



## Die organisch-geochemische Spur von Tsunamis

Piero Bellanova<sup>1,2</sup> ([p.bellanova@nug.rwth-aachen.de](mailto:p.bellanova@nug.rwth-aachen.de)), Jan Schwarzbauer<sup>1</sup> ([j.schwarzbauer@emr.rwth-aachen.de](mailto:j.schwarzbauer@emr.rwth-aachen.de)), Klaus Reicherter<sup>2</sup> ([k.reicherter@nug.rwth-aachen.de](mailto:k.reicherter@nug.rwth-aachen.de))

1 Laboratory for Organic-Geochemical Analysis, Institute of Geology and Geochemistry of Petroleum and Coal, RWTH Aachen University

2 Neotectonics and Natural Hazards Group, RWTH Aachen University, Germany

### Zusammenfassung

Geowissenschaftliche Untersuchungen von Tsunamis stoßen mit konventionellen geologischen Verfahren an ihre natürlichen Grenzen. Jedoch ist die Erforschung dieser Naturgefahren weit davon entfernt abgeschlossen zu sein und wichtige Faktoren wie die Verteilung von persistenten organischen Schadstoffen (z.B. halogenierte Stoffe, PAKs, PCBs, Pestizide, etc.) als Indikatoren für die Zerstörung während Überflutungsereignissen, aber auch deren potentiell schädigende Langzeitfolgen auf Mensch und Umwelt wurden bisher nur zaghafte angekratzt. Daher ist der Bedarf an neuen organisch-geochemischen Ansätzen zur Identifizierung von Tsunamiten, aber vor allem zur tiefergehenden Analyse der Auswirkungen der weitflächigen Zerstörung auf die Umwelt und den Menschen (z.B. durch Schadstofffreisetzung), von hoher wissenschaftlicher Bedeutung.

### Einleitung

Tsunami, ein unscheinbarer, gar verharmlosender japanischer Begriff, den vor dem 26. Dezember 2004 kaum jemand kannte, geschweige denn nutzte. Die Frage ist jedoch, warum kannte kaum jemand vor 2004 solche eine Art von Extrem-Ereignissen? In der nicht-wissenschaftlichen Literatur finden sich zahlreiche Hinweise auf großmaßstäbliche Fluten, seien es die biblischen oder der Untergang von Atlantis. Jedoch führt die geringe Rekurrenz solch einschneidender Erdbeben und Tsunamis in vielen Bereichen zu einer Mystifizierung oder einem Vergessen im Laufe der Generationen.

Doch seit jener medial und global verfolgten Tsunamis zu Beginn des 21. Jahrhunderts ist der Begriff und das sich dahinter verbergende Naturphänomen untrennbar mit Tod und Zerstörung verknüpft. Entlang zahlreicher Küsten weltweit wurde aufgerüstet, mit Warnhinweisen, Evakuationsrouten, Frühwarnsystemen und Schutzmauern, dennoch steckt die Tsunami-Wissenschaft, die ihren Anfang in den späten 1980er Jahren (Atwater, 1987; Dawson et al., 1988) fand, noch in ihren Kinderschuhen. Viel Grundlagenforschung zu Mechanismen, Sedimenttransport und Modellierung von rezenten aber auch von historischen und prä-historischen Tsunamis hat einen erheblichen wissenschaftlichen Beitrag geleistet in Folge der großen Ereignissen im Indischen Ozean (2004), Chile (1960, 2010) und Japan (2011).

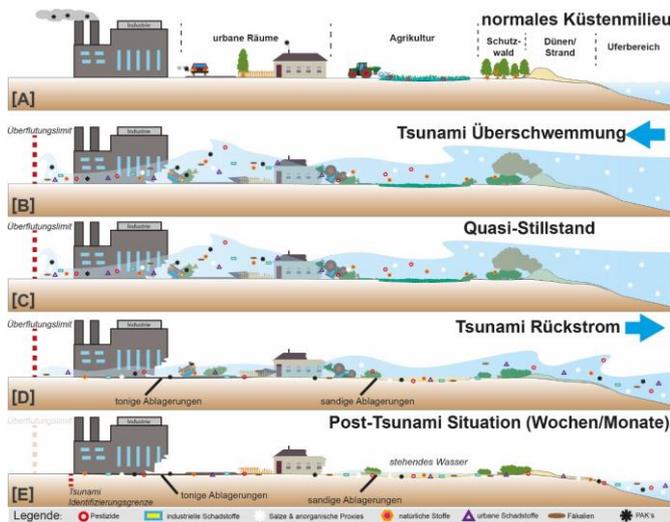
Bis zum heutigen Tag liegt der Hauptfokus der Tsunami-Forschung auf der reinen Identifizierung von tsunamigenen

Ablagerungen in sedimentären Archiven. Dies ist jedoch aus zwei Gründen ein zu eingeschränkter Betrachtungswinkel des Forschungsfeldes: (I) Bei dem Großteil der bisherigen Studien liegt ein Fokus auf den visuell erkennbaren Tsunami-Sanden, die aus marinen oder küstennahen Milieus erodiert und mit den auflaufenden Wassermassen landeinwärts transportiert werden. Dabei ist allerdings zu beachten, dass diese Sandlagen nur einen Teil der gesamten Überflutung ausmachen. Dies wurde zum Beispiel in der Sendai-Ebene für den Tohoku-oki Tsunami (2011) gezeigt, wo die Sande in etwa 60% des überfluteten Gebiets überliefen (Chagué-Goff et al., 2012). (II) Betroffene Küstenbereiche werden zunächst auf die Zerstörung durch das Erdbeben oder des Wellenereignisses hin untersucht. Studien zu langfristigen Konsequenzen für die Gesundheit und Umwelt, infolge der bei der Zerstörung durch Erdbeben und Tsunami austretenden und von den Wassermassen verteilten toxischen, chemischen Substanzen, lassen sich jedoch an einer Hand abzählen.

### Tsunami-Mechanismen und Stoffverteilung

Tsunamis bestehen meist aus mehreren Wellen, die zeitversetzt auf die betroffenen Küsten auftreffen. Dabei ist jede Tsunamiwelle in weitere Phasen unterteilbar (Dawson & Steward, 2007): (I) Generation; (II) Überschwemmung; (III) Quasi-Stillstand; (IV) Rückstrom (Abb. 1). Dabei spielt die Generation der Wellen durch Erdbeben oder subaquatischen Rutschungen aus umweltgeochemischer Sicht keine große Rolle. Die Phase der Überschwemmung (engl. run-up) ist in Kombination mit den meist vorher entstandenen Erdbebenschäden die wichtigste Phase. Die auflaufenden Wassermassen haben eine große zerstörerische Kraft, erodieren Sedimente, transportieren Schadstoffe und andere toxische chemische Stoffe landeinwärts und die somit über weite Küstenbereiche verteilt werden (Bellanova et al., 2020). Dies geschieht solange, bis die dritte Phase, der Quasi-Stillstand, das Geschehen dominiert. Hier erreichen die Wassermassen ihren energetischen Nullpunkt. Wie es in Japan oder Indonesien dramatisch dokumentiert wurde, kann dies mehrere Kilometer im Landesinneren sein (z.B., Fritz et al., 2006; Mori et al., 2011). Der Quasi-Stillstand ist in seiner zeitlichen Länge von der Frequenz der Welle abhängig, kann aber mehrere Minuten andauern. In dieser Zeit wird viel des landeinwärts transportierten Sediments aus der Suspension abgelagert und Teile des Wassers können versickern (Dawson & Steward, 2007).

Der darauffolgende Rückstrom der Wassermassen (engl. backwash) führt diese kanalisiert zurück in Richtung Ozean (Einsele et al., 1996; Le Roux & Vargas, 2005). Dabei sucht sich das Wasser den topographisch leichtesten Weg. Hierbei kommt es erneut zu Erosion von zuvor abgelagerten Sedimenten und zur meerwärtigen Verteilung von chemischen Stoffen aus inländischen urbanen und industriellen Räumen (Bellanova et al., 2020).



**Abb. 1:** konzeptionelles Modell von Erosion, Transport, Stoffverteilung und Ablagerung von organisch-geochemischen Stoffen in einem normalen Küstenmilieu [A], während der verschiedenen Phasen eines Tsunamis [B: Überschwemmung (run-up), C: Quasi-Stillstand, D: Rückstrom], sowie die Situation nach einem Tsunami [E].

## Sedimentbelastung und Schadstoffquellen

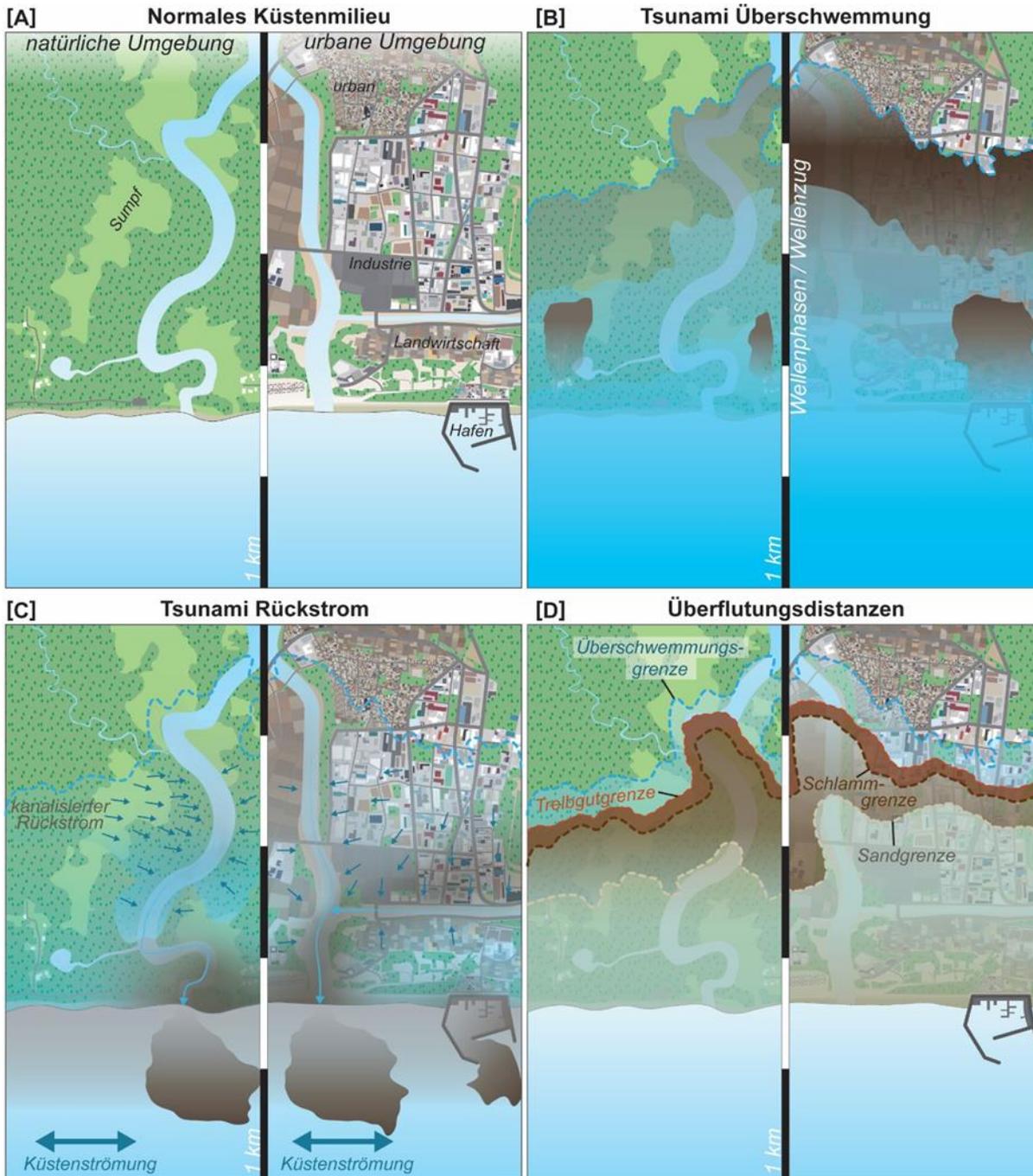
Zu den bevorzugten menschlichen Siedlungsgebieten gehören flache Küstenabschnitte, für die jedoch das Risiko von Überschwemmungsereignissen in Folge von Stürmen oder Tsunamis am höchsten ist. Urbane Küstenzentren sind häufig verbunden mit kritischer Infrastruktur wie Industrie, Tourismus, Verkehrsknotenpunkte (Flughäfen, Häfen), Stromversorgung (Öl-, Gas- oder Kernkraftwerken) und Krankenhäusern. Die Verwundbarkeit solcher Küstenregionen wurde auf dramatische Weise (z.B. die Kernschmelze des Fukushima Daiichi Kernkraftwerks) während des 2011 Tohoku-oki Erdbebens und Tsunamis offengelegt. Im Gegensatz zu Industrieländern wie Japan, die vieler Orten mit Deichen und Tsunamischutzwänden gegen die Gefahr gerüstet sind, haben Entwicklungsländer häufig nicht die Möglichkeit, gut fundierte Frühwarnsysteme und andere Schutzmaßnahmen einzurichten. Dabei spielen gerade in Entwicklungs- und Schwellenländern wie Indien oder Indonesien die Küstenregionen eine prominente Rolle, was dramatische Folgen im Falle eines Tsunami hat, wie sich in den vergangenen Jahrzehnten mehrfach gezeigt hat, z.B. beim Tsunami im Indischen Ozean 2004 oder dem Palu (Sulawesi) Tsunami 2018. Mit einem überproportionalen Bevölkerungswachstum in Küstengebieten nimmt dementsprechend auch das Gefährdungspotential in den kommenden Jahr-

zehnten zu. Dieses Risiko gegenüber Naturgefahren wird zudem noch einmal drastisch gesteigert durch den anhaltenden Klimawandel, da der Anstieg des Meeresspiegels, und falls er noch so gering aus, eine direkte verstärkende Wirkung auf Überflutungsereignisse wie Tsunamis hat.

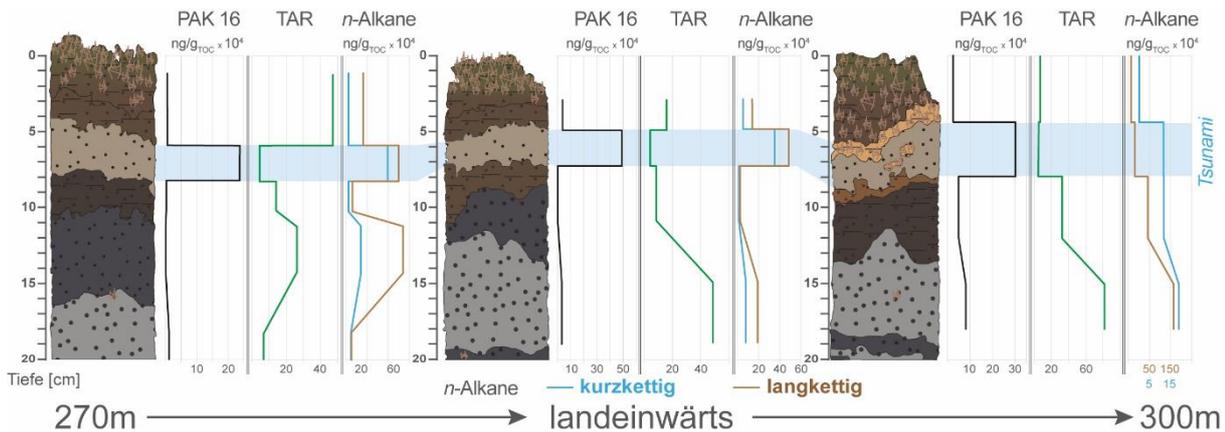
Die Zerstörung und Überschwemmung eines Küstengebiets, die das vorangegangene Erdbeben und der Tsunami verursachen, geht einher mit der Freisetzung und der weitflächigen Verteilung von Umweltschadstoffen. Neben Schwermetallen werden so organische Schadstoffe aus industriellen Anlagen, urbanen Bereichen und durch Erosion von vorbelasteten Sedimenten (z.B. landwirtschaftlich genutzte Böden) über weite Küstenbereiche bis zu 10 km landeinwärts verlagert, aber durch den Rückstrom auch bis auf den Kontinentalschelf verteilt. Dies konnte auf der Sendai-Ebene für den 2011 Tohoku-oki Tsunami veranschaulicht werden (Bellanova et al., 2019).

Anhand der Komposition und der Konzentrationsverteilung von biologischen organischen Stoffen, wie n-Alkanen, Terpenoiden, Fettsäuren sowie anthropogener Leitsubstanzen wie Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe, DDX oder verschiedenste Organohalogenide können Tsunamiablagerungen in Sedimentprofilen identifiziert und unterschieden werden (Shinozaki et al., 2016; Bellanova et al., 2019, 2020). Dies wurde an Sedimentprofilen der Regionen Sendai und Misawa (Japan), die beide stark durch den Tsunami 2011 betroffen waren, sowie an Sedimentschichtungen von historischen Tsunamis wie dem Jogan Tsunami im Jahr 896 getestet (Bellanova et al., 2020). Da der Tsunami diese Stoffe nicht nur landeinwärts, sondern auch landauswärts mit assoziiertem organischem Material transportiert (Abb. 1 & 2), kann so ein eindeutig identifizierbares Mischsignal aus unterschiedlichen Milieus und Schadstoffquellen entstehen. Dieses Mischsignal zeigt für zahlreiche der organischen Stoffe, vor allem für anthropogene Leitsubstanzen wie PAKs, Pestizide, halogenierte Stoffe, etc., signifikante Anreicherungen in den Tsunami-Ablagerungen (Abb. 3 & 4). Für die Sendai-Ebene konnte durchweg eine drastische Steigerung der Schadstoffbelastung, vor allem von PAKs und halogenierten Industrieprodukten (Abb. 4), nachgewiesen werden. Neben der reinen Identifikationsmöglichkeit der Ereignislagen zeigen diese die Gesamtheit der Zerstörung entlang eines Küstenabschnittes durch den Tsunami, aber auch die daraus resultierenden möglichen Gefahren für Mensch und Umwelt.

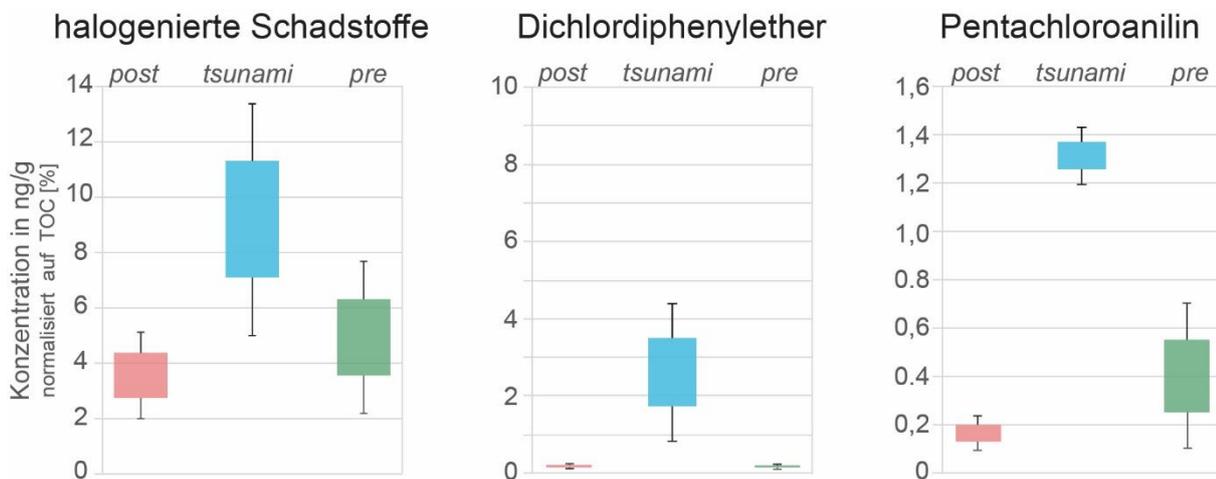
Zusätzlich zu dem anthropogenen Eintrag deuten natürliche terrestrische Komponenten (z.B. langkettige Alkane, Terpene, Fettsäuren etc.) durch ihre relative Abreicherung in den untersuchten Sedimenten auf den massiven Eintrag marinen Materials in den Tsunamiten hin. Umgekehrt verhält es sich bei Ablagerungen des Tsunami-Rückstroms in küstennahen Gewässern oder auf dem Schelf.



**Abb. 2:** Konzeptionelles Modell einer Tsunamiüberflutung, unterschieden nach natürlicher und urbaner Umgebung. **A)** Normales Küstenmilieu **B)** Tsunamiüberschwemmung mit ggf. mehreren aufeinanderfolgenden Wellen **C)** Kanalisierter Rückstrom entlang der Entwässerungssysteme (Flüsse, Kanäle) und Eintrag sedimentbeladener Wassermassen ins Meer **D)** Grenzen der Überschwemmung, des schwimmenden Treibguts, des feinen Materials (Schlamm) und des groben Sediments (Sand).



**Abb. 3:** Exemplarisches Konzentrationsprofil von PAKs (schwarz), terrestrisch/aquatisch Verhältnis (TAR – grün), sowie kurz-kettige und langkettige *n*-Alkan-Konzentrationen (blau und braun) in Sedimentprofilen eines Proben transekts in Misawa (Japan). Die vom 2011 Tohoku-oki hinterlassene Sedimentlage ist blau markiert.



**Abb. 4:** Verteilung von halogenierten anthropogenen Schadstoffen in der Sendai-Ebene (Japan) vor dem Tsunami (grün), in der Tsunami-Sediment-Lage (blau) und nach dem Tsunami (rot). Die Whisker stellen den gesamten Konzentrationsbereich dar, während die Boxen die 1σ Standardabweichung der Mediankonzentration darstellen.

Hier finden sich deutliche Anreicherungen der terrestrischen Marker, hervorgerufen durch den kurzzeitig gesteigerten Eintrag terrestrischen organischen Materials mit dem Tsunami. Der Rückstrom der Wassermassen begünstigt zudem auch einen gesteigerten Eintrag der persistenten anthropogenen Schadstoffe in marine Ökosysteme. Die durch die an Land verursachte Zerstörung und Überschwemmung, beispielsweise von urbanen Zentren und Infrastruktur, Hafen- und Industrieanlagen oder im Falle der Sendai-Ebene des Flughafens, werden jene Schadstoffe freigesetzt und können so meerwärts transportiert werden.

In Kombination von anthropogenen und natürlichen organischen Leitsubstanzen konnten erstmals Transportprozesse eines Tsunami wie der Transport von zuvor erodiertem Sediment (z.B. mit Pestiziden vorbelastet) bei der Überschwemmung der Küstengebiete und somit die Einordnung der Sedimentquellen, die tsunamigene Zerstörung und die darauf folgende Freisetzung von persistenten und toxischen Schad-

stoffen auf der Basis von organisch geochemischen Untersuchungen gezeigt werden.

### Ausblick und offene Forschungsfragen

Die Tsunamiforschung entfernt sich zunehmend von der reinen Identifizierung von Tsunamiten in sedimentären Archiven und nähert sich der Untersuchung und dem Verständnis von Mechanismen, was nur durch die Ergänzung mit komplexeren analytischen Ansätzen wie denen der organischen Geochemie möglich ist.

Diese Analysemethoden könnten bisher ungeklärte Prozesse wie die präferierte Strömungsrichtung und die visuell nicht eindeutig identifizierbaren Inundationsweiten des „Run-ups“ eines Tsunami durch Verteilungsmuster von persistenten organischen Schadstoffen entlang der überfluteten Küste endgültig aufklären und somit einen Beitrag zur Verbesserung des Küstenschutzes leisten. Geochemische Verteilungsmuster können die Zerstörung von Infrastruktur, Erosion von vorbelasteten Böden, die Auswaschung urbaner Räume an Land

und die Belastung von küstennahen und -fernen Sedimenten durch den Rückstrom über lange Zeiträume konservieren und lassen so eine Untersuchung auch von vergangenen, nicht vollständig aufgeklärten Ereignissen zu. Untersuchungen von extremen Naturereignissen im Offshore-Bereich sind zudem rar und verbleiben eine der zentralen offenen Forschungsgebiete der Tsunami-Forschung. Die noch nicht implementierte Organische Geochemie könnte dabei von großer Hilfe sein. Mit ersten Voruntersuchungen an Kernen, welche auf dem Algarve-Schelf (FS METEOR – Expedition 152) entnommen wurden, konnte die rezente Schadstoffverteilungen auf dem Schelf dokumentiert werden. Bemerkenswert ist jedoch die, auf natürlichen biologischen Komponenten (z.B., Terpene, Alkane, PAKs, Fettsäuren, etc.) basierende, erstmalige Entdeckung historischer Tsunami-Rückstromablagerung (z.B. des 1755 Lissabon-Tsunami) und die eines bisher unbekanntes Paläo-Ereignisses vor 3700 Jahren.

Mit nur wenigen Anwendungen hat die organische Geochemie bereits deutlich gemacht, welches bisher nicht ausgeschöpfte Potential sie für die zukünftige Erforschung von Naturgefahren mitbringt. Um ein umfassenderes Bild der Ereignisse zu liefern, aber vor allem, um die von ihnen ausgehenden Langzeitfolgen für Mensch und Umwelt aufzuzeigen, ist die Analyse der Verteilung (an Land und im Meer) von toxischen Schadstoffen ein vielversprechendes Werkzeug.

## Literaturverzeichnis

- Atwater, B.F.** (1987) Evidence for great Holocene earthquakes along the outer coast of Washington State. *Science*, **236**, 942-944.
- Bellanova, P., Frenken, M., Richmond, B., Schwarzbauer, J., La Selle, S., Griswold, F., Jaffe, B., Nelson, A., & Reicherter, K.** (2020) Organic geochemical investigation of far-field tsunami deposits of the Kahana Valley, O‘ahu, Hawai‘i. *Sedimentology*, **67**, 1230-1248.
- Bellanova, P., Frenken, M., Reicherter, K., Jaffe, B., Szczuciński, W., & Schwarzbauer, J.** (2020) Anthropogenic pollutants and biomarkers for the identification of 2011 Tohoku-oki tsunami deposits (Japan). *Marine Geology*, **422**, doi: j.margeo.2020.106117.
- Chagué-Goff, C., Andrew, A., Szczuciński, W., Goff, J., & Nishimura, Y.** (2012) Geochemical signatures up to the maximum inundation of the 2011 Tohoku-oki tsunami – implications for the 869 AD Jogan and other palaeotsunamis. *Sedimentary Geology*, **282**, 65-77.
- Dawson, A.G., Long, D., & Smith, D.E.** (1988) The Storegga slides: evidence from eastern Scotland for a possible tsunami. *Marine Geology*, **82**, 271-276.
- Dawson, A.G., & Stewart, I.** (2007) Tsunami deposits in the geological record. *Sedimentary Geology*, **200**, 166-183.
- Einsele, G., Chough, S. K., & Shiki, T.** (1996) Depositional events and their records - an introduction. *Sedimentary Geology*, **104**, 1-9.
- Fritz, H. M., Borrero, J. C., Synolakis, C. E., & Yoo, J.** (2006) 2004 Indian Ocean tsunami flow velocity

measurements from survivor videos. *Geophysical Research Letters*, **33**, doi: 10.1029/2006GL026784.

- Le Roux, J. P., & Vargas, G.** (2005). Hydraulic behavior of tsunami backflows: insights from their modern and ancient deposits. *Environmental Geology*, **49**, 65-75.
- Mori, N., Takahashi, T., Yasuda, T., & Yanagisawa, H.** (2011) Survey of 2011 Tohoku earthquake tsunami inundation and run-up. *Geophysical Research Letters*, **38**, doi: 10.1029/2011GL049210.
- Shinozaki, T., Sawai, Y., Hara, J., Ikehara, M., Matsumoto, D., & Tanigawa, K.** (2016) Geochemical characteristics of deposits from the 2011 Tohoku-oki tsunami at Hasunuma, Kujukuri coastal plain, Japan. *Island Arc*, **25**, 350-368.

## Korrespondenzadresse

Dr. Piero Bellanova  
 Labor für Organisch-Geochemische Analytik  
 Institut für Geologie und Geochemie von Petroleum und Kohle  
 RWTH Aachen  
 Lochnerstr. 4-20  
 52056 Aachen  
 Tel.: 0241 80 95756  
 Email: [piero.bellanova@emr.rwth-aachen.de](mailto:piero.bellanova@emr.rwth-aachen.de)