

# Interaktive Visualisierung des Meeresspiegelanstiegs am Beispiel von Norddeutschland

Ein Beitrag von CAROLINE SCHULDT, GÜREN TAN DINGA und PHILIPP LOOSE

Erkenntnisse und Ergebnisse aus Forschungsvorhaben werden in der Regel durch Veröffentlichungen von Artikeln in Fachzeitschriften und Vorträgen auf fachspezifischen Konferenzen transferiert. Um Ergebnisse auch außerhalb der Fachwelt verständlich zu präsentieren, müssen diese für die Öffentlichkeit verständlich aufgearbeitet werden. Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird ein Ansatz gezeigt, welcher Ergebnisse aus dem gesellschaftsrelevanten Bereich des Meeresspiegelanstiegs visuell und interaktiv präsentiert. Basierend auf Berechnungen zum Meeresspiegelanstieg im Jahr 2100 wird eine interaktive Webkarte entwickelt. Die Daten hierfür werden über einen Web Feature Service bereitgestellt. Die Webkarte bildet Überflutungsflächen verschiedener Klimaszenarien des IPCC ab und zeigt die Anzahl an betroffenen Personen in Norddeutschland. Auf diese Weise wird ermöglicht, sich niedrigschwellig einen Überblick über die Risiken und Auswirkungen des klimawandelbedingten Meeresspiegelanstiegs zu machen.

Klimawandel | Meeresspiegelanstieg | Visualisierung | interaktive Karten  
climate change | sea level rise | visualisation | interactive maps

Findings and results from research projects are usually transferred through the publication of articles in scientific journals and presentations at conferences for professionals. In order to present results in a comprehensible way outside of the professional community, they have to be processed and presented in a way that is understandable to the public. This publication proposes an approach that presents results from the society-relevant field of sea level rise in a visual and interactive way. Based on calculations of sea level rise in the year 2100, an interactive web map is developed. The data for the web map are provided by a web feature service. The web map displays flooded areas of different climate scenarios of the IPCC and shows the number of affected people in northern Germany. In this way, it is possible to get a clear overview of the risks and impacts of climate change-induced sea level rise.

## Autoren

Caroline Schuldt und Güren Tan Dinga sind wissenschaftliche Mitarbeiter an der Hafencity Universität (HCU) in Hamburg.

Philipp Loose ist Software-Entwickler bei der DEMV Systems GmbH in Hamburg und ehemaliger wissenschaftlicher Mitarbeiter der HCU.

[sealevel@hcu-hamburg.de](mailto:sealevel@hcu-hamburg.de)

## 1 Einleitung

Die weltweiten Bedrohungen, die durch den klimawandelbedingten Meeresspiegelanstieg entstehen, sind enorm (Nicholls et al. 2017) und führen zu einer verstärkten Berichterstattung in den Medien. Das Bewusstsein der Öffentlichkeit scheint so groß wie nie zuvor und das Generieren und Verbreiten neuer Erkenntnisse, die die Lücke zwischen Forschung und Öffentlichkeit weiter schließen, umso wichtiger. Die an den Küsten lebende Bevölkerung, Entscheidungsträger:innen in den Bereichen Entwicklungsplanung und Landnutzung sowie Naturschutzagenturen benötigen wissenschaftliche Simulationen, wie sich der Meeresspiegelanstieg auf ihren Lebensraum auswirken wird. Ausgehend von einer solchen Simulation können Gebiete identifiziert werden, die vom ansteigenden Meeresspiegel bedroht sind. So kann ein Eindruck über die Größenord-

nung der möglichen Veränderungen vermittelt werden (Schuldt 2019). Darüber hinaus ist eine Visualisierung wissenschaftlicher Erkenntnisse zum Meeresspiegelanstieg, die die abstrakt wirkenden Folgen und Risiken zugänglich macht, auch für die breite Öffentlichkeit relevant.

Akademische Abschlussarbeiten, welche gesellschaftsrelevante Themen bearbeiten, erreichen zumeist nur einen kleinen Personenkreis und somit auch die daraus hervorgehenden Forschungsergebnisse. Um Wissenslücken zwischen Expert:innen und fachfremden Personen zu schließen und um Erkenntnisse für die Öffentlichkeit darzustellen, wird der simulierte Meeresspiegelanstieg in Norddeutschland für das Jahr 2100 als interaktive Webkarte visualisiert. Durch Visualisierungen und abgeleitete Parameter wie die Höhe der betroffenen Population oder das visuelle Hervorheben überfluteter Flächen

können andernfalls abstrakt wirkende Kennzahlen greifbar gemacht werden.

## 2 Simulation des Meeresspiegelanstiegs

Die entwickelte Webanwendung basiert auf einer Simulation des Meeresspiegelanstiegs für das Jahr 2100. Im Folgenden werden die Faktoren beschrieben, die in die Simulation einfließen und die Datengrundlage darstellen. Im Anschluss wird das methodische Vorgehen der GIS-basierten Simulation erläutert.

### 2.1 Einflussfaktoren

Um das komplexe System eines ansteigenden Meeresspiegels so genau wie möglich zu modellieren, werden verschiedene Faktoren betrachtet. Neben der Genauigkeit spielen vor allem die regionalen Gegebenheiten eine Rolle, die in die Simulation integriert werden. Zur Charakterisierung der Landoberfläche wird ein digitales Höhenmodell (DEM, digital elevation model) genutzt. Das der Arbeit zugrunde liegende DEM besteht aus Daten der TanDEM-X-Mission, die sich durch ihre homogene Qualität und bisher unerreichte Genauigkeit auszeichnen (DLR 2018). Die Höhenwerte repräsentieren die ellipsoidischen Höhen von WGS84. Zusätzlich wird ein zweites DEM erstellt, das von Deichen bereinigt ist. Dafür werden alle Deiche, die im DEM enthalten sind, identifiziert und mittels einer Rasterberechnung in ihrer Höhe reduziert.

Da das DEM nur die Landoberfläche beschreibt, muss zudem die Wasserfläche modelliert werden, um als Grundlage für den ansteigenden Meeresspiegel zu dienen. Die Höhe des Meeresspiegels wird in Meter über Normalhöhennull angegeben und bezieht sich auf das Deutsche Haupthöhennetz DHHN92. Da der Meeresspiegel regional variiert, fließt in die Modellierung der mittlere höchste Wert der Wasserstände in einer Zeitspanne ein. Durch die Nutzung des Mittelwertes ist sichergestellt, dass keine monats-, tages- oder uhrzeitabhängigen Werte den aktuellen Wasserstand und damit die Simulation verfälschen. Für die Nord- und Ostsee liegen Messungen aus 165 Stationen vor (Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung 2019), die mittels Inverser Distanzwichtung (IDW) zu einem flächendeckenden Meeresspiegel interpoliert werden.

Der nächste wesentliche Faktor zur Simulation des Meeresspiegelanstiegs ist die Vorhersage der Höhe der zukünftigen Meeresoberfläche (Church et al. 2013). Basierend auf den Klimaszenarien des Weltklimarats IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), werden regionale Prognosen auf das deutsche Küstengebiet erstellt. Für die vorliegende Arbeit werden die fünf Eiskomponenten (dynamisches Eis und Oberflächenmassenausgleich in Grönland, dynamisches Eis und Oberflächenmassenausgleich in der Antarktis

sowie Gletscher), die drei ozeanbezogenen Komponenten (dynamische Meeresoberflächenhöhe, globale thermosterische Anomalien und inverser Barometereffekt aus der Atmosphäre) sowie Landwasserspeicher zur Ermittlung der Prognosen für Nord- und Ostsee berücksichtigt. Für das gemäßigte Szenario RCP4.5 konnte ein Anstieg der relativen Meeresoberfläche im Jahr 2100 der Nordsee von ca. 0,49 m und der Ostsee von ca. 0,47 m identifiziert werden. Beim Szenario RCP8.5 liegt der Mittelwert der zukünftigen Meeresoberfläche der Nordsee bei 0,72 m und der Ostsee bei 0,73 m (ICDC 2019). Da es seit der Veröffentlichung des IPCC-Berichts 2013 neue Erkenntnisse gibt, die von einem höheren Meeresspiegelanstieg ausgehen (Bamber et al. 2019; Gornitz et al. 2019; Jevrejeva et al. 2016; Sweet et al. 2017; Wright et al. 2019), wird die Simulation auch für einen Anstieg um 1,4 m durchgeführt.

Zur Änderung des relativen Meeresspiegelanstiegs gehören neben der ansteigenden Meeresoberfläche auch Änderungen in der Höhe der Landfläche. Diese vertikale Landbewegung kann auf der einen Seite durch Küstenerhöhungen den klimawandelbedingten Meeresspiegelanstieg abschwächen. Auf der anderen Seite wird durch das Absinken der Landmassen der Meeresspiegelanstieg verstärkt (Hanson et al. 2011). Aus diesem Grund weicht der Meeresspiegelanstieg lokal von den Prognosen ab. Für die vorliegende Arbeit werden Daten der URL6a-GPS-Lösung verwendet, bei der GPS-Daten von 1995 bis 2014 analysiert wurden (Santamaría-Gómez et al. 2017), und mittels IDW interpoliert.

Um die vorgestellten Faktoren in einer Simulation zusammenzuführen, müssen die Faktoren physisch sinnvolle Höhen vorweisen. Besonders für Höhenangaben eignet sich das Geoid, die Äquipotenzialfläche des Erdschwerefelds, die dem mittleren Meeresspiegel im Sinne der kleinsten Quadrate annähernd gleicht. Aus diesem Grund werden die unterschiedlichen Höhensysteme der Einflussfaktoren zu den Geoidhöhen des Modells EGM96 transformiert.

### 2.2 Identifikation von Überflutungsflächen

Auf Basis der vorgestellten Faktoren wird der Meeresspiegel für das Jahr 2100 simuliert. Die Simulation wird im Geoinformationssystem ArcMap und mit Hilfe der Programmiersprache Python durchgeführt. In einer Rasterberechnung werden der aktuelle Meeresspiegel (MS), die Prognose zum Meeresspiegelanstieg (MSA), die vertikale Landbewegung (VLM, vertical land motion) und das DEM kombiniert, um die unter dem zukünftigen Meeresspiegel liegende Fläche zu erhalten. Dies erfolgt nach der Ungleichung:

$$\text{DEM} + \text{VLM} \leq \text{MS} + \text{MSA}.$$

Szenario basierend auf IPCC-Prognosen	Nordsee		Ostsee	
	Fläche (km <sup>2</sup> )	Bevölkerung	Fläche (km <sup>2</sup> )	Bevölkerung
RCP4,5 (mittlerer Anstieg um 1,8 °C) mit Küstenschutz	476	1400	585	4077
RCP8,5 (mittlerer Anstieg um 3,7 °C) mit Küstenschutz	513	1654	644	5982
RCP8,5 (mittlerer Anstieg um 3,7 °C) ohne Küstenschutz	8096	619 317	908	7563

**Tabelle 1:** Landfläche und Bevölkerung, die dem Meeresspiegelanstieg in verschiedenen Szenarien ausgesetzt sind

Nach dem entwickelten Raster werden alle Flächen, die unterhalb des prognostizierten Meeresspiegels liegen, potenziell überflutet. Das führt zu Seen im Landesinneren, die es aufgrund der fehlenden Verbindung zum Meer in der Realität nicht gibt. Aus diesem Grund wird im nächsten Schritt eine iterative Selektion durchgeführt, welche diejenigen Flächen des Datensatzes auswählt, die eine auf Basis des DEM kreierte Küstenlinie berühren.

Aufbauend auf den identifizierten Überflutungsgebieten werden die sozioökonomischen Folgen anhand von Bevölkerungs- und Landnutzungsdaten ermittelt (vgl. Tabelle 1). Bei der Berechnung der Überflutungsflächen zeigen sich gravierende Unterschiede – zum einen zwischen Nord- und Ostseeküste, zum anderen zwischen den verschiedenen Klimaszenarien, besonders aber zwischen der Annahme eines standhaltenden Küstenschutzes und eines Deichbruchs.

### 3 Technische Umsetzung

Die im Kapitel 2 erläuterten Daten müssen zunächst für die interaktive Darstellung in Webbrowsern aufbereitet werden. Insbesondere die zur

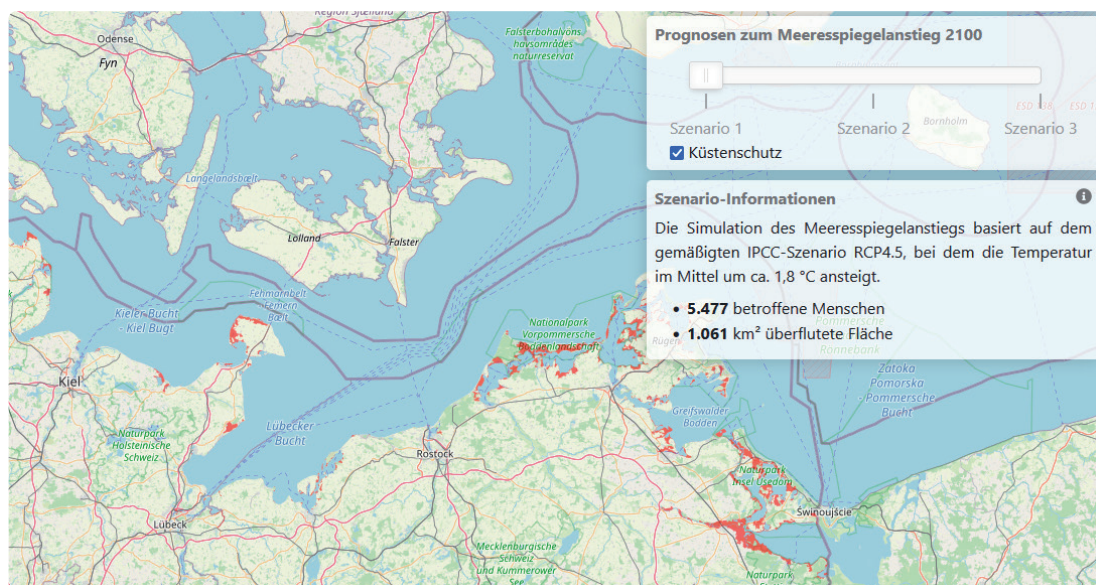
Visualisierung der potenziell gefährdeten Überflutungsflächen benötigten Daten verhindern aufgrund ihres Volumens eine flüssige und dynamische Visualisierung im Webbrowser. Entsprechend wurde der Datenbestand mit Hilfe der frei verfügbaren Mapserver-Software GeoServer (<http://geoserver.org>) in gleichgroße, quadratische Elemente aufgeteilt. Diese Kacheln (tiles) werden bei entsprechender Zoomstufe über den Webbrowser angefragt und durch einen Web Feature Service (WFS) bereitgestellt. Die aus zahlreichen Zoomstufen und dem Ausmaß des Untersuchungsraums resultierenden Kacheln werden vorberechnet und während der Betrachtung gespeichert (tile caching). Dadurch wird Nutzer:innen selbst bei einer Vielzahl einzelner Kacheln eine möglichst performante Visualisierung angeboten. Dies ermöglicht das flüssige Betrachten diverser Zoomstufen und Kartenzustände.

Zur Visualisierung wird die JavaScript-Bibliothek LeafletJS (<https://leafletjs.com>) verwendet. Leaflet bietet keine interne Schnittstelle zum Laden von Shape-Dateien, und den gesamten Untersuchungsraum mit sämtlichen Zoomstufen im GeoJSON-Format zu laden, würde zu viel Zeit in Anspruch nehmen. Dementsprechend wird auf den zuvor mit GeoServer eingerichteten WFS zurückgegriffen, um die Basiskarte in Form von Rasterkacheln darzustellen, deren Ladegeschwindigkeit durch den Cache (also die zwischengespeicherten vorberechneten Kacheln) beschleunigt wird. Zudem werden ressourcenschonend ausschließlich Teile der Karte geladen, die zu dem jeweiligen Zeitpunkt für Nutzer:innen sichtbar sind.

Sowohl die Webseite zur Übersicht als auch die Seite, auf welcher die Karte visualisiert wird, fragen die Bildschirmbreite ab, um die geeigneten



**Abb. 1:** Anpassung der Position der Bedienungs- und Informationselemente im mobilen Webbrowser (links) und im Desktop-Webbrowser (rechts)



**Abb. 2:** Mit Hilfe der Webanwendung können diverse Überflutungsszenarien visualisiert werden. Weitere Szenario-Informationen beinhalten unter anderem die Menge betroffener Menschen und die Summe der überfluteten Fläche

Elemente entsprechend organisieren zu können. So wird eine reibungslose Bedienung auf mobilen Endgeräten mit kleinen Bildschirmgrößen ermöglicht. Dabei erstreckt sich der Slider zur Auswahl der Überflutungsszenarien über den gesamten Bildschirm. Die Szenario-Informationen verschieben sich an den unteren Bildschirmrand, sodass die Karte betrachtet werden kann (vgl. [Abb. 1](#)). Ist ein Szenario geladen, wird dieses im Cache (Zwischenspeicher) abgelegt. So wird bei einem Wechsel zwischen Szenarien keine Abfrage an den Webserver gestellt, und den Nutzer:innen wird ein unmittelbares Durchschalten und Vergleichen zwischen Szenarien ermöglicht, ohne erneut Daten herunterzuladen zu müssen.

#### 4 Ergebnisse

Die Webanwendung (<https://sealevelrise.hcu-hamburg.de>) listet neben allgemeinen Informationen zum Projekt eine Weiterleitung zur interaktiven Karte und Kontaktmöglichkeiten. Auf der interaktiven Karte wird zunächst die Prognose zum Meeresspiegelanstieg für das Jahr 2100 unter Berücksichtigung des Küstenschutzes präsentiert. Weitere Szenario-Informationen geben das entsprechende Klimaszenario preis und schildern kurz, um welches Maß die Temperaturen für das jeweilige Szenario steigen. Ferner werden ungefähre Angaben zur Menge der betroffenen Menschen sowie zur überfluteten Fläche gemacht.

Über einen Informations-Button gelangen Nutzer:innen zu weiterführenden Informationen zum Weltklimarat (IPCC) und den sogenannten Representative Concentration Pathways (RCP). Neben einer kurzen Übersicht zu den Einflussfaktoren für die Simulation, wie dem zugrunde liegenden Höhenmodell oder der vertikalen Landbewegung,

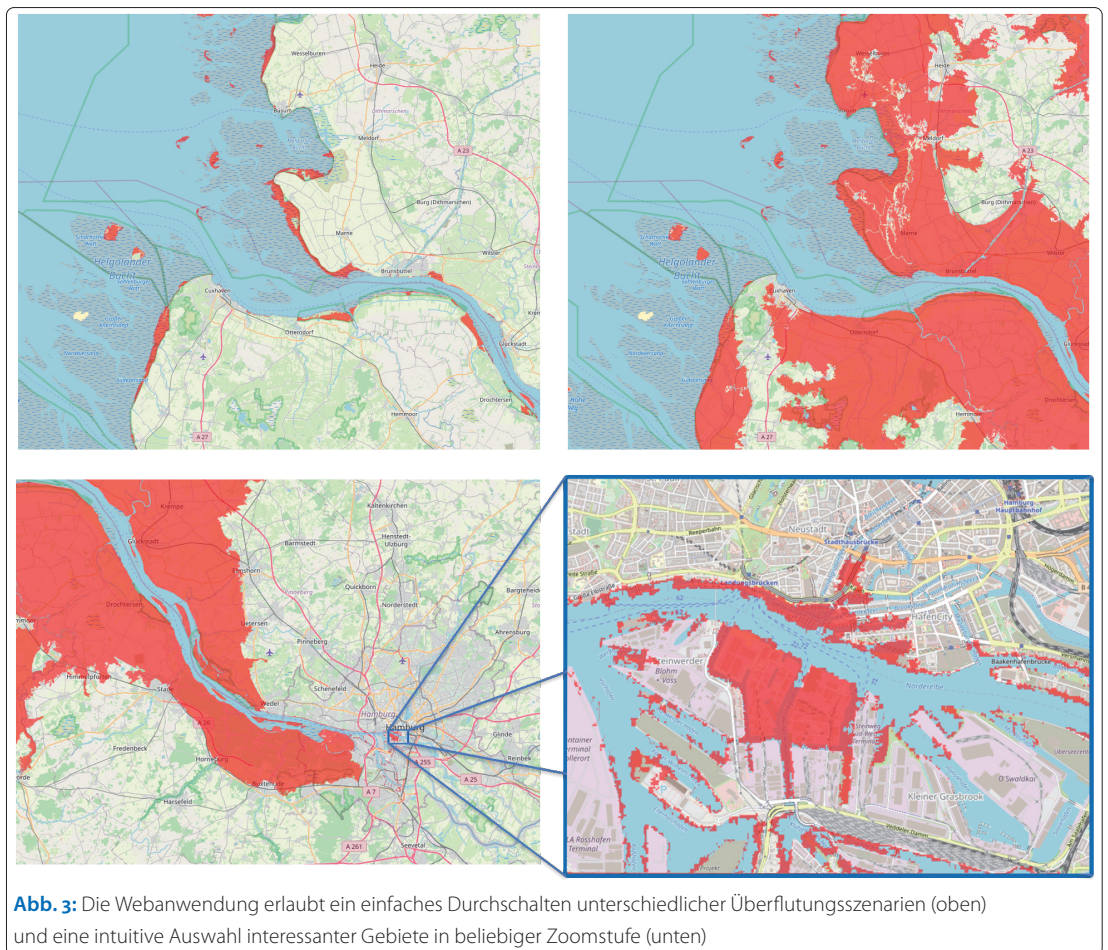
werden Verweise auf wissenschaftliche Publikationen gelistet.

Über einen Schieberegler im rechten oberen Bereich der Karte können Nutzer:innen die Visualisierung der Überflutungsszenarien anpassen (vgl. [Abb. 2](#)). Neben dem Wechsel zwischen den bereits genannten Szenarien (RCP 4.5, RCP 8.5 und Meeresspiegelanstieg um 1,4 m) bietet ein Kontrollkästchen die Möglichkeit einzustellen, ob die Visualisierung der Simulation mit oder ohne Küstenschutz geschehen soll. Die Betätigung des entsprechenden Kästchens führt zu einer Visualisierung der überschwemmten Landfläche für den Fall, dass Deiche brechen und der Küstenschutz versagt. Die Webanwendung ermöglicht somit Vergleiche zwischen drei unterschiedlichen Szenarien, jeweils mit und ohne Küstenschutz.

Während der Fokus der interaktiven Karte zunächst auf einer großflächigen Darstellung der potenziellen Überflutungsgebiete liegt, können Nutzer:innen die Zoomstufe flexibel anpassen. Neben der Anpassung der spezifischen Szenarien wird so ein Mehrwert gegenüber statischen Karten generiert (vgl. [Abb. 3](#)).

#### 5 Fazit und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, eine Webanwendung auf Basis einer bereits abgeschlossenen wissenschaftlichen Arbeit zu entwickeln. Dabei lag der Fokus vorwiegend auf der Veröffentlichung und dem Zugänglichmachen von Forschungsergebnissen, sodass diese auch ohne Fachwissen interpretiert werden können. Besucher:innen der Website können sich einen Überblick verschaffen, wie der prognostizierte Meeresspiegelanstieg im Jahr 2100 die Küste Norddeutschlands und ihre Bevölkerung betrifft. Zeitgleich wurde auf weiterführenden



**Abb. 3:** Die Webanwendung erlaubt ein einfaches Durchschalten unterschiedlicher Überflutungsszenarien (oben) und eine intuitive Auswahl interessanter Gebiete in beliebiger Zoomstufe (unten)

de Literatur hingewiesen, sodass für interessierte Besucher:innen die Möglichkeit besteht, weitere Informationen zu der Datengrundlage und Vorgehensweise einzusehen.

Die Webanwendung soll zukünftig unter Berücksichtigung von Usability-Tests und User-Feedback weiterentwickelt werden. Dabei steht eine verbesserte Visualisierung mit dem Fokus auf die Lesbarkeit der interaktiven Karte sowie der Hervorhebung von Hotspots im Fokus. Insbesondere das Hervorheben von Hotspots ermöglicht

das Ausarbeiten von Konzepten zu interaktiven Führungen durch die Karte. Dabei können zum Beispiel stark betroffene Regionen durch einen kleineren Maßstab hervorgehoben und im Hinblick auf ihre Statistiken in den unterschiedlichen Szenarien diskutiert werden. Weiterhin ist geplant, Auswertungen unter Berücksichtigung der Landnutzungsklassen in die Webkarte zu integrieren, um zu visualisieren, zu welchen Anteilen Grünflächen und besiedelte, industriell genutzte Flächen betroffen wären. //

### Literatur

Bamber, Jonathan L.; Michael Oppenheimer; Robert E. Kopp et al. (2019): Ice sheet contributions to future sea-level rise from structured expert judgment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, DOI: 10.1073/pnas.1817205116

Church, John A.; Peter U. Clark; Anny Cazenave et al. (2013): Sea Level Change. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Inter-governmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, New York, pp. 1139–1216

DLR (2018): TanDEM-X – Die Erde in drei Dimensionen. URL: [www.dlr.de/content/de/missionen/tandem-x.html](http://www.dlr.de/content/de/missionen/tandem-x.html)

Gornitz, Vivien; Michael Oppenheimer; Robert E. Kopp et al. (2019): New York City Panel on Climate Change 2019 Report. *Annals of the New York Academy of Sciences*, DOI: 10.1111/nyas.14008

Hanson, Susan; Robert Nicholls; N. Ranger et al. (2011): A global ranking of port cities with high exposure to climate extremes. *Climatic change*, DOI: 10.1007/s10584-010-9977-4

ICDC (2019): Live Access Server. URL: <http://icdc.cen.uni-hamburg.de/las/getUI.do>

Jevrejeva, Svetlana; Luke P. Jackson; Riccardo E.M. Riva et al. (2016): Coastal sea level rise with warming above 2 °C. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, DOI: 10.1073/pnas.1605312113

Nicholls, Robert J.; Poh Poh Wong; Virginia Burkett et al. (2007): Coastal systems and low-lying areas. In: Climate Change 2007: Impacts, Adaption and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 315–356

Santamaría-Gómez, Alvaro; Médéric Gravelle; Sönke Dangendorf et al. (2017): Uncertainty of the 20th century sea-level rise due to vertical land motion errors. Earth and Planetary Science Letters, DOI: 10.1016/j.epsl.2017.05.038

Schuldt, Caroline; Jochen Schiewe; Johannes Kröger (2020): Sea-Level Rise in Northern Germany: A GIS-Based

Simulation and Visualization. KN – Journal of Cartography and Geographic Information, DOI: 10.1007/s42489-020-00059-8

Sweet, William; Robert E. Kopp; Christopher P. Weaver et al. (2017): Global and Regional Sea Level Rise Scenarios for the United States. NOAA Tech Report NOS CO-OPS, DOI: 10.7289/v5/tr-nos-coops-083

Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (2019): Pegelonline. URL: [www.pegelonline.wsv.de/gast/hilfe](http://www.pegelonline.wsv.de/gast/hilfe)

Wright, Lynn Donelson; J. P. M. Syvitski; C. Reid Nichols (2019): Sea level rise: Recent trends and future projections. In: Tomorrow's Coasts: Complex and Impermanent. Springer, Cham, DOI: 10.1007/978-3-319-75453-6\_3

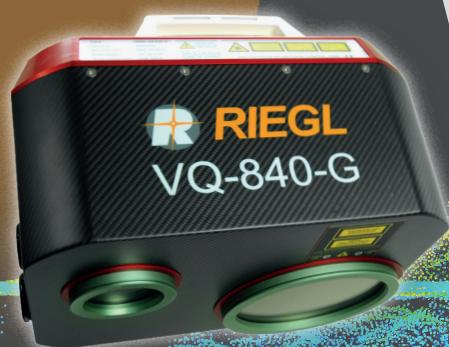
#### Website und Quellcode

Die Webseite ist erreichbar unter: <https://sealevelrise.hcu-hamburg.de>

Der Quellcode ist erreichbar unter: <https://gitlab.com/g2lab/sealevel2100>

# RIEGL VQ-840-G

## TOPO-BATHYMETRISCHER LASERSCANNER



- ideal für die Datenaufnahme von UAVs oder Helikoptern aus
- grüner Laserstrahl mit mehr als 2 Secchi Tiefen Wasserdurchdringung
- Messrate von 50 kHz bis zu 200 kHz
- hochauflösende Digitalkamera und INS/GNSS System vollintegriert

UAV-BASIERTE VERMESSUNG VON  
KÜSTENGEBIETEN UND FLACHWASSERZONEN



QR-Code  
scannen und  
RIEGL VQ-840-G  
Video ansehen!

[www.riegl.com](http://www.riegl.com)

Weitere topo-bathymetrische Laserscanner  
und Systeme finden Sie auf [www.riegl.com](http://www.riegl.com)

[f](#) [t](#) [in](#) [w](#) [y](#) [t](#) [v](#) [e](#) [n](#) [e](#) [n](#) [s](#) [r](#) [o](#) [o](#) [m](#) [.riegl.international](#)



Besuchen Sie uns

Hydrographentag 2022  
14. bis 16. Juni, 2022  
Bremerhaven, Deutschland  
RIEGL Messestand Nr. 11



**RIEGL**<sup>®</sup>