin zu „Social Sciences Approaching Disaster and Geo-Scientific Research: The Case of TsunamiRisk and the Indonesian Tsunami Warning System“) und in der Ringvorlesung „Natural Hazards, Vulnerability and Disasters: Interdisciplinary Perspectives“ am Institut für Geografie und Regionalforschung der Universität Wien (im März 2023, Vorlesung der Projektbearbeiterin zu „Disaster Paradigms and what they aim to Stifle“).

5. Während der Durchführung bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Da sich das Projekt auf eine Naturgefahr und Themenfelder konzentrierte, die auch international weitreichend in der wissenschaftlichen Gemeinschaft und in Katastrophenschutzbehörden diskutiert

wurden, wurde stets bestrebt, neue Erkenntnisse und Fortschritte zu berücksichtigen. Das Projekt nahm daher in Indonesien und international an relevanten Veranstaltungen teil. Hierzu gehörten unter anderem Vorträge und Diskussionen in den folgenden Konferenzpanels sowie Veranstaltungen, die an indonesischen Universitäten organisiert wurden:

- Das University of the City of London Warning Research Centre Launch Event in April 2021;
- Die United Nations Global Platform for Disaster Risk Reduction im Juni 2022, an der die Projektmitarbeiterin als Teil der deutschen Delegation teilnahm;
- Ein Seminar am Institut Teknologi Bandung im Dezember 2022, hier präsentierte die Projektmitarbeiterin zu „TsunamiRisk and Multiple Epistemic and Disaster Risk Cultures“;
- Ein Seminar am Anak Krakatau Research Centre der Universitas Lampung im Dezember 2022, hier präsentierte die Projektmitarbeiterin zu „Disaster Risk Cultures and Awareness Following the Anak Krakatau Eruption“;
- Die Development Studies Association Conference (DSA) im Juni 2023, hier präsentierte die Projektmitarbeiterin im Rahmen des Panels „Science, Technology and Innovation towards the Sustainable Development Goals“;
- Die European Geographical Conference (EUGEO) im September 2023, hier präsentierte die Projektmitarbeiterin „International, Interdisciplinary, Transdisciplinary – Integrated? The Case of a German Research Project on the Indonesian Tsunami Warning System“ im Panel „Integrated Disaster Risk Management for a Resilient Future: Geographical linkages of Social, Spatial, and Temporal Dimensions“;
- Die Northern European Conference on Emergency and Disaster Studies (NEEDS) im November 2023, hier co-organisierte die Projektmitarbeiterin mit KFS-KollegInnen Verena Flörchinger und Vicente Sandoval das Panel „A Cultural Turn in Disaster Studies? Exploring Epistemological, Socio-Historical and Scalar Perspectives“;
- Die Vortragsreihe „Klimakrise trifft Bevölkerungsschutz“ des Fachgebiets Bevölkerungsschutz, Katastrophenhilfe und Objektsicherheit (BuK) der Bergischen Universität Wuppertal und des Deutschen Komitees für Katastrophenvorsorge, hier präsentierte der Teilvorhabenleiter Prof. Martin Voss zu „Risikokultur“.

6. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Erfolgte Veröffentlichungen

Desportes, I.; Wicaksono, W. und Voss, M. (2024): Indonesia and its Tsunami Warning System: A Multiplicity of Socio-Historically Grown Disaster* Cultures. KFS Working Paper Nr. 29. Berlin:

KFS. Online verfügbar unter: <https://www.geo.fu-berlin.de/geog/fachrichtungen/anthrogeog/katastrophenforschung/publikationen-vortraege/working-paper-konzepte>.

Desportes, I., Dalimunthe, S.A., Surtiari, G.A.K. und Reksa, A.F.A. (in Druck, 2024): Applying a ‘cascading disasters’ research approach across silos and epistemic cultures? The challenge of warning of non-seismically induced tsunamis in Indonesia. Words into Action: Science and Policy. Geneva: United Nations for Disaster Risk Reduction.

Voss, M. (2022): Institutionelles Risikomanagement. *APuZ - Aus Politik und Zeitgeschichte* 23-25, 19-25. Online verfügbar unter <https://www.bpb.de/shop/zeitschriften/apuz/risikokompetenz-2022/508884/institutionelles-risikomanagement/>.

Wicaksono, W. (2023): *Community Disaster Cultures and the Indonesia Tsunami Warning System*. Masterarbeit an der Universitas Indonesia, betreut durch Prof. Dr. Jan Sopaheluwakan und Dr. Isabelle Desportes.

Wicaksono, W.; Desportes, I. und Sopaheluwakan, J. (2024): Disaster Cultures and the Indonesia Tsunami Early Warning System: (Mis)Alignments revealed by the 2018 non-tectonic tsunami in Labuan. *Australian Journal of Emergency Management* 39(1), 31-39.

Wicaksono, W.; Sopaheluwakan, J. und Desportes, I. (2023): Optimizing Subnational Warning Mechanisms: Community and Practitioner Perspectives on the 2018 Anak Krakatau-Induced Tsunami in Pandeglang, Indonesia. *International Journal of Disaster Management* 6(2), 209-226.

Kurzbündige projektbezogene Veröffentlichungen haben zudem im KFS-Newsletter, den sozialen Netzwerken der KFS und auf der KFS-Webseite stattgefunden, z. B. mit dem Titel [„Im Rahmen des TsunamiRisk Projekts ein Monat lang in Indonesien“](#), [„Erfolgreiche Masterarbeit-Verteidigung und deutsch-indonesische Co-Betreuung im Rahmen der Projekte Ina2Core und TsunamiRisk“](#) und [„Abschlussveranstaltung des TSUNAMI RISK Projekts zu nicht-seismisch induzierten Tsunamis in Indonesien“](#).

Geplante Veröffentlichungen

Desportes, I. (in Druck, 2024). ‘Theories of power: Disaster paradigms and what they aim to stifle’. In *Principles and Concepts of Disaster Risks, Vol.1.*, edited by I. Kelman. New York: Springer.

Desportes, I., Dalimunthe, S.A., Surtiari, G.A.K und Voss, M. Contingencies along the science-practice interface: Researching non-seismically induced tsunamis in Indonesia.

Schleip, L. (2024): *Practices at the Science-Policy Interface in the TsunamiRisk Projekt – A Qualitative Analysis*. Masterarbeit an der Freien Universität Berlin, betreut durch Prof. Dr. Martin Voss und Prof. Dr. Ulrike Beisel.

Indonesian-German TsunamiRisk consortium. Joint Research between Indonesia and Germany on Volcanic and Landslide induced Tsunamis: Recommendations for the Way Ahead.

Voss, M. und Desportes, I. Towards an Epistemological Understanding of Disaster*Culture.



Teil II Eingehende Darstellung

Förderkennzeichen: 03G0906E

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Berlin
Projektleitung: Prof. Dr. Tomas Manuel Fernandez-Steeger

Verbundprojekt: **Client-II TsunamiRisk: Durch Vulkane und Hangrutschungen induzierte Tsunamis**

Vorhaben: **Lokalisierung und Dynamik von und durch Hangrutschungen induzierter Tsunamis**

Laufzeit: 01.03.2021 – 29.02.2024

Berichtszeitraum: 01.03.2021 – 29.02.2024

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03G0906E gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen / den Autoren.

1. Erzielte Ergebnisse und Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele AP 210 Identifizierung von Risikogebieten

AP 210 zielte auf die Identifizierung von Risikogebieten in Indonesien mit einer hohen Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von vulkan- oder hangrutschungsinduzierten Tsunamis ab. Die Arbeiten der TU-B fokussieren dabei die Untersuchung von Küstenformen, die die Entstehung von Tsunamis durch Küsten- und submarinen Rutschungen begünstigen.

Dazu wurde im ersten Schritt eine globale Datenbank von in der internationalen Fachliteratur dokumentierten historischen Fallstudien von durch Hangrutschungen induzierten Tsunamis erstellt. Darin wurden aus über 200 Fällen mehr als 66 Parameter aufgenommen, die die Hangrutschung selbst, den Auslösemechanismus der Rutschung, den Wasserkörper und die entstandenen Tsunamiwellen beschreiben. Mithilfe dieses Katalogs wurden die Eigenschaften von Rutschungstsunamis miteinander verglichen. Es wurde beobachtet, dass Rutschungstsunamis weltweit in sechs verschiedenen Szenarien auftreten, welche in (Abb. 1) schematisch dargestellt werden. Ein Großteil aller Rutschungstsunamis wurde in glazialen Gebieten und Fjorden dokumentiert, in denen die Hänge durch das Abschmelzen von Gletschern und Permafrost destabilisiert werden (Abb. 1.1). Zudem wurden viele Rutschungstsunamis koseismisch in tektonisch aktiven Gebieten ausgelöst (Abb. 1.2). Auch in Stauseen, in denen schwankende Wasserspiegel das Spannungsregime in den umgebenden Hängen beeinflussen, werden häufig Tsunamis durch Hangrutschungen ausgelöst (Abb. 1.3). Ein weiteres Szenario, in dem Rutschungstsunamis ausgelöst werden, sind küstennahe oder submarine Vulkane, an denen vielfältige Prozesse, wie beispielsweise das Abrutschen von Vulkanflanken oder submarine Eruptionen Tsunamiwellen generieren können (Abb. 1.4). Anthropogen beeinflusste, bzw. künstlich

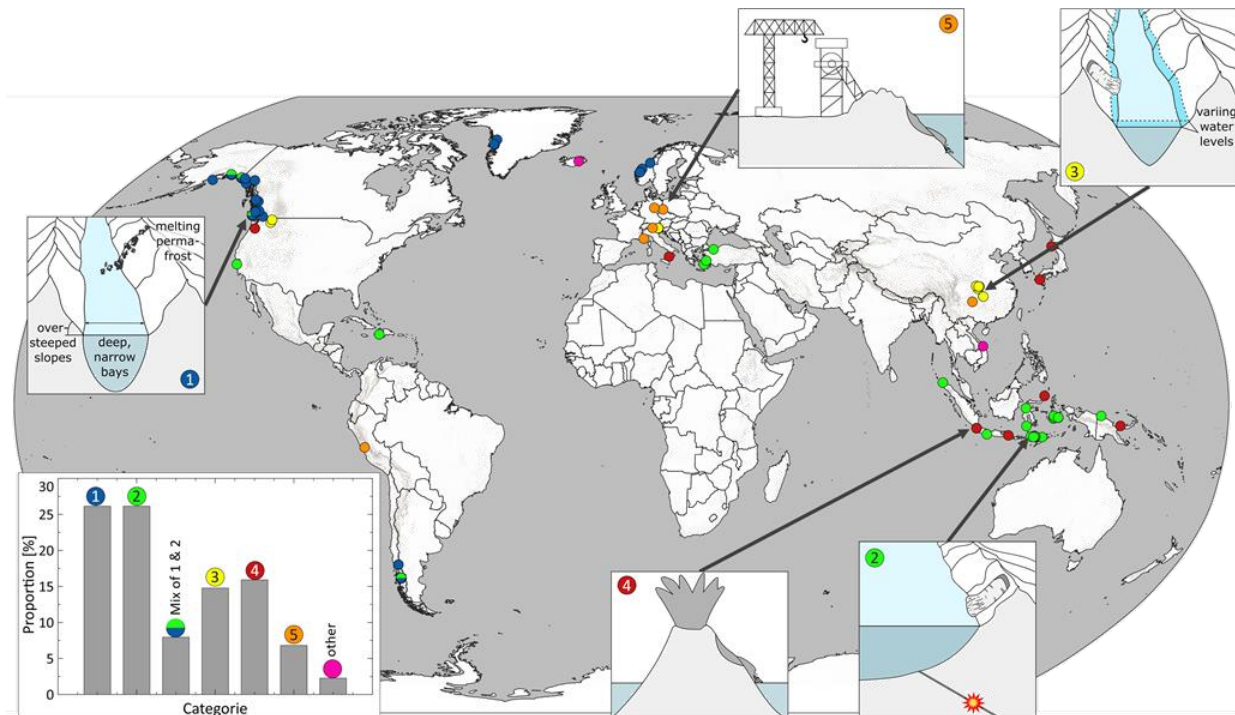


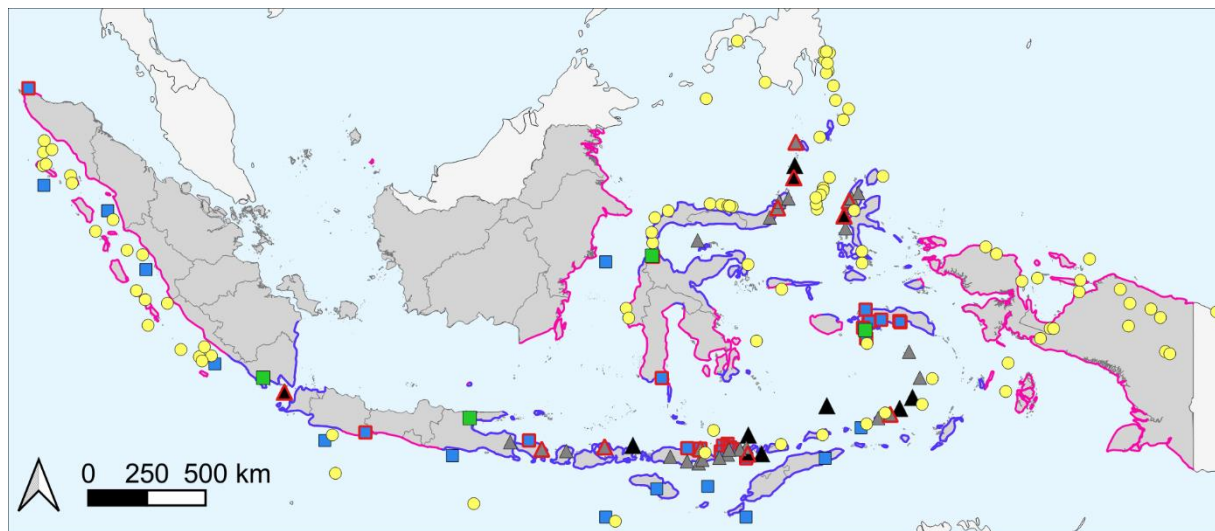
Abbildung 1: Überblick über die verschiedenen Szenarien, in denen Hangrutschungstsunamis häufig auftreten. 1: Fjorde, 2: Seismisch aktive Gebiete, 3: Stauseen, 4: Vulkane, 5: Anthropogen beeinflusste Hänge.

hergestellte Hänge wie Aufschüttungen oder Tagebauböschungen bilden das letzte Szenario, in dem vermehrt die Entstehung von Rutschungstsunamis beobachtet werden kann (Abb. 1.5).

Bei der Erstellung des Katalogs von Fallstudien ist aufgefallen, dass die Datenverfügbarkeit, insbesondere für Tsunamis, welche durch submarine Hangrutschungen ausgelöst wurden, sehr gering ist. Zu diesen Fallstudien fehlen vor allem Daten, die die Hangrutschungen selbst beschreiben, da hochaufgelöste bathymetrische Daten nicht flächendeckend verfügbar sind.

Zurzeit wird an einer wissenschaftlichen Publikation dieser Ergebnisse in Form eines Review Papers gearbeitet. Die erstellte Datenbank soll zudem als Datenpublikation in einem Repositorium veröffentlicht werden. Eine Visualisierung des Katalogs in Form einer Web App wurde bereits programmiert. Diese kann, sobald die Publikation des Review Papers erfolgt ist, über die Webseite des Fachgebiets veröffentlicht werden, um die Ergebnisse des Forschungsprojekts einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Gemeinsam mit den anderen Partnern in AP 200 wurde eine Info-Karte für Indonesien erarbeitet um generelle Abschnitte der Küstenlinie Indonesiens auszuweisen, die von Erdbeben-, Vulkan- und Rutschungs-induzierten Tsunamis betroffen sein könnten. Die Karte wurde mit der Zuarbeit der anderen Partner an der TU-B erstellt und z.B. im AP 400 erstellten Policy Brief verwendet (Abbildung 2).

Der zweite Teil der Arbeiten am AP 210 umfasst die Definition weiterer Gebiete der Indonesischen Küstenlinie, an denen die Entstehung von Tsunamiwellen durch Hangrutschungen wahrscheinlich ist. Diese Gebiete werden anschließend im Arbeitspaket 320 für eine Hangstabilitätsmodellierung verwendet. In einer Vorstudie wurde neben der Bucht von Palu auf der Insel Sulawesi auch die Bucht von Ambon in den Molukken im Osten Indonesiens für die Modellierung ausgewählt. Diese weist eine große Ähnlichkeit zur Bucht von Palu auf: Die Geometrie der Bucht ist langgezogen und schmal und liegt in einer tektonisch sehr aktiven Region. Ähnlich wie in Palu verläuft eine aktive Störungszone quer durch die Bucht. Zudem ist die Morphologie der Insel Ambon stark ausgeprägt und in der Vergangenheit wurden mehrfach große Hangrutschungen verzeichnet.



Tsunami Triggers

- Earthquakes since 1950, ($M > 7$, depth $< 100\text{km}$)
- ▲ High Hazard Volcanoes
- ▲ Medium Hazard Volcanoes
- △ Historic Volcanic Tsunami Generation
- Landslides (Tsunami Generation Unknown)
- Historic Landslide Tsunami Generation

Tsunami Hazard Areas

- Earthquakes, Landslides
- Earthquakes, Volcanoes, Landslides
- Potential for Large Landslide Tsunamis (Incomplete, Work in Progress)

Abbildung 2: Informationskarte über von Tsunamis gefährdete Gebiete und die jeweils gefährdenden Elemente

Die Identifizierung weiterer potentiell gefährdeter Gebiete erfolgt auf der Basis einer heuristischen Suszeptibilitätsanalyse. Dafür werden verschiedene Parameter herangezogen, die die Stabilität von subaerischen und submarinen Hängen beeinflussen können. Dazu zählen die Geologie, das tektonische Regime, die Morphologie, die Küstengeometrie, die Hydrologie und anthropogene Einflüsse, z. B. Straßen. Zusätzlich wird erwogen, weitere Parameter wie die Landnutzung, die Sedimentationsfracht in Küstengewässern oder die Deformation der Küstengebiete in die Analyse mit einzubeziehen, um aussagekräftigere Ergebnisse zu erzielen. Die Parameter wurden im Rahmen eines online Workshops am 28.09.2023 von einer Gruppe indonesischer und internationaler Expert*innen für Rutschungen und Tsunamis erarbeitet. Auf Grundlage der ausgewählten Parameter wurde eine Expert*innen-Umfrage über deren Relevanz durchgeführt. An der Umfrage beteiligten sich 25 Teilnehmer*innen die 37 Parameter bewerteten (Abbildung 3). Die Ergebnisse wurden in einem weiteren Workshop am 14.12.2023 besprochen und diskutiert. Die am häufigsten und höchsten gewerteten Parameter sollen im Anschluss als Grundlage für die Gefährdungsanalyse eines Pilot-Gebietes dienen (**Error! Reference source not found.**). Neben der Gefährdungsanalyse soll es hierbei auch um den Vergleich mit bestehenden Verfahren und die Reproduzierbarkeit gefährdeter Bereiche aus historischen Daten gehen. Die heuristische Suszeptibilitätsanalyse basiert auf frei verfügbaren, meist mit Fernerkundungsmethoden gewonnenen Eingangsdaten, sodass die Analyse auf die gesamte Indonesische Küstenlinie ausgeweitet werden könnte. Die vollständige Auswertung der Umfrage und Umsetzung der Kartierung ist im Rahmen der Projektlaufzeit nicht möglich gewesen und wird im Zuge einer anschließenden Veröffentlichung erfolgen.

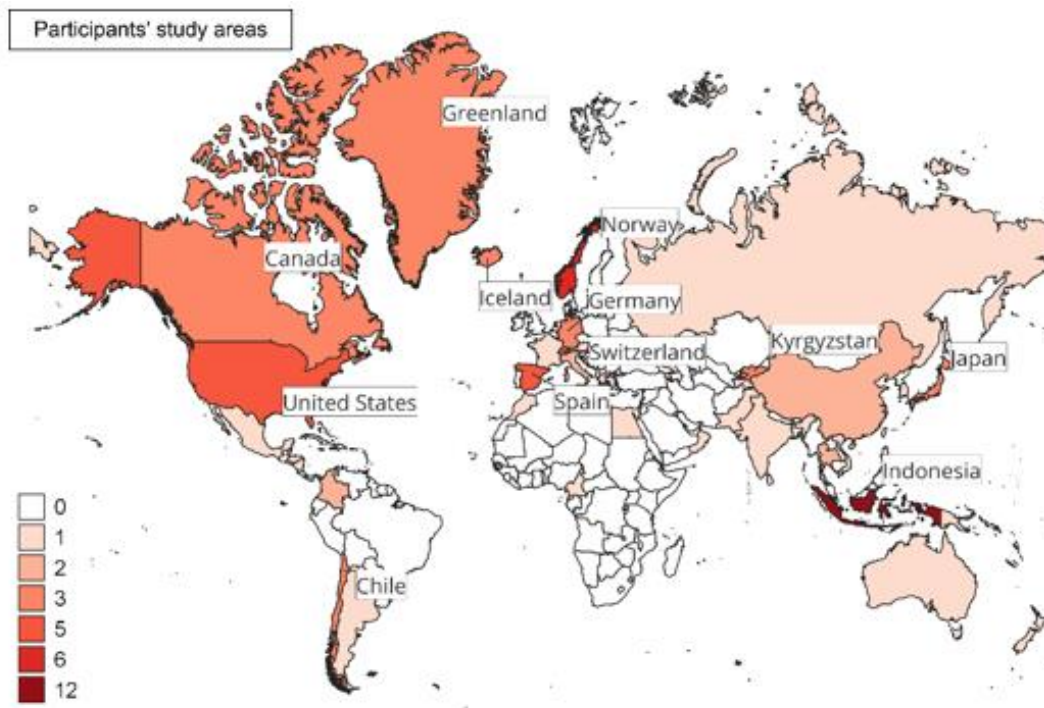


Abbildung 3: Weltweite Verteilung der an der Umfrage beteiligten Expert*innen nach Arbeitsort

Die TU Berlin koordinierte auch das AP 320. Ziel des Arbeitspakets ist die Modellierung der Hangstabilität in submarinen oder küstennahen Untersuchungsgebieten, welche in AP 210 ausgewählt werden. Für die Untersuchungsgebiete wurde bisher die Bucht von Palu auf der Insel Sulawesi ausgewählt.

Für die Modellierung der Hangstabilität sollte die distinkte Elemente Software Particle Flow Code (PFC) von Itasca verwendet werden. Diese Software ermöglicht die Berechnung der Entwicklung einer Hangrutschung zu unterschiedlichen Zeiten. Dadurch können die Querschnittsfläche der Rutschung, ihre Geschwindigkeit und ihre Korngrößenverteilung zu verschiedenen Zeiten modelliert werden. Diese Parameter beschreiben die kinetische Energie der Rutschung und sind daher essenziell, um das tsunamigene Potential einer Hangrutschung zu untersuchen.

Tabelle 1: Top 10 der meistgewählten Parameter der Umfrage

Parameter	Stimmen
Übersteile Böschungen	4
Tiefe und Magnitude historischer Erdbeben	3
Entfernung zu aktiven Störungszonen	3
Unkonsolidierte Sedimente	3
Böschungsneigung (subaerisch)	3
Böschungsneigung (submarin)	3
Landform	2
Lithologie	2
Poren-(wasser)druck	2
Niederschlag	2
Volumen historischer Rutschungen	2

Für die Arbeit am Arbeitspaket 320 war eine Zusammenarbeit mit Indonesischen Projektpartner*innen der Universitas Gadjah Mada (UGM) in Yogyakarta vorgesehen. Während einer Projektreise der Deutschen Projektbearbeiter*innen im November 2022 nach Indonesien wurde ein Meeting mit Wissenschaftler*innen der UGM in Yogyakarta durchgeführt und Möglichkeiten der Kooperation im AP 320 erörtert. Auch die Indonesischen Partner*innen haben großes Interesse an der Modellierung der küstennahen Rutschungen in der Bucht von Palu, sodass eine Zusammenarbeit an diesem Thema möglich ist. Derzeit ist die Erarbeitung eines Memorandum of Understanding zwischen der TU Berlin und der UGM in Bearbeitung, um eine engere Zusammenarbeit in Zukunft zu ermöglichen.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

[

Tabelle 2: Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Position		Bezeichnung	Ausgaben
0824		Personalausgaben	102.348,06
0846		Dienstreisen	10.779,00

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die zugewiesenen Mittel für Personalkosten wurden voll ausgeschöpft.

Reisekosten sind zum Zweck der Wissenschaftskommunikation durch Präsentation der Projektergebnisse auf Konferenzen in Berlin (GeoBerlin 2023), in Deutschland (GeoMIN Köln 2022, Fachsektionstage Würzburg 2023) und international (6th World Landslide Forum 2023, Florenz, Italien, EGU General Assembly 2024, Wien, Österreich) entstanden. Weiterhin fanden Projekttreffen 2022 in Hannover und 2023 in Oberpfaffenhofen statt. Eine internationale Reise wurde im Rahmen eines Workshops 2022 nach Indonesien durchgeführt.

Die Mittel für Reisekosten wurden voll ausgeschöpft und sogar leicht überzogen. Dies hat den Hintergrund, dass Gelder aus der Position 0834 „Mieten und Rechnerkosten“ umgewidmet wurden, um die Reisekosten für einen indonesischen Gastwissenschaftler zu übernehmen, der im Rahmen des Projektabschlusses nach Deutschland gereist ist. Für eine enge Abstimmung und Zusammenarbeit sowie nachhaltigen Wissenstransfer und Planung zukünftiger Kooperationen wurde dies für notwendig erachtet. Die vorgesehene Software wurde entgegen der Planung aus eigenen Mitteln des Fachgebiets erworben, somit wurden keine Mittel aus der Position 0834 „Miete- und Rechnerkosten“ geschöpft und sind selbst nach der Umwidmung noch vorhanden bzw. wurden zur Kürzung angeboten.

4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die wissenschaftlichen Ergebnisse des Projekts werden in unten genannten Veröffentlichungen und nationalen sowie internationalen Konferenzen publiziert. Im Erfolgsfall der Arbeiten auf Grundlage der Expert*innen Umfrage entsteht ein breit anwendbares Verfahren zur Identifizierung von potenziell gefährdeten Gebieten. Entsprechende Anwender sind im Sinne des Verwertungsplans Betreiber von Frühwarnsystemen, Behörden des Katastrophenmanagements und Ministerien aber auch Forschungseinrichtungen. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten sowie Erfindungen und Schutzrechtanmeldungen nach Projektende sind im Verwertungsplan der TU Berlin nicht vorgesehen.

Die im Tsunami_Risk Projekt gewonnenen Erkenntnisse konnten bereits in die Lehre transferiert werden. Es wurden bereits drei Abschluss- und Studienarbeiten am Fachgebiet abgeschlossen, eine weitere Abschlussarbeit und eine Studienarbeit sind derzeit in Bearbeitung. Zudem wurde an der TU Berlin ein Kolloquiumsvortrag im Rahmen des Geowissenschaftlichen Kolloquiums gehalten, in dem das Projekt vorgestellt wurde. Die Teilnahme an diesem Kolloquium ist verpflichtend für Masterstudierende im Studiengang Geotechnologie und das Kolloquium ist auch für die Öffentlichkeit zugänglich.

Auch in anderen Forschungsprojekten, die derzeit am Fachgebiet Ingenieurgeologie bearbeitet werden, kann das Wissen und die Erfahrungen, die innerhalb des Tsunami_Risk Projekts gewonnen wurden, genutzt werden, bzw. fließt das Wissen aus diesen Forschungsprojekten in die Arbeit am Tsunami_Risk Projekt ein. Die Projektbearbeiter*innen nahmen im Jahr 2022 an zwei Austauschreisen in einem vom DAAD geförderten Projekt zu Massenbewegungen in den Kolumbianischen Anden teil. Dort konnte festgestellt werden, dass durch Hangrutschungen induzierte Tsunamis auch in Flüssen in stark urbanisierten Gebieten ein Problem darstellen. Am 13. Juli 2022 rutschte eine Hangrutschung in einem Stadtteil Medellín in einen Fluss, dessen Ufer dicht besiedelt sind und löste dort eine Flutwelle aus. Diese Fallstudie betont die Relevanz der Forschung an Tsunamis, welche durch Hangrutschungen ausgelöst werden insbesondere im Kontext der fortschreitenden Urbanisierung.

5. Während der Durchführung bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Veröffentlichungen auf dem Forschungsgebiet des Vorhabens an anderen Stellen sind vor allem im Bereich der Modellierung, aber auch Fernerkundung und Gefährdungsanalyse erschienen. Titov (2021) stellt die häufigsten Ursachen für Tsunamis da und führt an, dass es sich auf dieser Grundlage bei dem Tsunami in Palu Bay um ungewöhnliche Ursachen handele. Modelle zum Einfluss auf Welleninterferenz- und Verstärkung durch „Sloshing“ in halb-geschlossenen Becken (Han et al., 2021) und Bathymetrie (Pudjaprasetya et al., 2021) identifizieren letzteres als maßgeblichen Faktor für ungewöhnliche Tsunamis. Beeinflussung der Bathymetrie findet laut Lutfi (2021) durch veränderte Strömung als Resultat von Sedimenteintrag aus Estuaren aber auch durch Erdbeben und submarine bzw. subaerische Rutschungen statt. Beispiele für Wellenmodellierung mit guter Reproduzierbarkeit findet sich im Flachwassermodell von Higuera et al. (2021) oder durch subaerische und submarine Rutschungen in Nagai et al. (2021). Somphong (2021) erstellt im Rahmen eigener Modellierungen eine Übersicht bisheriger Arbeiten. Demnach basieren die Modelle am häufigsten auf COMCOT (Flachwasser), Delft3D (Rutschung) und Tunami-N2 (Rutschung und Welle). Die Autor*innen präsentieren ein neues 2-Schichten Modell mit vordefinierter Rutschungsgeometrie, wobei sie durch Simulation mehrerer subaerischer und submariner Rutschungen gute Übereinstimmung der resultierenden Wellen finden. Ein weiteres 2-Schichten Modell wird von Heizardadeh und Mulia (2022) kommt zu dem Ergebnis, dass eine reine Erdbebenquelle die resultierenden Wellen unterschätzt und folglich als zweiter Auslöser submarine Rutschung vorhanden gewesen sein müssen. Sie kommen weiterhin zu der Erkenntnis, dass der Erfolg vieler Modelle mit unterschiedlichen Herangehensweisen und Annahmen in erster Linie auch an einer schlechten Datenlage und damit unzureichenden Randbedingungen liegt. Androsof et al. (2023) analysiert das Wellenspektrum und kommt zu dem Schluss, dass die zeitliche Reproduzierbarkeit bei mehreren Wellen gesichert sein muss, um eine korrekte Überlagerung und daraus resultierende Wellenhöhen zu simulieren.

Amlani et al. (2022) identifizieren das Erdbeben mithilfe spezifischer Signaturen als Super-Shear Ereignis und schlussfolgern, dass eine Ursache des Tsunamis in Untergrundbewegungen als Resultat von Intensität und Geschwindigkeit des Ereignisses zusammen mit der Bathymetrie zu suchen ist.

In einer Studie zum Einfluss von Rutschungen zählen Shao et al. (2022) über 15700 Ereignisse in der Palu Bay. Maßgebliche Faktoren bestünden hier in Höhenlage, Neigung und Ausrichtung von Hängen

sowie dem Relief. Die Autor*innen stellen fest, dass der Großteil der Rutschungen im granitischen bis dioritischen Bereich erfolgt ist. Ein Modell zur quantitativen Gefährdungsanalyse wird von Arifianti (2023) präsentiert, wobei eine Genauigkeit von 85% sowohl in Reproduzierbarkeit von Ereignissen aber auch der Vorhersage beschrieben wird.

Mögliche Paleotsunamis in der Region im 17. Und 19. Jahrhundert wurden von Putra (2023) als Vorgänger und potenzielle Voraussetzung für das Ereignis vom 28.09.2018 identifiziert.

6. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Tagungsbeiträge innerhalb des Berichtszeitraumes:

Katrin Dohmen, Anika Braun, Tomás M. Fernandez-Steege: Defining criteria for the formation of landslide induced tsunamis in elongated and narrow water bodies; Second International Conference on Natural Hazards and Risks in a Changing World 2021, 5 – 6 October 2021, University of Potsdam

Katrin Dohmen, Anika Braun, Tomás M. Fernandez-Steege: A Database of Landslide Induced Tsunamis, GeoMinKöln Conference, 11 – 15 September 2022, University of Cologne

Katrin Dohmen, Anika Braun, Tomás Fernandez-Steege: Analyzing the susceptibility for coastal and submarine landslides and their potential to trigger tsunami waves, Engineering Geology GeoBerlin 2023, 05.09.2023, Berlin

Katrin Dohmen, Anika Braun, Tomás Fernandez-Steege: An Approach Towards Susceptibility Analysis for Tsunamigenic Landslides in Indonesia, World Landslide Forum 17.11.2023

Katrin Dohmen, Anika Braun, Tomás Fernandez-Steege: Ein Ansatz zur Analyse der Suszeptibilität für küstennahe oder submarine Hangrutschungen. Fachsektionstage Geotechnik 2023, 13.09.2023, Würzburg

Katrin Dohmen, Anika Braun, Hendy Setiawan, Tomás Fernandez-Steege: An expert-based framework for susceptibility analysis for tsunamigenic landslides in Indonesia, EGU 2024, Wien

Anika Braun, Katrin Dohmen, Hendy Setiawan, Fikri Faris, Tomas Manuel Fernandez-Steege: Landslide-induced tsunamis – global overview and expert-based hazard mapping in Indonesia, invited lecture at 22nd International Symposium on Geo-disaster Reduction, 22 - 25 July 2024, Salerno, Italy

Veröffentlichungen (einschließlich in Vorbereitung):

In Vorbereitung für Natural Hazards: Katrin Dohmen, Philipp Blum, Anika Braun, Tomás Manuel Fernandez-Steege: Landslide-Triggered Tsunamis – A Review.

In Vorbereitung: Katrin Dohmen, Anika Braun, Hendy Setiawan, Fikri Faris, Tomás Manuel Fernandez-Steege: Expert-based framework for landslide-triggered tsunami susceptibility mapping.

- Amlani, F., Bhat, H.S., S., W.J.F., Schubnel, A., Vigny, C., Rosakis, A.J., Efendi, J., Elbanna, A.E., Dubernet, P., Abidin, H.Z. (2022): Supershear shock front contribution to the tsunami from the 2018 Mw 7.5 Palu, Indonesia earthquake. *Geophysical Journal International* 230, <https://doi.org/10.1093/gji/ggac162>
- Androsof, A., Harig, S., Rakowsky, N. (2023): Simulating landslide generated tsunamis in Palu Bay, Sulawesi, Indonesia. *Geosciences* 13, 72, <https://doi.org/10.3390/geosciences13030072>
- Arifianti, Y., Pamela, Iqbal, P., Sumaryono, Omang A., Lestiana, H. (2023) Susceptibility assessment of earthquake-induced landslides: the 2018 Palu, Sulawesi Mw 7.5 Earthquake, Indonesia. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik (The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin) UDC: 551:1, DOI: 10.17794/rgn.2023.3.4*
- Han, P., Yu, H., Yu, X. (2021) A sloshing induced tsunami: 2018 Palu Bay event. *Applied Ocean Research* 117, <https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102915>
- Heizadarzeh, M., Mulia, I.E. (2022): A new dual earthquake and submarine landslide source model for the 28 September 2018 Palu (Sulawesi), Indonesia tsunami. *Coastal Engineering Journal*, <https://doi.org/10.1080/21664250.2022.2122293>
- Higuera, P., Sepulveda, I., Lie, P. L.-F. (2021): Filling in the gaps of the tsunamigenic sources in 2018 Palu Bay tsunami, Civil engineering for disaster risk reduction, Pal & Bharadwaz, Springer.
- Lutfi, M. (2021) Insight of numerical simulation for current circulation on the steep slopes of bathymetry and topography in Palu Bay, Indonesia. *Fluids* 2021, 6, 234, <https://doi.org/10.3390/fluids6070234>
- Nagai, K., Muhari, A., Pakoksung, K., Watanabe, M., Suppasri, A. Arikawa, T., Imamura, F. (2021): Consideration of submarine landslide induced by 2018 Sulawesi earthquake and tsunami within Palu Bay, *Coastal Engineering Journal*, <https://doi.org/10.1080/21664250.2021.1933749>
- Pudjaprasetya, S.P., Adytia, D., Subasity, N. (2021) Analysis of bay bathymetry elements on wave amplification: a case study of the tsunami in Palu Bay. *Coastal Engineering Journal*, <https://doi.org/10.1080/21664250.2021.1930749>
- Putra, P.S., Yulianto, E., Kongko, W., Nugroho, S.H., Sahar, V.H., Aswan, A., Maryunani, K.A. (2023): Geological evidence of predecessor of the 2018 tsunami in Palu, Sulawesi, Indonesia. *Natural Hazards*, <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2023.04.010>
- Shao, X., Ma, S., Xu, C. (2022): Distribution and characteristics of shallow landslides triggered by the 2018 Mw 7.5 Palu earthquake, Indonesia. *Landslides*, Springer, 10.1007/s10346-022-01972-x.
- Somphong, C., Suppasri, A., Pakoksund, K., Nagasawa, T., Narita, Y., Tawatar, R., Iwai, S., Mabuchi, Y., Fujita, S., Moriguchi, S., Terada, K., Athanasius, C., Imamura, F. (2022): Submarine landslide source modeling using the 3D slope stability analysis method for the 2018 Palu, Sulawesi, tsunami, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22, 891-901. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-891-2022>
- Titov, V. V. (2021): Hard lessons of the 2018 Indonesian tsunamis. *Pure and Applied Geophysics*, <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02731-0>



Teil II Eingehende Darstellung

Förderkennzeichen: 03G0906F

Zuwendungsempfänger: Bundesanstalt Technisches Hilfswerk
Projektleitung: Dr. Frank Altenbrunn

Verbundprojekt: **Client-II Tsunami_Risk: Durch Vulkane und Hangrutschungen induzierte Tsunamis**

Vorhaben: **Institutionelle Aspekte des operativen Katastrophenrisikomanagements in Indonesien**

Laufzeit: 01.03.2021 – 29.02.2024

Berichtszeitraum: 01.03.2021 – 29.02.2024

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03G0906F gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen / den Autoren.

1. Erzielte Ergebnisse und Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Das Forschungsprojekt Tsunami_Risk, das Anfang März 2021 initiiert wurde, sah die formelle Beteiligung des Technischen Hilfswerks (THW) ab Februar 2022 vor. Trotz des offiziellen Starts des Teilvorhabens zu diesem späteren Zeitpunkt war das THW bereits im Vorfeld wie in der Vorhabenbeschreibung vorgesehen in die Planung und Vorbereitung involviert, was sich in der Teilnahme an offiziellen Projekttreffen und in ersten Vorbesprechungen manifestierte. Zudem wurden wichtige Kontakte nach Indonesien geknüpft. Innerhalb des Forschungsprojekts übernahm das THW die Leitung des Arbeitspakets 420 „Institutionelle Aspekte des operativen Katastrophenrisikomanagements“ mit der Task „Strukturelle und prozessuale Rahmenbedingungen im institutionellen Gefüge“. Außerdem arbeitete das THW in Arbeitspaket 510 „Politikempfehlungen zur Steigerung der gesellschaftlichen Resilienz“ der Task „Policy Brief mit Verbundergebnissen“ zu.

1.1 Analyse behördlicher Kommunikationsstrukturen und -prozesse

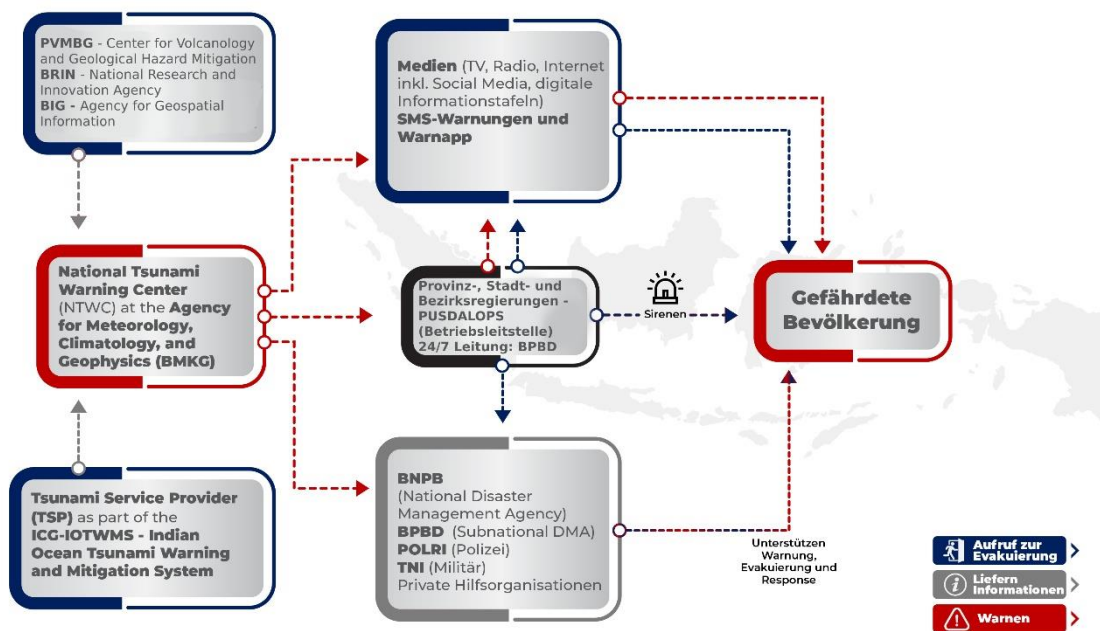
Zielsetzung im Tsunami_Risk Projekt war es, ausgehend von der operativen Ebene, behördliche Kommunikationsstrukturen – und prozesse zu analysieren, Optimierungsbedarfe zu identifizieren und Handlungsbedarfe bzw. -empfehlungen zu formulieren. Dezidiert sollte dabei auf dem indonesischen Katastrophenrisikomanagementsystem liegen. Inhaltlich eingegangen werden sollte auf Strukturen und Abläufe innerhalb und außerhalb (Warnung der Bevölkerung) der indonesischen Behörden, räumliche und kommunikationstechnische Gegebenheiten und Ausbildungskonzepte für das Personal. Als Informationsquelle sollten Expertengespräche, Regelwerke, Handlungsschemata (beispielsweise Standard Operating Procedures (SOP)) und weitere für den Sachverhalt relevante Dokumente dienen.

Das Starkregenereignis im Juli 2021, welches massive Auswirkungen auf Teile von Westdeutschland und darüber hinaus hatte, warf auch in Deutschland Fragen hinsichtlich behördlicher Kommunikationsstrukturen und -prozesse auf, die in der Öffentlichkeit kontrovers diskutiert wurden. Vor allem auch bezüglich Warnketten traten Forschungsbedarfe zu Tage, die durch das Schadensereignis unmittelbar an Brisanz gewannen. Der ursprüngliche geographische Fokus auf Indonesien wurde daher im Projektverlauf auf Deutschland ausgeweitet. Die Analyse von Strukturen und Prozessen in beiden Ländern und die Gegenüberstellung und Ableitung von bewährten Praktiken für das jeweils andere Land wurde über die ursprünglich Vorhabenbeschreibung hinaus im Projekt verfolgt. Die Projektergebnisse sind in dieser Form von besonderer Bedeutung für den deutschen Bevölkerungsschutz. Indonesien hat aufgrund seiner Exposition gegenüber Naturgefahren vielfältige Erfahrungen mit Kommunikationsstrukturen gemacht, von denen der deutsche Katastrophenschutz lernen kann.

Erste Ergebnisse der Analysen aus Arbeitspaket 420 wurden auf dem Fachkongress des Bundesamts für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) „Forschung für den Bevölkerungsschutz“ im Januar 2023 präsentiert. Arbeitspaketübergreifend, zusammen mit der Freien Universität Berlin und dem GeoForschungsZentrum, wurde das Thema „Tsunami Risk – Institutionelle und kulturelle Aspekte des operationellen Katastrophenrisikomanagements in Indonesien und Deutschland“ präsentiert und ein dazugehöriger Beitrag für ein Tagungsband eingereicht. In dem Beitrag wird auf die Mängel des deutschen Warnsystems hingewiesen und die Notwendigkeit spezieller Verfahren für den Warnprozess bei schnell eintretenden Naturgefahren wie Sturzfluten und Tsunamis unterstrichen. Der kurze Artikel vergleicht die Erfahrungen und Herausforderungen Deutschlands und Indonesiens bei der Implementierung effektiver Warnsysteme und betont die Bedeutung der kommunalen Ebene in beiden Ländern. Dabei wird hervorgehoben, dass Indonesien, unterstützt durch deutsche Projekte seit 2005, wertvolle Praxiserfahrungen gesammelt hat, die Deutschland bei der Verbesserung seiner Frühwarnsysteme nutzen könnte. Besonders wird auf die Notwendigkeit hingewiesen, Warnprozesse als soziale Prozesse zu verstehen, die ein umfassendes Verständnis für die Handlungsoptionen der betroffenen Bevölkerung erfordern und durch eine koordinierte Zusammenarbeit aller relevanten

Akteure gekennzeichnet sein müssen. Der Artikel unterstreicht die Wichtigkeit der lokalen Ebene für die Umsetzung von Warnkonzepten und Evakuierungsmaßnahmen und plädiert für eine Stärkung dieser Ebene durch bessere Ausbildung, Ressourcen und die Etablierung klarer Handlungsanweisungen. Für den Vortrag auf der Konferenz wurden die Warnketten in Deutschland und Indonesien analysiert und visualisiert.

DIE TSUNAMI-WARNKETTE IN INDONESIA (INATEWS)



DIE HOCHWASSER-WARNKETTE IN DEUTSCHLAND

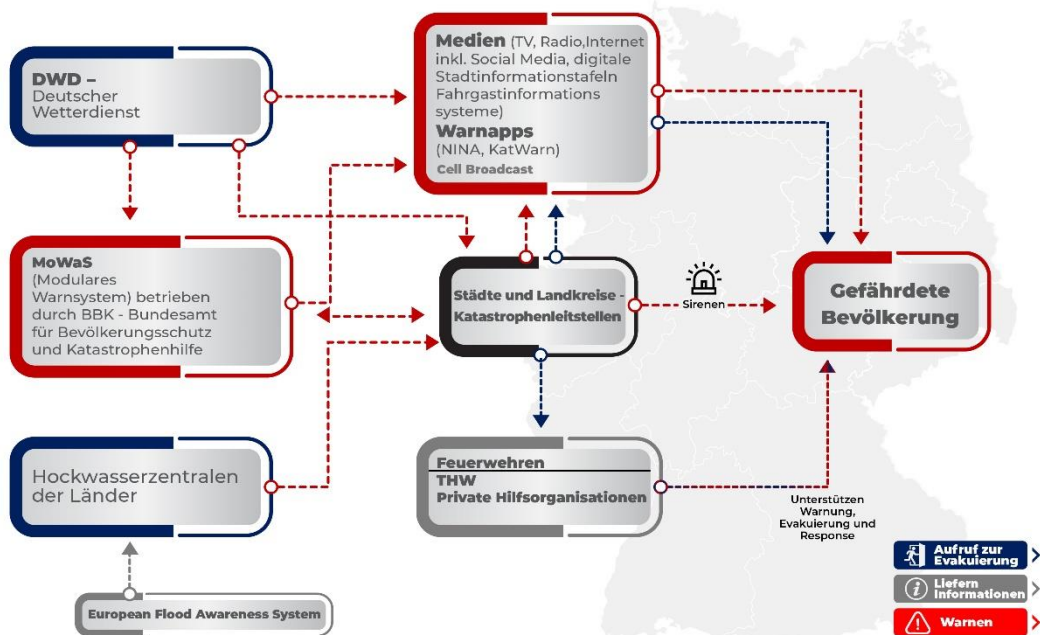


Abbildung 1: Die Tsunami-Warnkette in Indonesien und die Hochwasser-Warnkette in Deutschland. Eigene Darstellung.

Auch in Zusammenarbeit mit dem GFZ und erneut arbeitspaketübergreifend wurde im Februar 2023 ein Gastbeitrag beim Deutschen Komitee Katastrophenvorsorge e.V. (DKKV) mit dem Titel „Frühwarnung neu denken – was Deutschland aus den Erfahrungen der langjährigen Zusammenarbeit mit Indonesien beim Aufbau und Betrieb des Tsunamifrühwarnsystems lernen kann“ veröffentlicht.

Die Flutwelle im Ahrtal 2021 und die Beobachtungen zum Warnprozess zeigen auffällige Parallelen zu Erfahrungen aus Indonesien. Die Herausforderungen, wie kurze Warnzeiten und eine mit großen Unsicherheiten behaftete Datensituation, erfordern spezielle Verfahren für den Warnprozess, die sich deutlich von denen bei Überschwemmungen in größeren Flusssystemen unterscheiden. In beiden Ländern spielen die kommunalen Ebenen eine zentrale Rolle im Warnprozess, einschließlich der Vorbereitung lokaler Warnkonzepte und der Entscheidung über Evakuierungsmaßnahmen. Trotz ähnlicher Strukturen stehen beide Länder vor Herausforderungen wie seltenen Extremereignissen, begrenzten institutionellen Ressourcen und Kapazitäten auf lokaler Ebene.

Indonesien hat durch die Einrichtung lokaler Katastrophenrisikomanagementbehörden, die rund um die Uhr einsatzbereit sind, und die Etablierung direkter und redundanter Kommunikationskanäle zwischen dem nationalen Warnzentrum und den Gemeinden, wichtige Komponenten eines effektiven Warnsystems implementiert. Warnstufen mit klaren Handlungsempfehlungen, SOPs, Evakuierungsplänen und regelmäßigen Simulationsübungen stärken die Fähigkeiten lokaler Akteure.

Um die Frühwarnung in Deutschland zu verbessern, scheint es notwendig, den Warnprozess umfassender zu betrachten und insbesondere die Rolle und Herausforderungen der lokalen Ebene stärker zu berücksichtigen. Das Ziel sollte sein, die Frühwarnung mehr als sozialen Prozess zu verstehen und von den Handlungsmöglichkeiten der betroffenen Menschen auszugehen, um eine effektive Warnkette durch die Zusammenarbeit aller Stakeholder zu entwickeln.

Im Mai 2023 wurden die Ergebnisse, die bereits für den Fachkongress des BBK und als Gastbeitrag beim DKKV verschriftlicht wurden, beim Forschungstag des THW vorgestellt. Zielpublikum der Veranstaltung waren Mitarbeitende der THW Leitung und des BBK.

Über die zuvor beschriebenen Arbeiten zum Vergleich der institutionellen Warnprozesse in Deutschland und Indonesien hinaus wurde in einer gesonderten Studie die indonesische Tsunami-Warnkette detaillierter durchleuchtet und beschrieben.

Das Tsunami-Frühwarnsystem Indonesiens (InaTEWS) wurde als Reaktion auf den katastrophalen Tsunami im Indischen Ozean 2004 entwickelt. Indonesien, gelegen im sogenannten "Ring of Fire", benötigt aufgrund seiner geografischen Lage und der häufigen seismischen Aktivitäten ein robustes Frühwarnsystem für Tsunamis. InaTEWS vereint wissenschaftliche Überwachung, Datenanalyse, Kommunikationstechnologien und öffentliche Bildung zu einem komplexen System. Es nutzt ein Netzwerk aus seismischen und ozeanographischen Sensoren, um seismische Aktivitäten und Veränderungen des Meeresspiegels zu erkennen, die auf potenzielle Tsunamis hindeuten könnten.

Lokale Datenanbieter, wie das Zentrum für Vulkanologie und geologische Gefahrenminderung (PVMBG), die Agentur für Geoinformation (BIG) und die Nationale Forschungs- und Innovationsagentur (BRIN), spielen eine entscheidende Rolle in der Früherkennung und Analyse von Tsunami-Gefahren. Diese Einrichtungen liefern Echtzeitdaten, die von InaTEWS zusammengeführt und analysiert werden, um die Wahrscheinlichkeit und das potenzielle Ausmaß eines Tsunami zu bewerten. Internationale Beiträge und Kooperationen, insbesondere mit der UNESCO-Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC), verstärken die Kapazitäten von InaTEWS durch technische Unterstützung, Kapazitätsaufbau und den Austausch von Wissen und bewährten Praktiken.

Die zentrale Rolle in diesem System spielt die Agentur für Meteorologie, Klimatologie und Geophysik (BMKG), die das Nationale Tsunami-Warnzentrum (NTWC) beherbergt. Das NTWC ist für die Erkennung und Analyse von Tsunami-Bedrohungen zuständig und nutzt fortschrittliche Algorithmen und Modelle, um die Bahn, Intensität und potenziellen Auswirkungsbereiche eines Tsunami vorherzusagen. Nach der Identifizierung einer potenziellen Tsunami-Gefahr ist es Aufgabe des NTWC, Warnungen auszugeben. Diese Warnungen werden über verschiedene Kanäle verbreitet, einschließlich

traditioneller Medien, sozialer Medien, Sirenen, SMS-Alarmen und dedizierten Warn-Apps, um sicherzustellen, dass die Informationen so schnell wie möglich eine breite Öffentlichkeit erreichen.

Auf nationaler und subnationaler Ebene sind verschiedene Entitäten und gesellschaftliche Gruppen entscheidend für eine effektive Reaktion auf Tsunami-Warnungen. Die Nationale Behörde für Katastrophenmanagement (BNPB) koordiniert alle katastrophenbezogenen Aktivitäten und arbeitet eng mit subnationalen Katastrophenmanagementagenturen (BPBD), dem Militär (TNI), der Polizei (POLRI), zivilgesellschaftlichen Organisationen und dem Indonesischen Roten Kreuz (PMI) zusammen, um Evakuierungspläne umzusetzen, Soforthilfe zu leisten und Post-Katastrophenszenarien zu bewältigen.

Trotz der Stärken von InaTEWS stehen Herausforderungen wie Infrastrukturerhaltung, ungleiche Warnverbreitung, Bedarf an technologischen Upgrades und Gemeinschaftsvorbereitung im Raum. Die Bewältigung dieser Herausforderungen ist entscheidend, um die Widerstandsfähigkeit und Wirksamkeit des Systems zu erhöhen. InaTEWS ist ein entscheidender Bestandteil in Indonesiens Strategie zur Reduzierung des Katastrophenrisikos und spiegelt das Engagement des Landes wider, fortschrittliche Technologie und wissenschaftliche Expertise im Katastrophenmanagement zu nutzen.

Ergänzend zu dem Bericht über die indonesische Warnkette wurden die SOPs des BMKG näher betrachtet. Hier wurde insbesondere die Unterscheidung zwischen Tsunamis seismischer Natur und atypischen Tsunamis, die hauptsächlich durch nicht-seismische Aktivitäten wie Vulkanausbrüche ausgelöst werden, in den Blick genommen.

Für unterschiedliche Regionen hat die BMKG angepasste SOPs entwickelt, die auf die jeweiligen geographischen und seismologischen Besonderheiten abgestimmt sind. Diese SOPs reichen von der sofortigen Erkennung eines Erdbebens bis zur abschließenden Verbreitung von Frühwarnungen. Ein besonderes Augenmerk liegt auf atypischen Tsunamis, für die die BMKG spezielle Überwachungs- und Reaktionsrahmen implementiert hat, einschließlich der Nutzung von Technologien wie InaTNT und Radar Wera zur Erkennung von Anomalien des Meeresspiegels, die durch untermeerische Vulkanausbrüche verursacht werden.

Zusätzlich werden die SOPs des ASEAN Earthquake Information Center (AEIC) und des Tsunami Service Providers (TSP) hervorgehoben, die regionale Kooperation und Engagement für Katastrophenvorsorge demonstrieren. Diese Verfahren zielen darauf ab, eine schnelle und koordinierte Reaktion auf Erdbeben innerhalb der ASEAN-Grenzen zu gewährleisten und die Information über potenzielle Tsunamis in der indonesischen Region präzise und zeitnah zu verbreiten.

Der Bericht unterstreicht, dass trotz der Stärken von BMKGs Ansatz Herausforderungen wie manuelle Datenerfassung und Abhängigkeit von externen Datenquellen bestehen, die eine potenzielle Verzögerung in der Warnkette verursachen könnten. Diese Herausforderungen betonen die Notwendigkeit für regelmäßige Schulungen, Automatisierung bestimmter Prozesse und klare Kommunikationskanäle, um die Effektivität des Frühwarnsystems weiter zu verbessern.

Abschließend zeigt der Bericht, dass BMKGs SOPs eine tief verwurzelte Verpflichtung zum Schutz Indonesiens vor seismischen Bedrohungen demonstrieren. Durch detaillierte Verfahren und eine klare Aufgabenteilung wird ein umfassender Reaktionsmechanismus gewährleistet. Die Weiterentwicklung durch Automatisierung bestimmter Verfahren und die Verbesserung der Kommunikationswege könnte das bereits robuste Frühwarnsystem der BMKG weiter stärken.

Experteninterviews mit Teilnehmenden der BNPB, BMKG und verschiedenen NGOs, die zwischen November 2022 und Juni 2023 durchgeführt wurden, beleuchten die Herausforderungen und Fortschritte im Bereich des Tsunami-Risikomanagements in Indonesien genauer. Die Ergebnisse wurden schriftlich festgehalten.

Die Interviews decken mehrere Schlüsselthemen auf: Von der Wahrnehmung und dem Bewusstsein in lokalen Gemeinschaften über technische und operative Herausforderungen bis hin zu Kooperation und Vernetzung, Kommunikation, Tourismus und Sicherheitsmaßnahmen sowie nationalen Initiativen und Entwicklungen. Ein wiederkehrendes Thema ist die Konfrontation zwischen ökonomischen Prioritäten und der Notwendigkeit von Frühwarnsystemen in ländlichen Gegenden, wo langfristige Vorteile solcher Systeme oft unterschätzt werden. Trotz wachsender Aufmerksamkeit durch Katastrophen und

Bildungsinitiativen bleibt die umfassende Implementierung und Akzeptanz von Frühwarnsystemen eine Herausforderung. Die Interviews heben auch die technischen und operativen Schwierigkeiten hervor, wie falsche Frühwarnungen, Probleme bei der Evakuierung bestimmter Gebiete und die Komplexität der Kommunikation in einer zunehmend digitalisierten Welt.

Die Expertengespräche bieten wertvolle Erkenntnisse und unterstreichen die Komplexität der Implementierung und des Betriebs effektiver Tsunami-Warnsysteme in Indonesien. Sie zeigen, dass die Bewältigung dieser Herausforderungen eine Kombination aus technologischer Innovation, kultureller Sensibilität, effektiver Kommunikation und fortlaufender Bildung erfordert. Die zunehmende Vernetzung zwischen NGOs und der BNPB ist entscheidend, um umfassendes und effektives Katastrophenmanagement zu gewährleisten. Die Bildung von "Disaster Ready Villages" und die Bemühungen, Warnsysteme zugänglicher zu machen, insbesondere in entlegenen und schwer erreichbaren Gebieten, sind bedeutende Schritte zur Verbesserung der Tsunami-Vorsorge. Doch bleiben Herausforderungen wie die Vandalismusgefahr für Warnsysteme, die zunehmende Urbanisierung und die Notwendigkeit effektiver Risikokommunikation bestehen.

Zusammenfassend betonen die Experten die Notwendigkeit kontinuierlicher Überprüfung und Anpassung von Strategien und Maßnahmen zur Tsunami-Vorsorge, um Flexibilität und Aktualität zu gewährleisten und die Wirksamkeit dieser Systeme zu sichern.

Um die Ergebnisse weiter zu vertiefen und durch Erkenntnisse aus der Feldforschung zu untermauern, wurden während der Projektlaufzeit Finanzmittel umgewidmet und ein Unterauftrag an Dr. Yus Budiyo, den Koordinator der Forschungsgruppe für hydrometeorologische Katastrophen von BRIN, vergeben. Die Vergabe des Auftrags erwies sich im Projektverlauf als zielführend, da Dr. Budiyo über ein gutes lokales Netzwerk verfügt, als Indonesier einen besseren Zugang zu den Communities hat und natürlich die lokale Sprache spricht.

Dr. Budiyo wurde mit der Analyse von Lücken im indonesischen Tsunami-Frühwarnsystem beauftragt. Die Forschungsschwerpunkte umfassten die Evaluation der Kommunikation und Koordination zwischen verschiedenen Institutionen, die Analyse der Tsunami-Übungen, die Berücksichtigung sozialer Aspekte und die Beurteilung der Finanzierung und Ressourcen für lokale Warnsysteme. Dr. Budiyo und sein Team führten Fokusgruppensitzungen und semi-strukturierte Interviews durch, um die Kommunikation und Koordination zwischen den Behörden und der Bevölkerung zu verstehen.



Abbildung 2: Stakeholder-Workshop (Foto: Dr. Yus Budiyo/BRIN)

Die Studie stellte fest, dass bei dem atypischen Tsunami von 2018 keine Warnungen von BMKG ausgegeben wurden, was dazu führte, dass sowohl BNPB als auch lokale Ämter keine Informationen weitergaben. Ein wichtiger Befund war die Selbstevakuierung der Bewohner aufgrund von Informationen, die sie über ihre Mobiltelefone erhielten, was die Bedeutung von verlässlichen Informationskanälen und der Beteiligung der Gemeinschaft hervorhebt. Lokales Wissen und

Warnungen über soziale Medien spielten ebenfalls eine entscheidende Rolle bei der Reaktion auf den Tsunami. Die Studie von Dr. Budiyo empfiehlt die Entwicklung eines "Bottom-up"-Systems für die Tsunami-Warnkette, die Einführung eines Konzepts für die Familien-Evakuierung zur Unterstützung der schnellen Wiedervereinigung von Familien und die Anpassung an den Aktionsplan 2023-2027 der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) zur Verbesserung der Warnsysteme und der Katastrophenvorsorge. Diese Empfehlungen zielen darauf ab, die Effizienz und Effektivität der Frühwarn- und Reaktionssysteme im Falle von Tsunamis, insbesondere atypischen, die durch geologische Ereignisse wie Unterwassererdrutsche ausgelöst werden, zu verbessern.

Die Ergebnisse wurden im Februar 2024 einem interessierten Publikum in Bonn vorgestellt. Eingeladen zu dem Termin waren Vertreter*innen von Universitäten, des THW, der Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit und weiteren Organisationen im Bereich Katastrophenrisikomanagement.



Abbildung 3: Vorstellung der Studienergebnisse (Foto: Dr. Rahma Hanifa/BRIN)

Die zuvor beschriebenen Berichte und Vorträge zeigen, dass behördliche Kommunikationsstrukturen und -prozesse im Arbeitspaket 420 gemäß der Vorhabenbeschreibung tiefgehend analysiert wurden. Über die Ziele der Vorhabenbeschreibung hinaus wurde zusätzlich eine vergleichende Betrachtung von Deutschland und Indonesien durchgeführt und ein Forschungsauftrag an BRIN vergeben, um die Ergebnisse weiter zu vertiefen und verifizieren.

1.2 Stress-Test

Abgesehen von der Analyse von behördlichen Kommunikationsstrukturen und -prozessen sollte in Arbeitspaket 420 ein „Stresstest-Workshop“ vorbereitet, durchgeführt und nachbereitet werden. Der „Stresstest-Workshop“ hatte zum Ziel vermutete Schwachstellen im betrachteten System zu bestätigen und präziser zu beschreiben oder neue Schwachstellen zu identifizieren. Dazu sollten Vertreter:innen von Behörden und Expert:innen aus dem Spektrum des operativen Katastrophenrisikomanagement in Indonesien zur Mitarbeit eingeladen werden.

Aufgrund ihrer bereits bestehenden Zusammenarbeit mit renommierten Beratungsinstituten, darunter GFZ und Gempa, zeigte die BMKG kein Interesse an einem zusätzlichen Stresstest in Form einer Übung. Dies führte zu einer notwendigen Anpassung unserer geplanten Maßnahmen bezüglich des Stresstests. Eine partizipative SWOT- Analyse (Stärken, Schwächen, Chancen, Bedrohungen) schien zielführender im Rahmen des Stresstests, da so eine umfassende und interdisziplinäre kritische Bewertung des Tsunami-Risikomanagements mit allen Partnerorganisationen erarbeitet werden konnte.

Der am 18. November 2022 abgehaltene Stresstestworkshop in Jakarta in Form der SWOT-Analyse bildete einen zentralen Meilenstein des Projekts. An diesem Workshop nahmen 40 Beteiligte aus verschiedenen Organisationen teil, wodurch ein umfassendes und interdisziplinäres Bild des Tsunami-Risikomanagements entstand. Teilnehmer aus Indonesien repräsentierten wichtige Institutionen wie BMKG, BNPB, BRIN, das U-INSPIRE-Netzwerk, die Universität Lampung und die Gadjah-Mada-

Universität. Deutsche Organisationen des Tsunami-Risiko-Konsortiums umfassten das THW, das GFZ, das DLR, die Technische Universität Berlin, die Freie Universität Berlin und Gempa GmbH. Internationale Beteiligung gab es von der Zwischenstaatlichen Ozeanographischen Kommission der UNESCO.



Abbildung 4: Stresstest-Workshop (Foto: Nico Hybbeneth/THW)

Die Ergebnisse des Stresstest-Workshops wurden während der Veranstaltung verschriftlicht und in einem Bericht festgehalten. Die SWOT-Analyse offenbarte mehrere Stärken des Tsunami-Frühwarnsystems (TEWS), darunter etablierte Warnprotokolle und Initiativen zur Einbindung der Gemeinschaft. Als signifikante Schwächen wurden jedoch Mängel bei Systemtests und technologischer Integration identifiziert. Der Bericht betont die Notwendigkeit technischer Upgrades, politischer Reformen, stärkerer Gemeinschaftseinbindung und internationaler Kooperation, um das System zu verbessern.

Die Chancen zur Verbesserung des TEWS umfassen technologische Fortschritte, die Optimierung der Sensorik, bessere Datenverarbeitung und Kommunikationsinfrastrukturen. Besonders hervorgehoben wird die Notwendigkeit, die Gemeinschaft stärker in Aufklärung und Schulungen einzubinden, um das Bewusstsein und die Reaktionsfähigkeit in Bezug auf Tsunamigefahren zu verbessern.

Die Bedrohungen für das TEWS beinhalten mangelndes Verständnis und Bewusstsein innerhalb der Bevölkerung, finanzielle und technologische Herausforderungen und die Gefahr von Infrastrukturausfällen, die das Warnsystem unterbrechen könnten. Darüber hinaus werden Inkonsistenzen in der Investition in die verschiedenen Komponenten der Warnkette als kritisch betrachtet.

Der Workshop führte zu mehreren strategischen Empfehlungen zur Stärkung des TEWS. Dazu gehören die regelmäßige und umfassende Testung des Systems, die Einführung redundanter Systeme zur Sicherstellung der Betriebsbereitschaft bei Ausfällen und die Modernisierung der technologischen Ausstattung. Auch die regelmäßige Aktualisierung von Standardverfahren und Leitfäden, sowie die Verbesserung der Schulungsprogramme für Notfallteams und die Öffentlichkeit sind empfohlen.

Zusammenfassend schlägt der Bericht eine holistische Herangehensweise vor, die sowohl technologische, politische, gemeindebasierte als auch internationale Maßnahmen umfasst, um Indonesiens TEWS zu verbessern.

Wenn auch der Stresstest-Workshop keine szenariobasierte Übung war, wie in der Vorhabenbeschreibung anvisiert, wurden durch die durchgeführte SWOT-Analyse dennoch die gleichen Ziele erfolgreich erreicht. Vermutete Schwachstellen im betrachteten System konnten bestätigt und präziser beschrieben werden und neue Defizite identifiziert werden.

Die zuvor beschriebenen Berichte „The Indonesian Tsunami Early Warning Chain: A Simple Overview“, „Understanding BMKG's SOPs: Seismic and Atypical Tsunami Early Warnings“, „Evaluating and Enhancing Tsunami Risk Management in Indonesia: Insights from the Tsunami Risk Project's Stress-Test Workshop“ und „Evaluating and Enhancing Tsunami Risk Management in Indonesia: Insights from the Expert Interviews“ sowie die von Dr. Yus Budiyo erstelltte Ausarbeitung „Research on Institutional and Operational Aspects of the Tsunami Warning Chain“ ergeben zusammen das englischsprachige Ergebnispapier aus Arbeitspaket 420 „Praktische Anschlussfähigkeiten, Handlungs- und Anpassungsoptionen aus der operativen Perspektive“. Das Ergebnispapier dient dem deutschen Bevölkerungsschutz als Wissensschatz bestehend aus Erfahrungen, bewährten Praktiken und gewonnenen Erkenntnissen aus Indonesien zum Thema Frühwarnung.

1.3 Beitrag zum Policy Brief „Politikempfehlungen zur Steigerung der gesellschaftlichen Resilienz“

Gemäß Vorhabenbeschreibung sollten alle Teilvorhaben die im Projektverlauf erlangten Erkenntnisse in Form von Politikempfehlungen zur Steigerung der gesellschaftlichen Resilienz und Reduktion von Vulnerabilitäten im Rahmen von Arbeitspaket 520 zuliefern. Geplant war vor allem hinsichtlich der institutionellen Aspekte des operativen Bevölkerungsschutzes auf Ergebnissen des Arbeitspakets 420 aufzubauen.

Vor allem aus dem Stresstest-Workshop ließen sich Politikempfehlungen ableiten, die in das gemeinsame Dokument integriert worden. Es wurden Maßnahmen zur Stärkung der Systeminfrastruktur und Technologie vorgeschlagen, einschließlich umfassender Tests zur Gewährleistung der Zuverlässigkeit des Systems, Einführung von Redundanzen zur Risikominderung bei Ausfallpunkten und technologischen Upgrades, insbesondere in der Sensortechnologie. Zudem wurde eine kontinuierliche Wartung aller Systemkomponenten betont. Weiterhin wurde die Aktualisierung der SOPs und Handbücher empfohlen, um den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen gerecht zu werden und deren weite Verbreitung zu sichern. Programme zur Bildung und Sensibilisierung der Gemeinschaften sollen das Verständnis für Tsunami-Risiken erhöhen und die Vorsorge verbessern, wobei lokale Wissensbestände und kulturelle Gegebenheiten berücksichtigt werden sollten. Die Empfehlungen adressierten auch finanzielle und institutionelle Herausforderungen, wie die Sicherung stabiler Finanzierung für die Systemwartung und -erweiterung sowie für Bildungsprogramme. Eine verstärkte Zusammenarbeit zwischen Regierungsbehörden, Forschungseinrichtungen und NGOs sowie der Aufbau internationaler Partnerschaften wurden ebenfalls erwähnt. Die Ausbildung und das Halten qualifizierten Personals in lokalen Katastrophenmanagementeinheiten wurde als entscheidend für die Vorbereitung auf Gemeinschaftsebene angesehen. Schließlich wurde die Nutzung technologischer Möglichkeiten durch die Integration in globale Überwachungssysteme und die Entwicklung digitaler Plattformen für eine schnelle Warnungsverbreitung empfohlen. Die Anpassung der regulatorischen Rahmenbedingungen an internationale bewährte Praktiken und neue wissenschaftliche Erkenntnisse waren ebenfalls Teil der Empfehlungen.

Dr. Yus Bidoyono und sein Team empfahlen in ihrem Bericht außerdem die Anpassung der SOPs vor allem in Hinblick auf atypische Tsunamis. Darüber hinaus wurde in dem Bericht ein Konzept zur Evakuierung und Betreuung im Familienverbund vorgestellt, welches im Fall einer Tsunamiwarnung eine schnelle Evakuierung und Wiedervereinigung von Familien erleichtern soll. Zusätzlich zielten die Empfehlungen darauf ab, das indonesische Tsunami-Frühwarnsystem an nationale Standards und Praktiken anzupassen. Dies beinhaltet die Verbesserung der Frühwarnsysteme und die Integration von lokalem Wissen und natürlichen Warnzeichen in die offiziellen Warnsysteme.

Die zuvor genannten Punkte wurden an geeigneten Stellen in das Policy Brief, vor allem in die so sogenannte Community Section, eingefügt und im Anschluss mit allen Partnern bei einem Workshop in Potsdam diskutiert und konsolidiert.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenbasierte Verwendungsnachweis spiegelt die Umwidmungen zu Gunsten der Budgetlinie 0835 Vergabe von Aufträgen und 0843 sonstige sächliche Verwaltungsausgaben wider. Der Unterauftrag an Dr. Yus Budiyo konnte die vom THW erarbeiteten Ergebnisse ergänzen und validieren und war daher eine wertvolle Ergänzung zu den ursprünglich geplanten Arbeiten. Die Umwidmung Anfang des Jahres 2024 zu 0843 sonstige sächliche Verwaltungsausgaben diente der Einladung indonesischer Projektpartner aus BRIN zur Erarbeitung des gemeinsamen Policy Brief, dem Abschlussworkshop und der Diskussion der Studienergebnisse von Dr. Yus Budiyo in Bonn im Februar 2024. Die Perspektive der indonesischen Projektpartner bei den Diskussionen war maßgeblich für den Projekterfolg. Bei den Personalkosten (0812) wurde zunächst Geld eingespart, da sich während der Projektlaufzeit Personalwechsel ergaben und Nachbesetzungen nicht immer termingerecht erfolgen konnten. Anfallende Aufgaben wurden dennoch abgearbeitet und intern kompensiert. Hervorzuheben sind auch die Reisekosten für zwei Personen zur im Verbund organisierten Reise nach Indonesien. Im Rahmen dessen fand auch der Stresstest-Workshop statt, für welchen Catering aus Budgetlinie 0843 beschafft wurde. Im Rahmen der Reisekosten wurden außerdem Kosten für zwei Verbundtreffen für jeweils zwei Personen in Potsdam abgerechnet.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das THW ist als Einsatzorganisation des Bundes im Zivil- und Katastrophenschutz zunehmend international tätig. Nicht nur bei Auslandseinsätzen, sondern auch durch die Aufträge zum Capacity Building und die Unterstützung beim Aufbau lokaler Strukturen des Katastrophenmanagements im Ausland erlangt das THW sehr spezifische Erfahrungen und Wissen in diesem Bereich. Dieses Hintergrundwissen im internationalen operativen Katastrophenmanagement konnte das THW in den verschiedenen Ergebnisdokumenten in Tsunami_Risk einbringen. Unter der Prämisse des gegenseitigen Lernens konnte das THW auch verschiedene Lektionen für den deutschen Bevölkerungsschutz aus dem Austausch mit den indonesischen Partnerbehörden (vor allem BNPB und BMKG, aber auch BRIN) ableiten. Das Starkregenereignis im Sommer 2021 hat erneut die Notwendigkeit betont, sich international, insbesondere mit besonders exponierten Ländern, über bewährte Praktiken der Frühwarnung auszutauschen. Mit Hilfe des Projekts Tsunami_Risk konnte ein Grundstein für diese Kommunikation mit Indonesien gesetzt werden.

Der THW-Haushalt sieht kaum Mittel für die Realisierung möglicher Forschungsvorhaben vor. Die Betrachtung und Bearbeitung wissenschaftlicher Fragestellungen sowie die wissenschaftliche Vernetzung mit Forschungsorganisationen ist damit nur durch die gezielte Drittmittelförderung möglich. Das Teilvorhaben „Institutionelle Aspekte des operativen Katastrophenrisikomanagements in Indonesien“ im Projekt Tsunami_Risk wäre entsprechend ohne die erfolgte Zuwendung nicht durchführbar gewesen.

4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die im Rahmen des Projekts erstellten Dokumente wurden dem THW zur Verfügung gestellt. Diese Unterlagen, zusammen mit den veröffentlichten Projektergebnissen und Präsentationen auf Fachkonferenzen, dienen als Grundlage für den deutschen Bevölkerungsschutz, um aus den Erfahrungen Indonesiens im Bereich der Tsunami-Frühwarnung zu lernen. Die Ergebnisse des Projekts bieten auch anderen Akteuren des deutschen Bevölkerungsschutzes wertvolle Einblicke, um ihre internen organisatorischen und strukturellen Prozesse zu optimieren. Darüber hinaus führte der Unterauftrag an Yus Budiyo vom indonesischen Forschungsinstitut BRIN zu weiterführenden Erkenntnissen über Frühwarnungen bei atypischen Tsunamis. Diese Erkenntnisse werden von den indonesischen Projektpartnern auch nach Projektende weiterverfolgt. Eine wissenschaftliche

Publikation zu diesem Thema ist bereits in Planung und wird das Verständnis zur Tsunami Frühwarnung und Evakuierung weiter verbessern.

5. Während der Durchführung bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit in Deutschland löste das Starkregenereignis zahlreiche Forschungsaktivitäten zur Verbesserung der Frühwarnung und des gesamten Katastrophenmanagements aus. Es sind jedoch keine Vorhaben bekannt, bei denen gezielt internationale Frühwarnmechanismen untersucht wurden, um daraus Schlüsse für Deutschland zu ziehen. Das seit Februar 2021 geförderte Projekt PRE-COLLAPSE beschäftigte sich mit der Entstehung atypischer Tsunamis und untersuchte dabei auch den indonesischen Anak Krakatau. Im Rahmen eines Projekttreffens hielt Dr. Morelia Urlaub einen Vortrag über die Exkursion nach Indonesien und die dadurch gewonnenen Erkenntnisse.

6. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Hybbeneth, Nico; Desportes, Isabelle; Lauterjung, Jörn; Spahn, Harald: Tsunami Risk – Institutionelle und kulturelle Aspekte des operationellen Katastrophenrisikomanagements in Indonesien und Deutschland. Fachkongress „Forschung für den Bevölkerungsschutz“ 12.-14.01.2023. Bundesamt für Bevölkerungsschutz.

Spahn, Harald; Hybbeneth, Nico; Lauterjung, Jörn (2023): Frühwarnung neu denken – was Deutschland aus den Erfahrungen der langjährigen Zusammenarbeit mit Indonesien bei Aufbau und Betrieb des Tsunamifrühwarnsystems lernen kann. URL: <https://dkkv.org/gastbeitrag-fruehwarnung-neu-denken/>.

Noch unveröffentlicht:

Hybbeneth, Nico; Lauterjung, Jörn; Spahn, Harald: Institutionelle Aspekte des operationellen Katastrophenrisikomanagements in Indonesien und Deutschland am Beispiel von Frühwarnung für schnell einsetzende Naturgefahren (Sturzfluten/Tsunamis). BBK Tagungsband.



Teil II Eingehende Darstellung

Förderkennzeichen: 03G0906G

Zuwendungsempfänger: gempa GmbH
Projektleitung: Dr. Bernd Weber

Verbundprojekt: **Client II - TsunamiRisk: Durch Vulkane und Hangrutschungen induzierte Tsunamis**

Vorhaben: **Technologische Umsetzung konkreter Projektergebnisse in InaTEWS**

Laufzeit: 01.03.2021 – 29.02.2024

Berichtszeitraum: 01.03.2021 – 29.02.2024

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03G0906G gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen / den Autoren.

1. Erzielte Ergebnisse und Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Im Projekt „Client II - TsunamiRisk: Durch Vulkane und Hangrutschungen induzierte Tsunamis; Vorhaben: Technologische Umsetzung konkreter Projektergebnisse in InaTEWS“ wurden folgende Ziele vorgegeben:

- Entwicklung von Plugins zur Integration der Multisensordaten in CAPS
- Integration und Visualisierung der Kataloge von tsunamigenen Vulkanen und Küstenbereichen mit Tsunamigefahr
- Einbindung tsunamigener Küstenformen
- Integration seismischer Methoden in InaTEWS

Im Rahmen der „Entwicklung von Plugins zur Integration der Multisensordaten in CAPS“ wurde ein Plugin implementiert, das LiCSAR-Daten in die Arbeitsabläufe am BMKG integriert. Das Plugin, basierend auf der CAPS-Client-Bibliothek, ist in C++ geschrieben und führt folgende Arbeitsschritte durch:

1. Überprüfung der Frames im COMET-LiCS Sentinel-1 InSAR-Portal unter https://gws-access.jasmin.ac.uk/public/nceo_geohazards/LiCSAR_products auf Aktualisierungen und deren Download (Abb. 1).
2. Überprüfung der Datensätze in jedem „interferometric pair folder“ auf Überschreitung von Schwellwerten im „coherence image“, dem „wrapped phase image“ oder dem „unwrapped phase image“ und gegebenenfalls deren Weiterverarbeitung.
3. Umwandlung der TIF-Dateien in Grid-Dateien.

4. Übertragung der Grid-Dateien als Records in den CAPS-Server mit Zeitstempeln und eindeutiger ID.
5. Speicherung der Grid-Dateien in Verzeichnissen, die von SeisComP überwacht und als Kartenlayer dargestellt werden (Abb. 2).

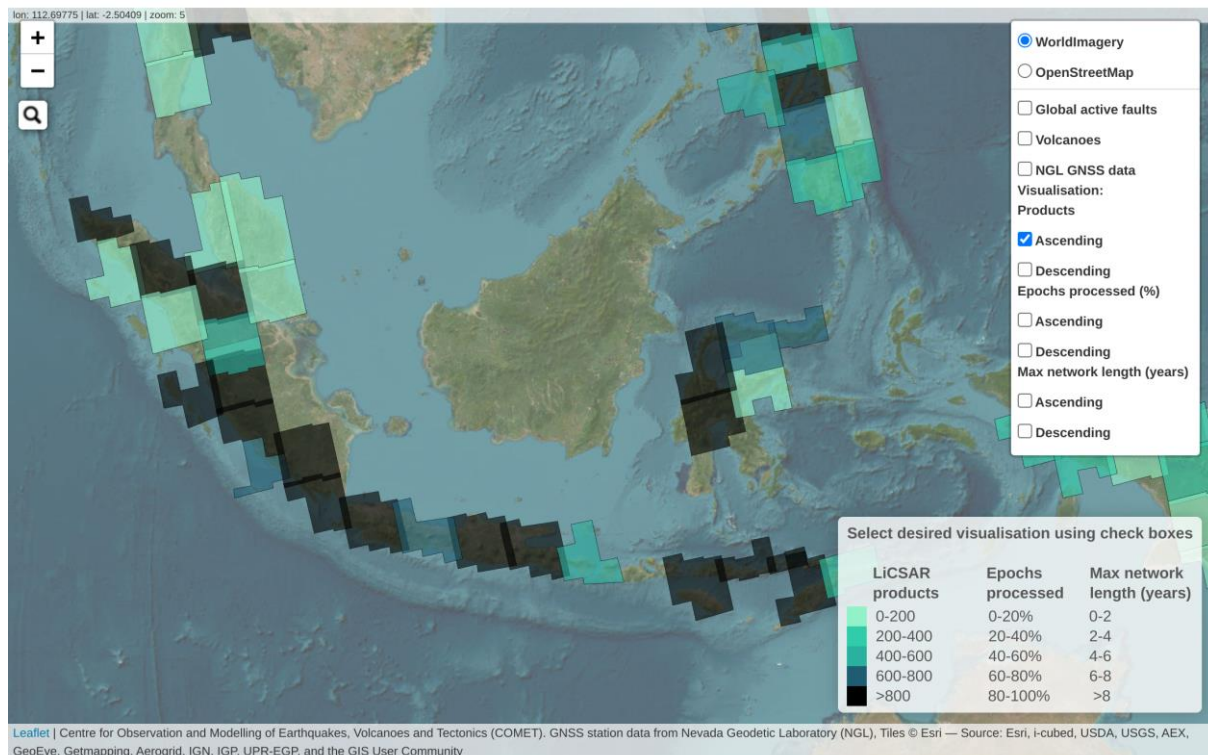


Abbildung 1: Für Indonesien verfügbare Frames im COMET-LiCSAR Sentinel-1 InSAR Portal

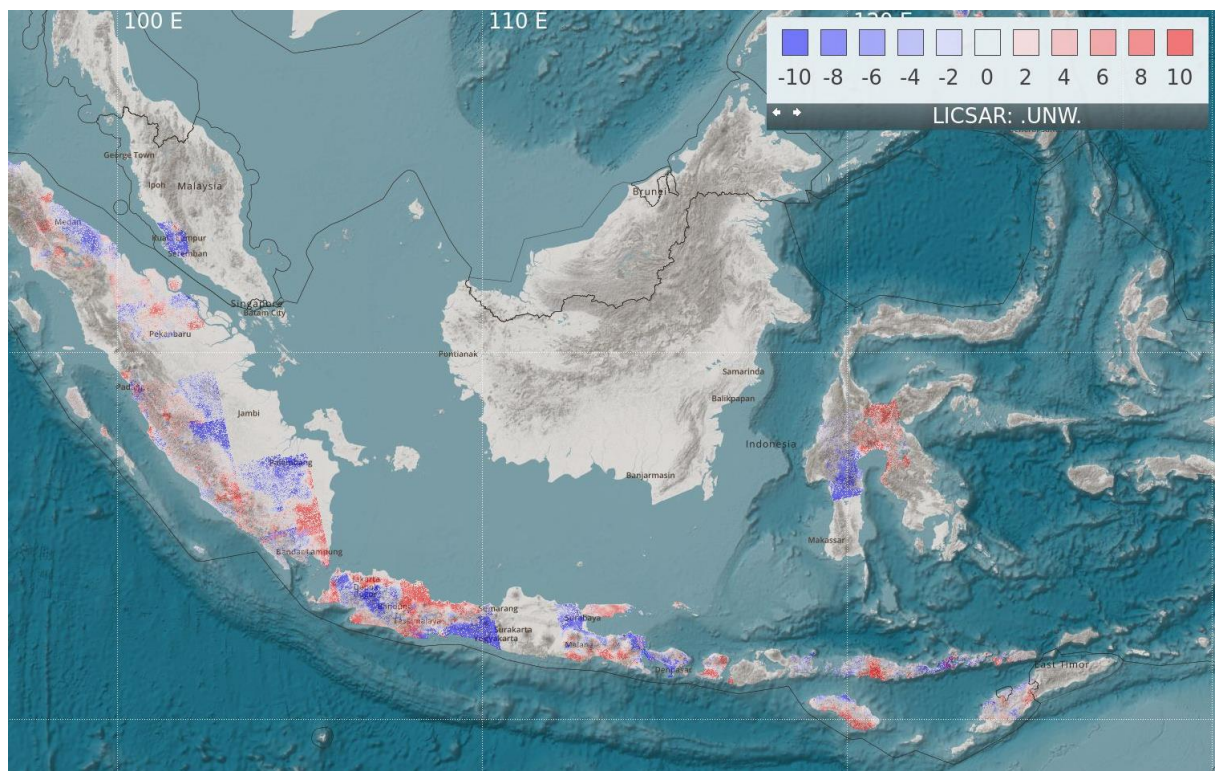


Abbildung 2: Visualisierung der "Unwrapped Phase" Informationen als Kartenlayer in SeisComp

Die Implementation ermöglicht es, historische LiCSAR-Daten effektiv abzufragen und aktuelle Daten als Kartenlayer für SeisComp bereitzustellen. Dies führt zu einer flexiblen Visualisierung und damit zu

einer verbesserten Überwachung von Bodenbewegungen sowie dem frühzeitigen Erkennen von Tsunamirisiken.

Bezüglich der „Integration und Visualisierung der Kataloge von tsunamigenen Vulkanen und Küstenbereichen mit Tsunamigefahr“ (Abb. 3) wurde ein Plug-in geschrieben, welches auf den grafischen Qt-Bibliotheken des SeisComP Framework basiert. Es ermöglicht die Darstellung von GIS basierten Vektordaten für Vulkane oder von Polygonen für Küstenbereiche mit Tsunamigefahr. Die Vektordaten sind zoomlevel abhängig einblendbar, und diesen können Symbole mit konfigurierbaren Farbschemas oder Icons (png) zugeordnet werden.

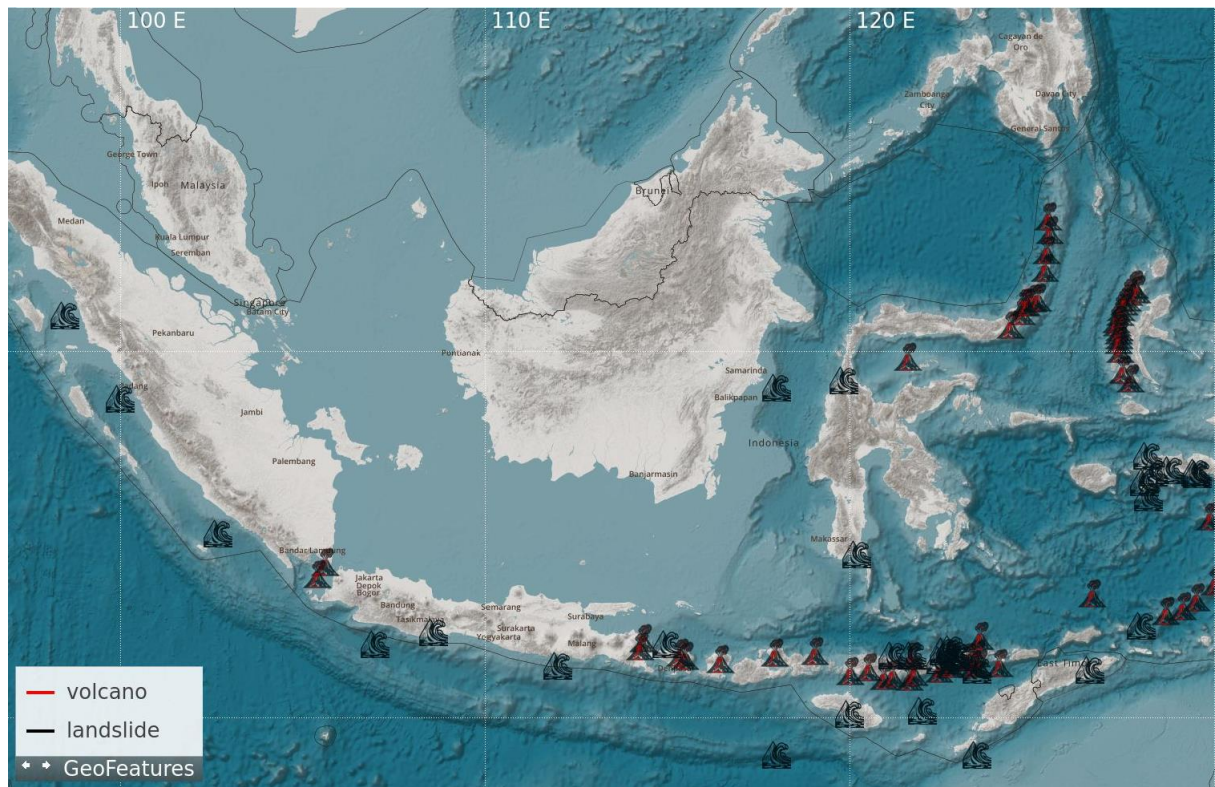


Abbildung 3: Lokationen von tsunamigenen Vulkanen und durch Hangrutschung gefährdete Regionen

Das Plug-in erlaubt ebenfalls die Einbindung und Darstellung tsunamigener Küstenregionen.

Im Zuge der „Integration seismischer Methoden in InaTEWS“ wurde ein Picker für die Detektion von Erdbeben entwickelt. Der Picker basiert auf dem Modul *scautopick* des SeisComP Framework und wurde durch ein C++ Plug-in um die benötigte Funktionalität erweitert. Der Picker verarbeitet seismische Breitbanddaten und erkennt tieffrequente Signale, die typisch für Erdbeben sind. Hierzu wurden die historischen Aufzeichnungen von aufgetretenen Hangrutschungen analysiert. *scautopick* wird mit einem Bandpassfilter mit Eckfrequenzen von 0,01 Hz und 0,1 Hz sowie einen STALTA-Algorithmus konfiguriert. Da Erdbebensignale sich durch eine dominante Tieffrequenzenergie auszeichnen, ohne signifikante Energie in den hohen Frequenzen auszustrahlen, wurde das Plugin so implementiert, dass es die Anwesenheit von hochfrequenten Signalen überprüft. Nur wenn diese fehlen, wird der Picker aktiv. Diese Strategie gewährleistet, dass nur bei tatsächlichem Vorhandensein von Erdbebenindikativen Tieffrequenzsignalen und dem Fehlen von Erdbebentypischen Hochfrequenzsignalen ein Alarm ausgelöst wird.

Ursprünglich war geplant, die Analyse der langperiodischen Anregung (Vergleich kurz- vs. langperiodischen Anregung und/oder Backprojection) bestimmten Warnkriterien in die Erdbebenklassifizierungssoftware KAPPA zu integrieren. Diese Maßnahme sollte eine verbesserte

Beurteilung der Erdbebendaten im Hinblick auf das Tsunamirisiko ermöglichen. Statt einer Integration in KAPPA wurde mit dem BMKG abgestimmt, einen akustischen Alarm zu implementieren. Diese Entscheidung steht im Einklang mit den generellen Standard Operation Procedures (SOPs) des BMKG, die auch im Falle eines Erdbebens eine Sirene und eine akustische Nachricht vorsehen.

Bei der Implementation des Backprojektionsverfahren bleibt es bei einer prototypischen Implementierung. Der Hauptgrund hierfür liegt in der Notwendigkeit weiterführender Arbeiten, um zuverlässige Ergebnisse sicherstellen zu können. Ein wesentliches Hindernis stellt dabei die mangelnde Datengrundlage dar. Die Verfügbarkeit und Qualität der erforderlichen seismischen Daten sind entscheidend für die Effektivität des Backprojektionsverfahrens, insbesondere bei der Lokalisierung und Analyse von Hangrutschungen.

Die SeisComP Version 6 wurde um die Funktionalität zur Behandlung nicht-seismischer Quellen erweitert. Dies betrifft speziell die Erweiterungen der Eventtypen mit vulkanischen Ereignissen.

Bei den jüngsten Arbeiten am indonesischen TsunamiWarnSystem im Februar 2024 im Rahmen des TsunamiRisk-Projektes wurden umfangreiche technische Verbesserungen und Aktualisierungen in den Tsunamiwarnzentren Jakarta und Bali (Abb. 4) des BMKG durch 2 Mitarbeiter der gempa GmbH vorgenommen, um die Leistungsfähigkeit und Effizienz des Warnsystems zu erhöhen.



Abbildung 4: Systemaktualisierung im Warnzentrum in Bali

Die Abstimmung der Arbeiten erfolgte initial in Meetings mit den technischen Teams und den Entscheidungsträgern beim BMKG, um sicherzustellen, dass die geplanten Installationen reibungslos verlaufen.

Im Zusammenhang mit der Überführung der aktuellen SeisComP und TOAST Version zu der im Rahmen des TsunamiRisk-Projektes spezialisierten Erweiterung von SeisComP und TOAST wurde zunächst ein Testsystem installiert, welches dem BMKG die Einarbeitung in die neue Version ermöglichen soll. Neben der Testinstallation wurden auch vorbereitende Installationen von Hardware und Software in den Zentren in Jakarta und Bali durchgeführt. Diese vorbereitenden Arbeiten umfassten die Aktualisierung und Neuinstallation von insgesamt 16 Servern und Rechnern auf die

neueste SeisComP-Version 6.1.2 und das Betriebssystem Ubuntu 22.04. Diese Aktualisierungen erleichtern eine spätere Umstellung des operativen Betriebes.

Zusätzlich mußte TsunAWI, einem vom Alfred-Wegener-Institut im Rahmen des GITEWS-Projektes entwickelten System zur Abfrage von Simulationsergebnissen, auf einem der Server eingerichtet werden.

Nach erfolgreicher Installation und Aktualisierung der Systeme erfolgte eine initiale Einweisung und praktische Trainingsmaßnahmen.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises für das Projekt umfasst die folgenden Posten:

Personalkosten (Kontennummer 0837): EUR 53.827,71. Diese Kosten umfassen die Gehälter und Sozialabgaben für das Projektteam, das an der Durchführung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten beteiligt war.

Reisekosten (Kontennummer 0838): EUR 19.812,93. Diese Position beinhaltet alle Ausgaben für Dienstreisen, die im Zusammenhang mit dem Projekt standen, einschließlich des Workshops in Indonesien sowie der Installations- und Trainingskurs-Reise.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Rahmen des Projekts „Client II - TsunamiRisk“ geleisteten Arbeiten waren sowohl notwendig als auch angemessen und entsprachen weitgehend dem geplanten Umfang. Eine Ausnahme stellte der erhöhte Installationsaufwand für das bevorstehende Upgrade der beim BMKG in Indonesien zu implementierenden Software dar. Dieser unerwartete Mehraufwand ergab sich hauptsächlich aus der Neuanschaffung von Hardware durch das BMKG. Ende 2023 hat das BMKG neue Hardware für sein Warnzentrum angeschafft, was zur Folge hatte, dass nicht nur ein Software-Upgrade erforderlich wurde, sondern eine vollständige Neuinstallation und Neukonfiguration des Gesamtsystems an beiden Standorten (Jakarta und Bali). Diese umfangreiche Aufgabe erforderte eine Anpassung der ursprünglichen Pläne und musste zwingend vor Ort durchgeführt werden, um eine optimale Integration und Funktionalität der neuen Systeme zu gewährleisten.

4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die während des TsunamiRisk-Projekts von der gempa GmbH initiierten technischen Entwicklungen stellen eine tragfähige Grundlage für zukünftige Innovationen im Bereich der Risikoanalyse von Naturgefahren dar. Die fortlaufende Weiterentwicklung der erweiterten SeisComP- und TOAST-Versionen ist ein wesentlicher Pfeiler der Unternehmensstrategie zur Sicherung und zum Ausbau des Geschäftsmodells, zur Erweiterung des Softwareportfolios und zur Erfüllung der steigenden Bedürfnisse der Kunden, insbesondere von Warnzentren.

Ein konkretes Beispiel für diese Bestrebungen ist die Entwicklung eines "Players" für die grafischen Oberflächen des SeisComP Frameworks. Diese Neuerung erlaubt es Nutzern, durch die zeitliche Sequenz der LiCSAR-Daten zu navigieren, wodurch die Beobachtung und Analyse der Entwicklung und Veränderung von Vulkanen deutlich vereinfacht wird. Die Fähigkeit, Veränderungen über Zeit visualisieren zu können, ist insbesondere für Forschende und Entscheidungsträger von großem Wert, da sie fundierte Analysen und Vorhersagen über potenzielle Gefahren und deren Entwicklungsverläufe ermöglicht.

Ferner ist der Ausbau und die Weiterentwicklung der Implementierung der Kartenlayer geplant, um eine dynamische Anpassung an Veränderungen in den zugrundeliegenden Daten zu ermöglichen. Diese Weiterentwicklung strebt eine Echtzeitdarstellung des Gefährdungspotenzials bzw. der

Warnstufe von Vulkanen an. Solch eine Funktionalität ist entscheidend für die Optimierung der Warnmechanismen, da sie eine schnellere und genauere Reaktion auf Änderungen im Gefährdungspotenzial ermöglicht.

Die potenzielle Verwertung dieser Entwicklungen erstreckt sich von der wissenschaftlichen Forschung bis hin zu praktischen Anwendungen in der Risikobewertung und dem Katastrophenmanagement. Die gempa GmbH beabsichtigt, diese Technologien sowohl in vorhandene Systeme zu integrieren, als auch neue Märkte und Einsatzgebiete zu erschließen. Indem das Unternehmen diese innovativen Lösungen zur Verfügung stellt, leistet es einen aktiven Beitrag zur Steigerung der Sicherheit und zur Reduzierung der von Naturgefahren ausgehenden Risiken.

5. Während der Durchführung bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Soweit bekannt, wurden während der Laufzeit unseres Projekts keine signifikanten Fortschritte auf dem gleichen Gebiet bei anderen Stellen erzielt.

6. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Es sind bisher keine Veröffentlichungen der Ergebnisse erfolgt. Eine geplante Veröffentlichung auf der General Assembly of the European Seismological Commission vom 22-27 September 2024 ist derzeit in Vorbereitung.