

# Klimabedingte Veränderungen der zukünftigen Belastungen bei Sturmfluten an der Nordseeküste

## - Folgen für die Küstenstädte Hamburg und Bremen -

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen\*

Diese pdf-Version wurde gegenüber dem Originalvortrag geringfügig modifiziert.

\*) mit Unterstützung von Simon Beckmann, B. Sc.

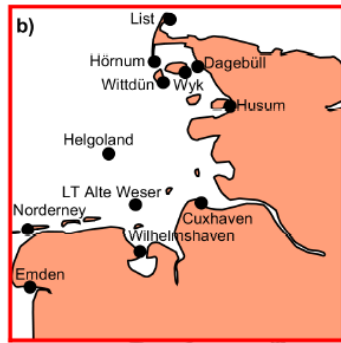
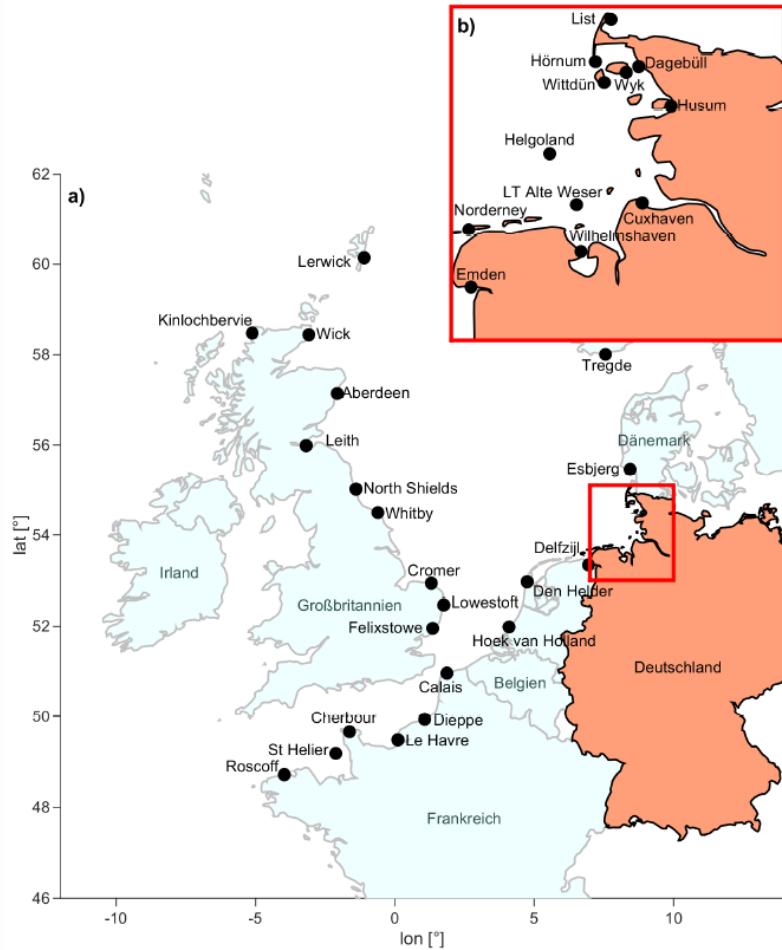


# Inhalt

- Nordsee - Nordseeküsten - Hamburg - Bremen
- Klimawandel und Meeresspiegelanstieg
- Sturmfluten und Küstenschutz
- Hochwasser Hamburg und Bremen
- Herausforderungen
- Folgen des Klimawandels

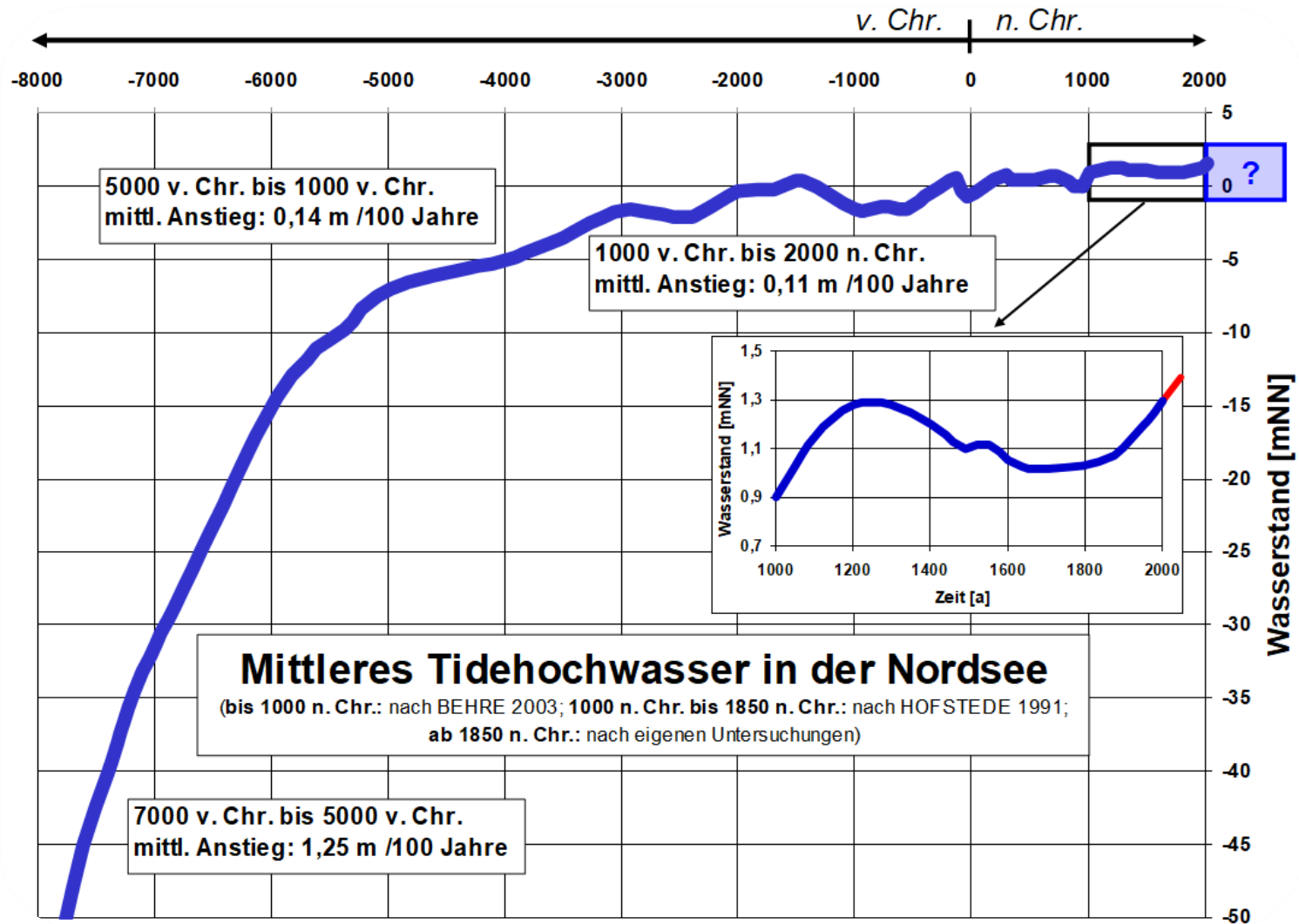


# Nordsee - Hamburg - Bremen



Elbe-/Weserästuar mit Hamburg und Bremen

# Klimawandel und Meeresspiegelanstieg



# Sturmfluten und Meeresspiegelanstieg

- Am Ende der letzten Eiszeit lag der Meeresspiegel weltweit etwa 100 m tiefer als heute
- Südlicher Teil der jetzigen Nordsee war festes Land
- Als es wärmer wurde, schmolz das Eis und der Meeresspiegel stieg an
- Das Meer überflutete das flache Küstenland (Landsenkung)
- Gleichzeitig wurden in dem seichten Meer Sedimente/Schlick abgelagert  
→ Wattflächen





# Sturmfluten und Meeresspiegelanstieg

**Sylt vor 1362**  
(Danckwerth 1652)



**Sylt vor 1634**  
(Danckwerth 1652)



**Sylt 1793**  
(Bugge u. Wilster 1805)

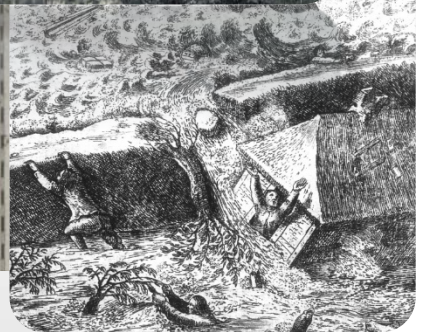


**Sylt heute**  
([www.sylt.citysam.de](http://www.sylt.citysam.de))





# Sturmfluten und Meeresspiegelanstieg



Sonnabend, 8. Juni 1985 Celle'sche Zeitung - Seite 9

## Meeresspiegel alarmierend angestiegen – Bedrohung für die Deichsicherheit

**In 25 Jahren 16 Zentimeter: Sind von Menschen verursachte Klimaveränderungen der Grund?**

**KIEL/BRAUNSCHWEIG (Int).** – Der Meeresspiegel an der deutschen Nordseeküste hat sich in den vergangenen 25 Jahren dramatisch erhöht. In der Deutschen Bucht ist das mittlere Hochwasser in diesem Zeitraum um 16 Zentimeter gestiegen. Mit dieser für die Deichsicherheit alarmierenden Beobachtung ist jetzt der Wasserbauingenieur Professor Alfred Führbötter vom Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig an die Öffentlichkeit getreten.

Häufen. Er bedeutet, daß bereits heute die Sicherheitsreserve, die für die Bemessung der Deichhöhen gültig ist, zu mehr als zwei Dritteln aufgebraucht ist.

Professor Führbötter stützt seine Beobachtungen auf die Auswertung von zehn Pegelmessstationen an der deutschen Nordseeküste. Drei liegen auf den Inseln Borkum, Norderney und Sylt, vier an den Flußmündungen bei Emden, Wilhelmshaven, Bremerhaven und Cuxhaven und drei in den Häfen Büsum, Husum und Dagebüll. Das Zahlenmaterial reicht zurück bis in das Jahr 1855.

Die über 100 Jahre gemittelten Hochwasserstände bestätigen zwar den alten Wert von 25 Zentimetern pro Jahrhundert, Führbötter fand jedoch gerade für die letzten 25 Jahre vor 1985 (bis dahin reichen seine Meßreihen) den starken Meeresspiegelanstieg. Diese Entwicklung weist eine steigende Tendenz auf.

Das Institut von Professor Führbötter vorangehenden Zeitalters. Das Vorkommen von Sturmfluten überlagert werden.

Ein weiterer Anstieg des Meeresspiegels in der von Führbötter untersuchten Größenordnung würde über Skagerrak und Ostsee hinein wirken.

gen auf die Deichsicherungen, sondern würde auch den Sockel zahlreicher Inseln angreifen und großflächige Erosionen im Wattenmeer nach sich ziehen. Auf der Kieler Tagung legte er Zahlen vor, wonach sich der Küstenrückgang auf Sylt seit 1950 etwa verdreifacht habe. Die Küfflabrüche hätten von durchschnittlich 0,5 Metern auf 1,5 Meter pro Jahr zugenommen.

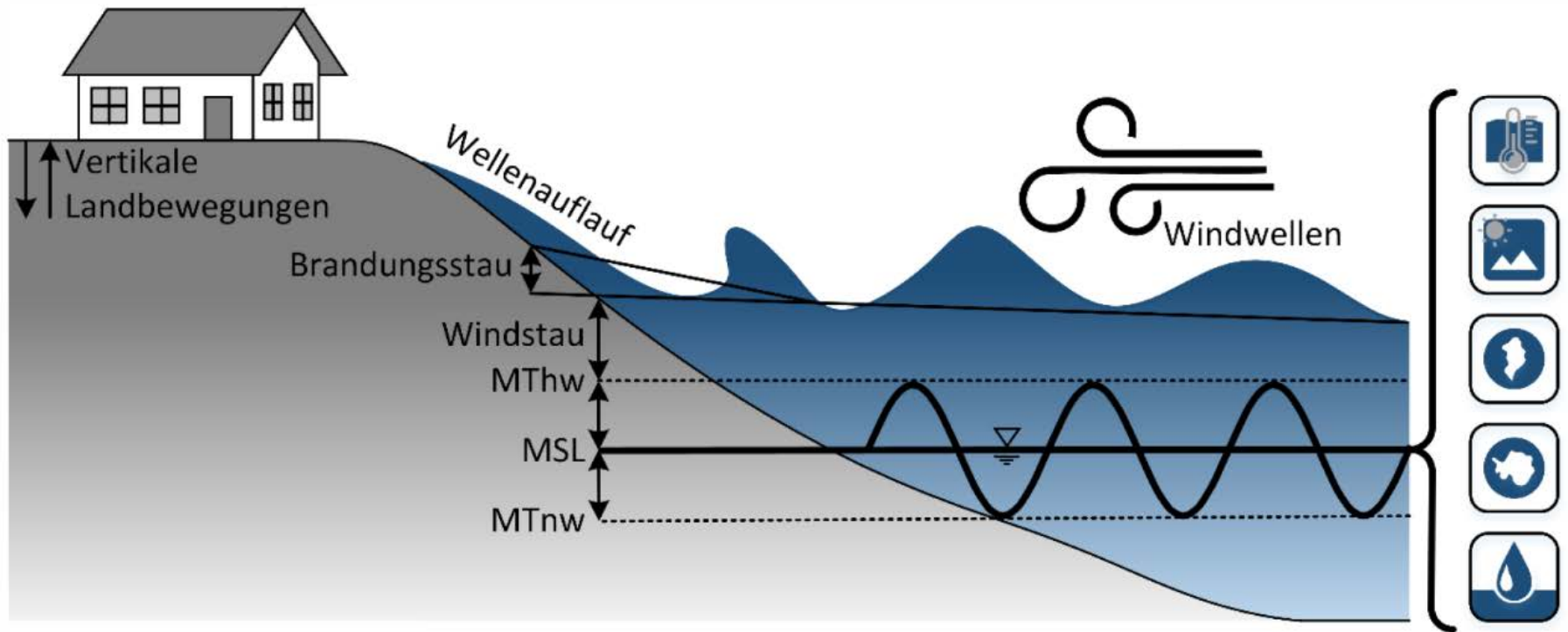
Bei Sturmfluten könnten wegen der größeren Wassertiefe höhere und damit energiereichere Wellen als bisher bis zum Deich vordringen und unabhärbare Schäden anrichten. Die größeren Wassermengen vor der Küste führen in den Prielen und Schiffahrtsrinnen zu höheren Strömungsgeschwindigkeiten, die eine unerwünschte Verlagerung und Ausräumung der Wasserstraten bewirken können. Die Abnahme des Niedrigwassers würde Schiffe mit großem Tiefgang behindern.

Führbötter stellte fest, daß Jahren mit hohen Wasserständen an der Nordsee im allgemeinen auch die Jahre mit den stärksten Sturmfluten sind. Das ist ein Hinweis auf die Zusammenhänge der mittleren Wasserstände an der Nordsee nicht allein den Raum der Deutschen Bucht erfassen, sondern auch die Auswirkungen über Skagerrak und Ostsee hinein wirken.

**60 cm MThw-Anstieg in 100 Jahren (Führbötter und Jensen, 1985)**



# Prozesse Wasserstände/Sturmfluten



MSL = f (Temperatur/Dichte, Gletscher, Grönland, Antarktis, Zuflüsse)

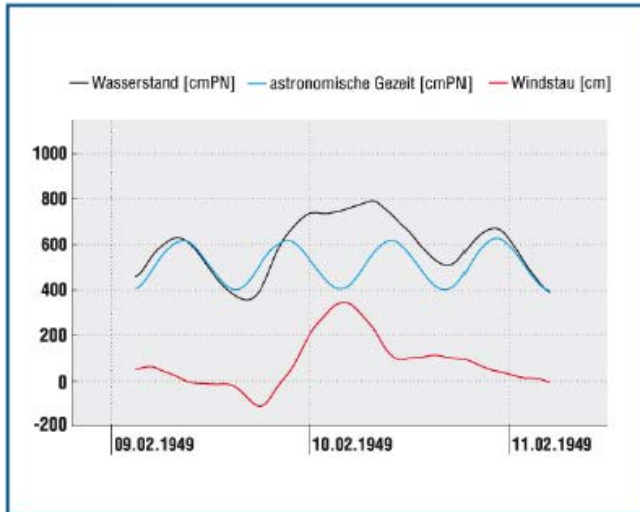


# Sturmfluten und Küstenschutz

- .....
- 120/115 v. Chr.                   sog. „Cimbrische Flut“ (ggf. auch 340 v. Chr.)
- 16.01.1362                        Zweite Marcellusflut, Ostfriesland bis Nordfriesland
- 01.11.1570                        Vierte Allerheiligenflut, Flandern bis Eiderstedt
- 26.02.1625                        Fastnachtsflut, Südholland bis Jütland
- 11.10.1634                        Zweite Mandränke, Schleswig-Holstein
- 12.11.1686                        Martinsflut, Groningen bis Land Wursten
- 24./25.12.1717                    Weihnachtsflut, Halligen
- 03./04.02.1825                   Halligflut, bis heute höchste Wasserstände auf den Halligen
- 01.-04.1.1855                    Januarflut, Ostfriesland
- 13.03.1906                        Märzflut, Ostfriesland
- 31.01./01.02.1953                Hollandflut, Niederlande und England
- 16./17.02.1962                    Katastrophensturmflut, Ostfriesland bis Nordfriesland
- 03./04.01.1976                   Januarflut, Niedersachsen und Schleswig-Holstein (HHThw)
- 24.11.1981                        HHThw im Norden Schleswig-Holsteins
- 29./30.01.2000                   Dänemark, erhebliche Sandverluste auf Sylt (Kliff)
- 01.11.2006                        Sturmflut (HHThw in Emden)
- 09.11.2007                        Sturmtief „Tilo“
- 05./06.12.2013                   Orkan „Xaver“
- .....

# Sturmfluten und Küstenschutz

## Ebbflut



<b>Datum</b>	10.02.1949
<b>Gebiet</b>	schlesw.-holstein. Küste
<b>Wasserstand</b>	NN +2,90 m (Cuxhaven)
<b>Windstau</b>	4,08 m (Cuxhaven)
<b>Verluste</b>	keine Angaben
<b>Bemerkungen</b>	höchster je gemessener Windstau von 5,70 m

## Hollandsturmflut



<b>Datum</b>	31.01/01.02.1953
<b>Gebiet</b>	niederl. Küste
<b>Wasserstand</b>	NN +2,99 m (Cuxhaven)
<b>Windstau</b>	keine Angaben
<b>Verluste</b>	2 160 Tote, 47 000 St. Vieh
<b>Bemerkungen</b>	schwerste Naturkatastrophe des 20. Jhd.



# Sturmfluten und Küstenschutz

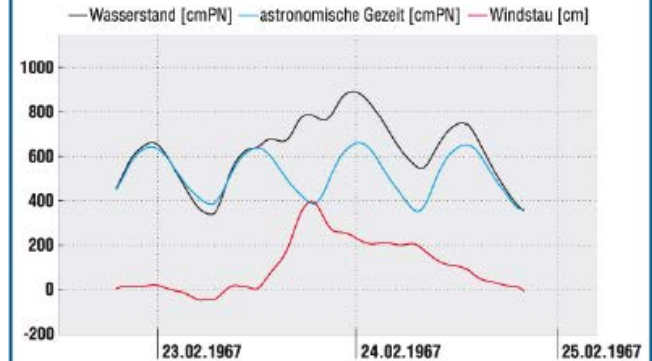
## Hamburgflut, Zweite Julianenflut



Sönnichsen, Moseberg (1994)  
Wenn die Deiche brechen

<b>Datum</b>	16./17.02. 1962
<b>Gebiet</b>	Elbegebiet, Deutsche Bucht
<b>Wasserstand</b>	NN +5,70 m (St. Pauli)
<b>Windstau</b>	3,87 m (Cuxhaven)
<b>Verluste</b>	340 Tote, 28 000 Häuser
<b>Bemerkungen</b>	Überflutung von Wilhelmsburg (FHH), viele Deichbrüche

## Zweite Niedrigwasser-Orkanflut



<b>Datum</b>	23.02.1967
<b>Gebiet</b>	deutsche Küste
<b>Wasserstand</b>	NN +3,99 m (Cuxhaven)
<b>Windstau</b>	4,44 m (Cuxhaven)
<b>Verluste</b>	keine Angaben
<b>Bemerkungen</b>	Windstärke bis zu 14 Beaufort (140 km/h)



# Klimawandel und Meeresspiegelanstieg

MSL bis 2100:  
+0,5m +1,0m  
+2,0m +3,0m  
+5,0m ?

Große Unsicherheiten!

Quelle: [https://transitionsblog.de/wp-content/uploads/2018/06/meeresspiegel\\_anstieg\\_deutschland-900x400.png](https://transitionsblog.de/wp-content/uploads/2018/06/meeresspiegel_anstieg_deutschland-900x400.png)

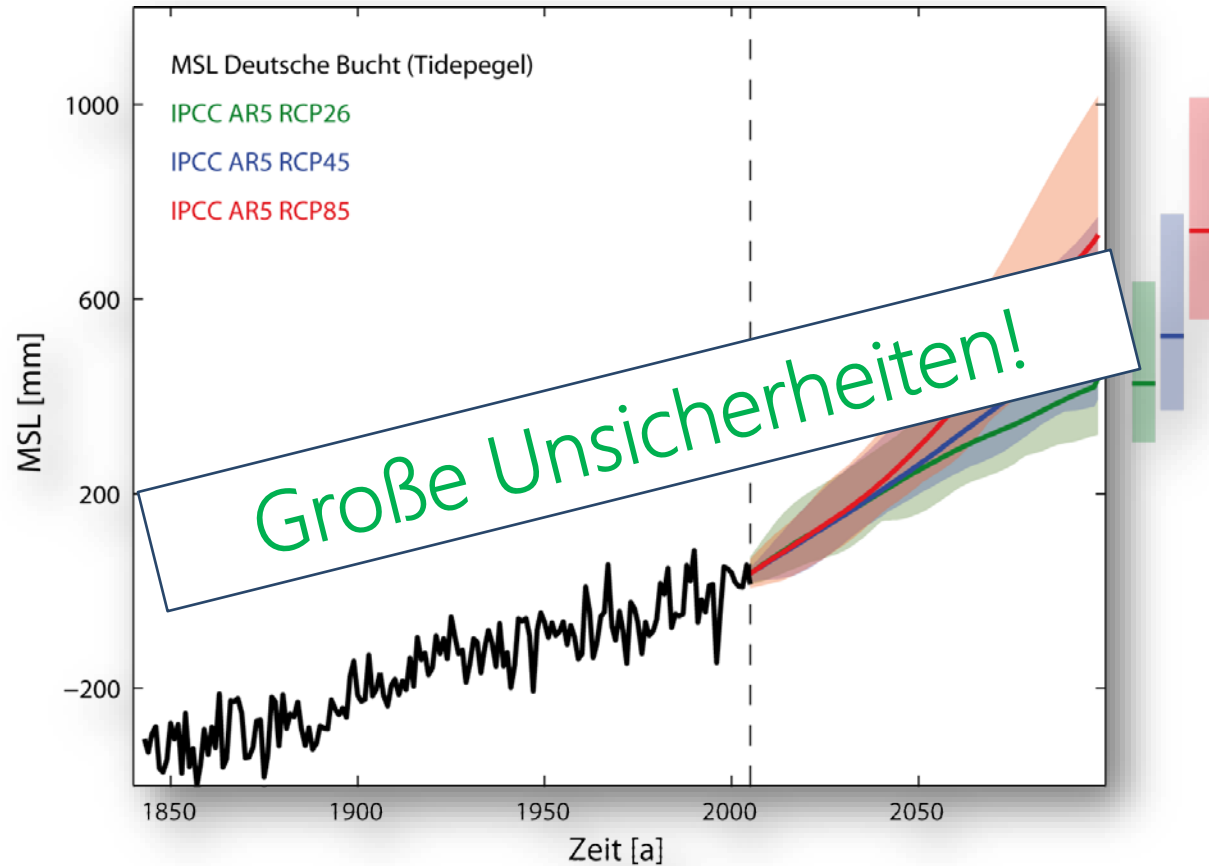
~~Norddeutschland bei einem Meeresspiegelanstieg von 5m?~~

Nein!



# Klimawandel und Meeresspiegelanstieg

- Rekonstruktion und Projektionen MSL: je nach Szenario und Modell **etwa 30 bis 100 cm** Anstieg bis zum Ende des Jahrhunderts



Rekonstruktion und Projektion

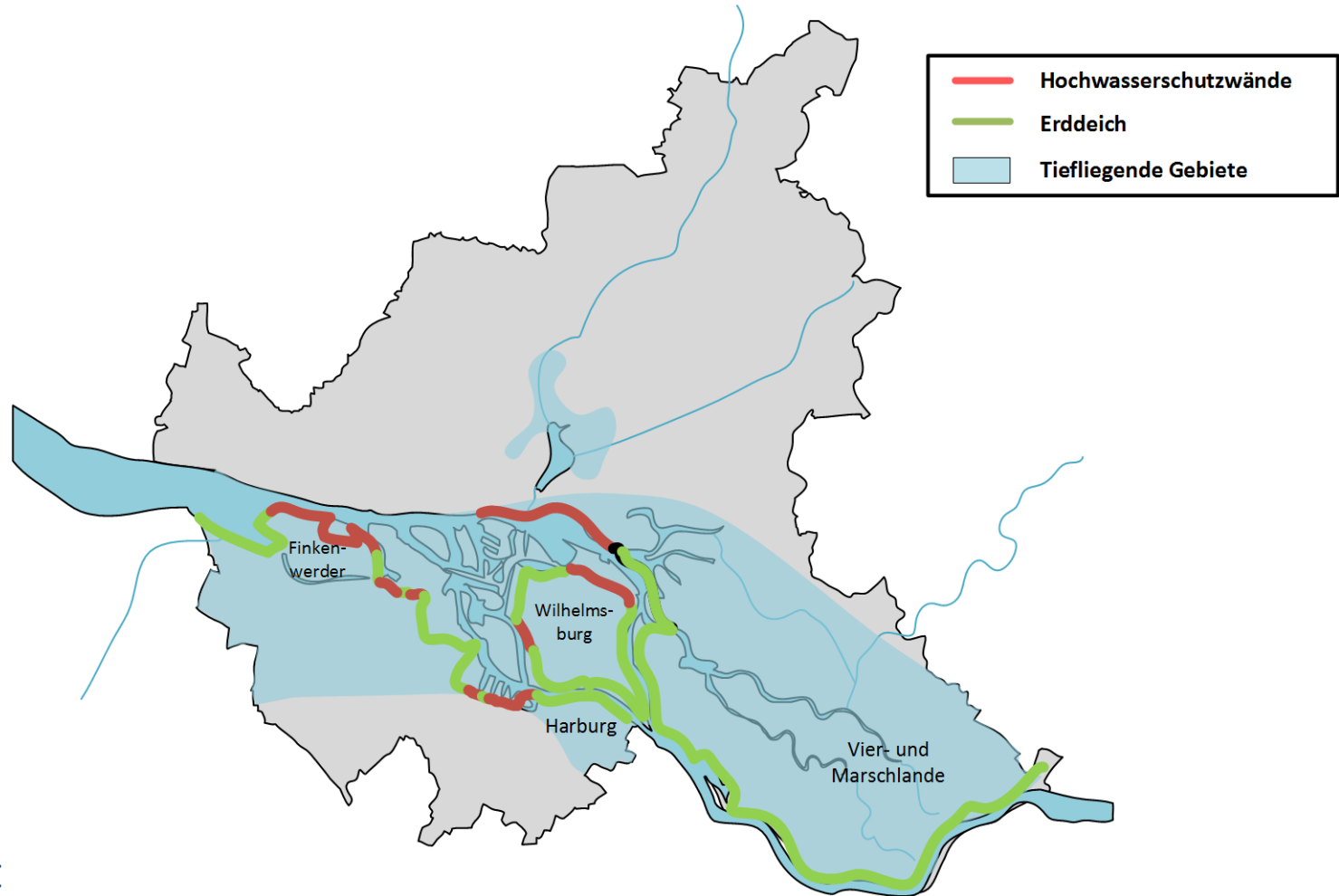


# Weser- und Elbeästuar mit Hamburg



Quelle: Copernicus Sentinel Daten [2018]

# Hochwasserschutz Hamburg



Hamburg:  
1.85 Mio. Einw. (April 2020)



# Hochwasserschutz Bremen

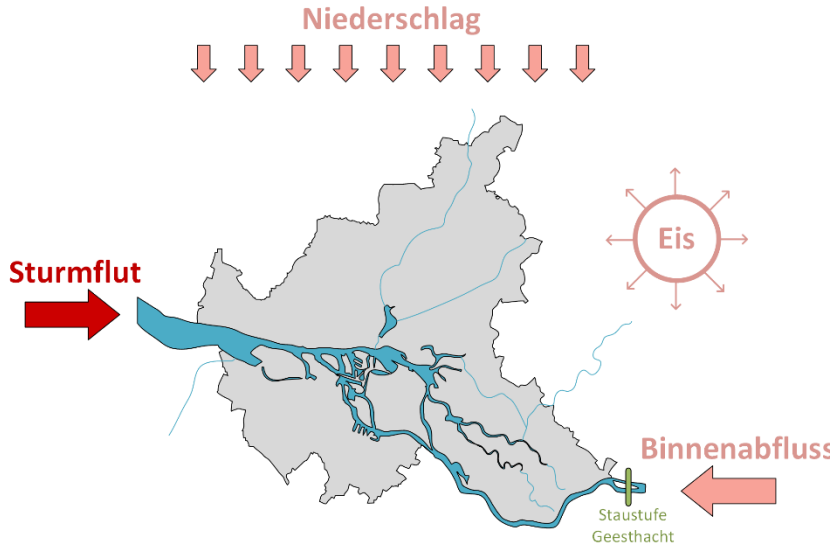


Bremen:  
0.57 Mio. Einw. (Dez. 2019)

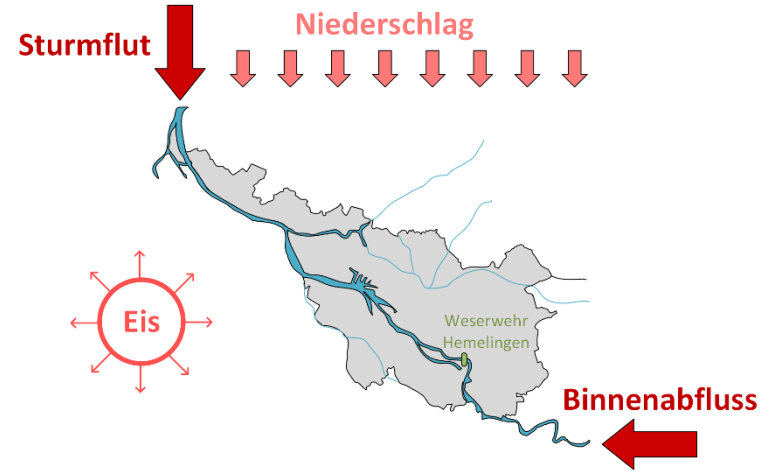


# Genese Sturmflut/Hochwasser Hamburg vs. Bremen

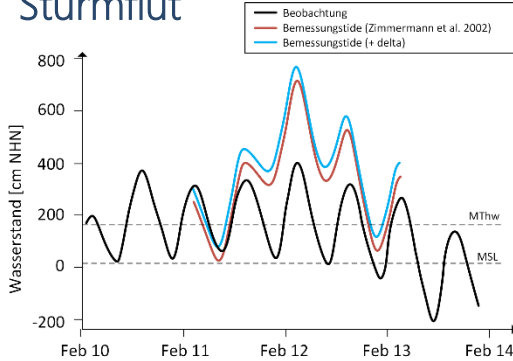
## Sturmflut/Hochwasser Hamburg



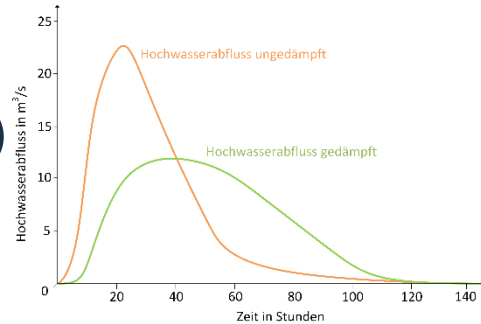
## Sturmflut/Hochwasser Bremen



## Sturmflut



## Binnenhochwasser



+

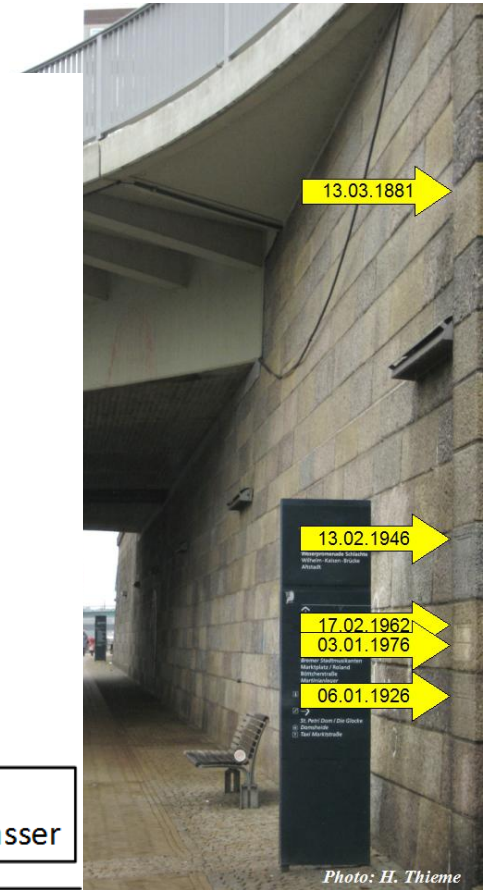
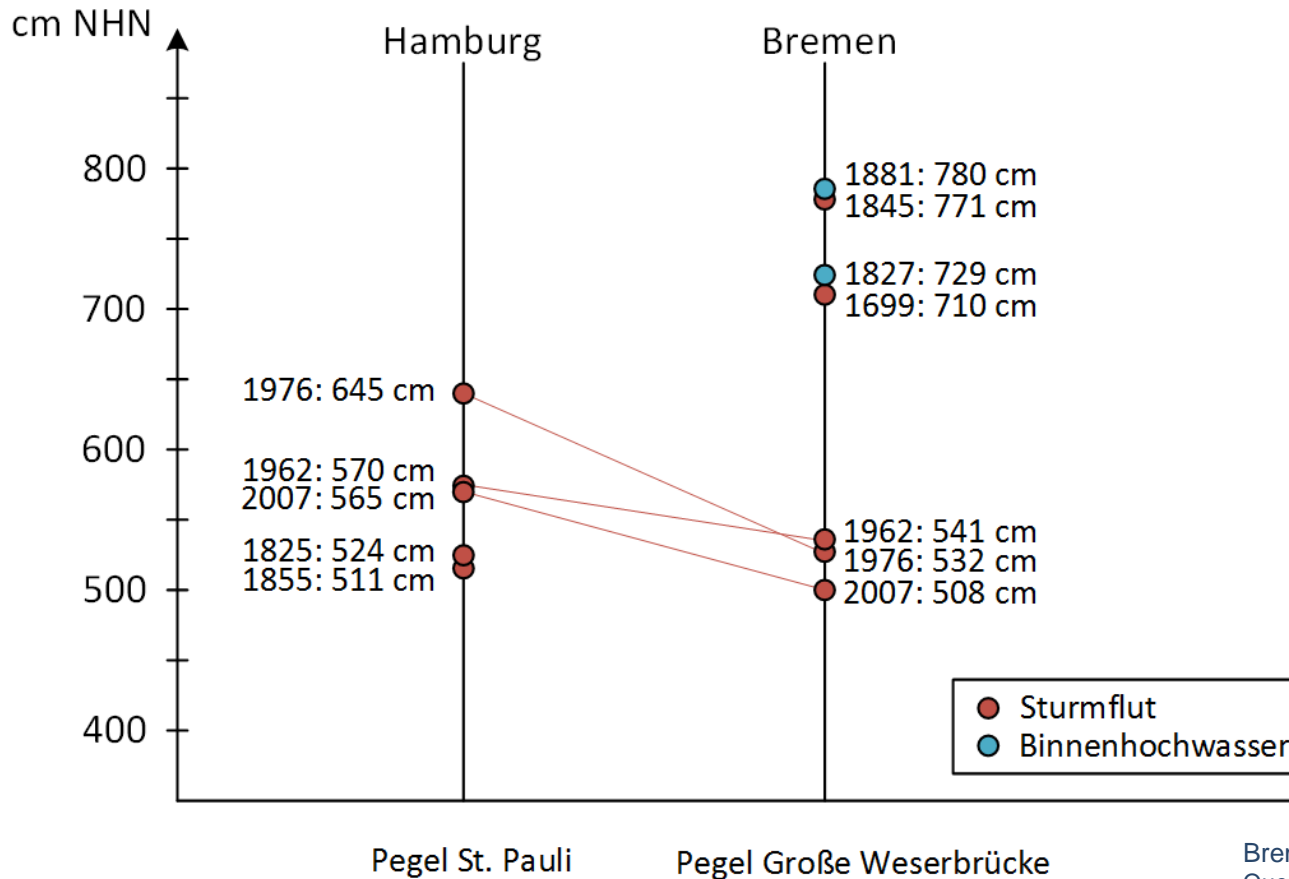
+

Niederschlag

+

Eis

# Hochwasserereignisse in Hamburg und Bremen



Bremen, HW-Marken Wilhelm-Kaisen-Brücke  
 Quelle: <http://real-planet.eu/Bremen.jpg>

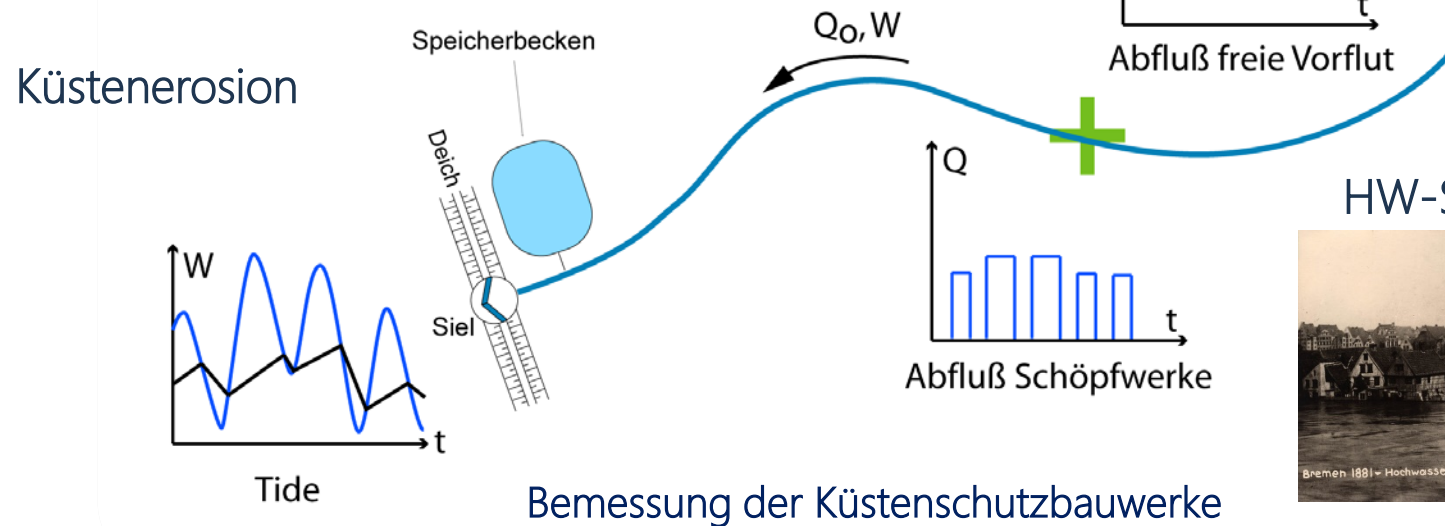
# Herausforderungen - Binnenentwässerung

Binnenentwässerung bei erhöhten Kettentiden und ergiebigen großräumigen Niederschlägen:

- Vorflut verbessern
- Speicherbecken optimieren
- Siel-, Schöpfwerks- und Pumpbetrieb?



Gieberg,  
vom Hochwasser gegen die Häuser im Vebelter Felde angeschwemmt  
am 19. März 1855.  
(Typisch auch für das Niedland.)  
Nach der Natur u. a. Zeitsg. v. J. G. Woltz.



HW-Schutz



Bremen 1891 - Hochwasser am Teerhof

# Herausforderungen - Bemessungswasserstände

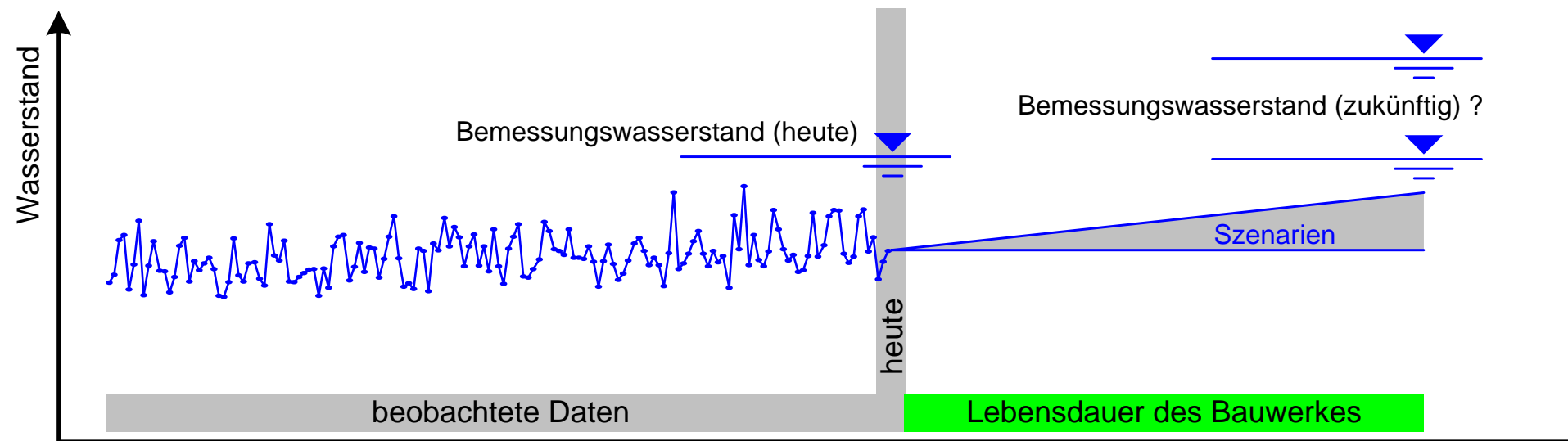


Mögliche Sturmflutwasserstände:  
+ 1,0 bis 1,4 m!



# Herausforderungen - Bemessungswasserstände

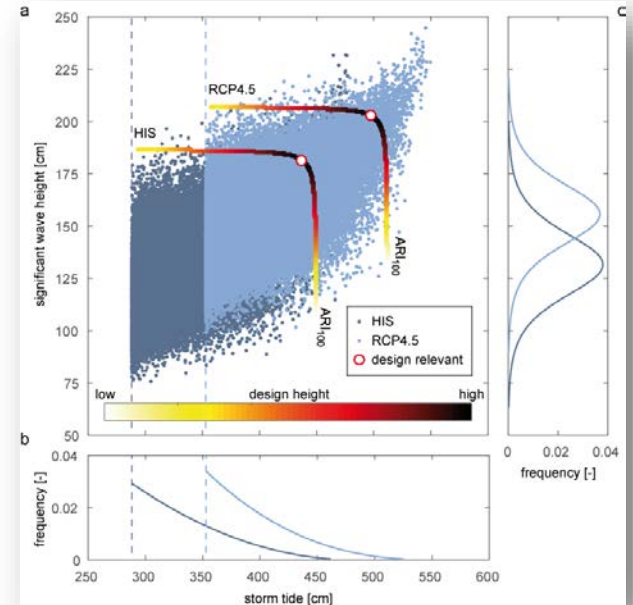
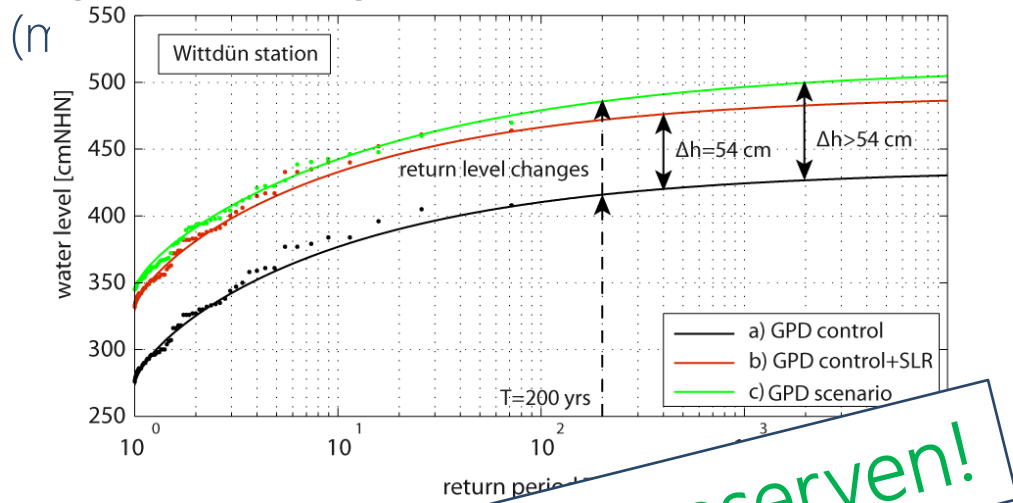
- Lokale Rekonstruktionen und Projektionen für MSL, MTnw, MThw und MThb
- Bemessungswasserstände, z.B.  $HW_{200}$



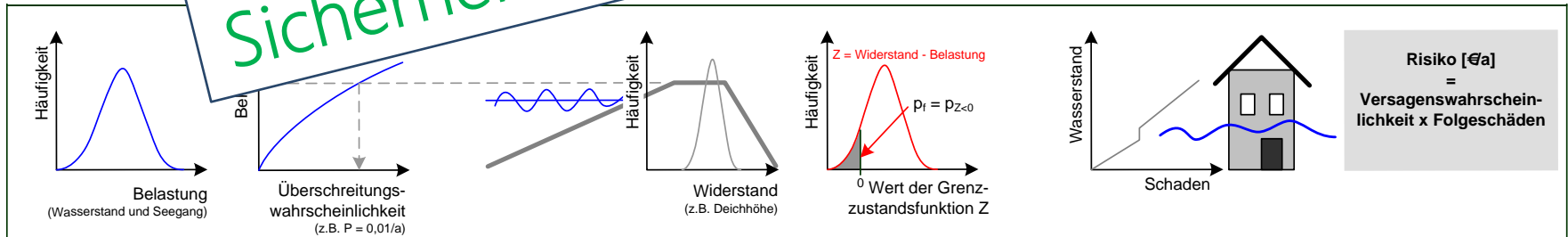
Zeit

# Herausforderungen – Bemessungswasserstände

## Regionalisierung der Sturmflutwasserstände



**Sicherheitsreserven!**



# Folgen des Klimawandels für Hamburg und Bremen

- Mehr Wasser!
  - Meer- und Niederschlagswasser
  - Zunahme Jahresniederschlag
  - Starkregen/Wetterextrema
- Anstieg des Meeresspiegels
  - Änderungen der Tidewasserstände und der Tidedynamik
- Anstieg der Sturmflutwasserstände
- Bemessungswasserstände anpassen
- Entwicklung alternativer Küstenschutzkonzepte (z. B. Warft, mobile HW-Schutzsysteme usw.)
- Sturmflutsperrwerke?



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen  
Universität Siegen  
Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu)  
Paul-Bonatz-Str. 9-11  
57076 Siegen

[juergen.jensen@uni-siegen.de](mailto:juergen.jensen@uni-siegen.de)  
[www.fwu.uni-siegen.de/wb/](http://www.fwu.uni-siegen.de/wb/)





## Reassess level rise

Sönke Dangendorf<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Research Institute for Water and Environment, University of Siegen, 57076 Siegen, Germany; <sup>2</sup>Instituto Mediterraneo de Estudios Avanzados (IMEDEA) (Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), 07190 Esporles, Spain; <sup>3</sup>Litoral Environment and Societies (LENS), Universidad de La Rochelle (UNR), 17000 La Rochelle, France; <sup>4</sup>Centre for Earth and Environmental Dynamics, University of Oslo, NO-0315 Oslo, Norway

Edited by Arny Cazemave, 128, 2016

The rate at which global mean sea level is uncertain, and we present a 20th-century reconstruction technique that incorporates up-to-date and corrections for land and terrestrial freshwater of possible differences in reconstructed GMSL from previous estimates from 1993 to 2012 is consistent with satellite altimetry, leading to a 20th-century reconstruction of GMSL that is 1.4–2.2 cm (ref. 1) (dependent on reconstruction technique) and likely being unprecedented over the previous 27 centuries. D identified ocean thermal expansion, glacial mass loss as the two main contributors to GMSL rise in the twentieth century, debate has how much of the observed GMSL is related to natural or anthropogenic forcing. The attribution to natural (such as solar and volcanic), climate variability and anthropogenic greenhouse gases or aerosols besides observations, fully to climate models containing forcings either in tandem or Writing in *Nature Climate Change* and colleagues<sup>1</sup> now the anthropogenic contribution observed twentieth-century provide evidence that it is at least 15% before 1950 to most recent decades.

global mean sea level | tide gauge data | satellite altimetry | climate change

Estimates of global mean sea level (GMSL) are based on a limited data set of coastal tide gauges (Fig. 1A) and satellite altimetry (Fig. 1B) and are thus affected by errors, caused both by natural and anthropogenic factors (e.g. dam building). As for tide gauge data, satellite altimetry is affected by ocean dynamics and redistribution (8), and to provide a unique 20th-century GMSL. As a consequence, several data subsets and corrections. Among the best static spatial patterns with temporal coverage, showing a 20th-century averaged regional sea level of individual station  $d$  to an increase of  $1.9 \pm 0.2$  cm, as well as others reported

www.nature.com/scientificreports/

## OCEANOGRAPHY Human

Detection and attribution of individual components over recent decades.

Sönke Dangendorf

Over the past century, it has been shown that the rate of sea level (GMSL) has risen by 14–22 cm (ref. 1) (dependent on reconstruction technique) and likely being unprecedented over the previous 27 centuries. D identified ocean thermal expansion, glacial mass loss as the two main contributors to GMSL rise in the twentieth century, debate has how much of the observed GMSL is related to natural or anthropogenic forcing. The attribution to natural (such as solar and volcanic), climate variability and anthropogenic greenhouse gases or aerosols besides observations, fully to climate models containing forcings either in tandem or Writing in *Nature Climate Change* and colleagues<sup>1</sup> now the anthropogenic contribution observed twentieth-century provide evidence that it is at least 15% before 1950 to most recent decades.

Changes in GMSL are a good indicator, as they reflect both expansion/contraction in sea level rise/warming/cooling of the ocean mass input from ice sheets, glacial meltwater and terrestrial freshwater sources occur on a wide range of timescales from past or current natural variations, or from anthropogenic forcings. Although it has recently been argued that the GMSL rise cannot be attributed to natural variability alone<sup>2</sup>, for studies have been limited to components of thermal expansion, glacial melting<sup>3</sup>. This is mainly due to the lack of observations spanning the twentieth century and/or sophisticated individual components.

To address this issue, Slater and colleagues<sup>1</sup> combined modern satellite altimetry, tide gauge data and sophisticated individual components.

To address this issue, Slater and colleagues<sup>1</sup> combined modern satellite altimetry, tide gauge data and sophisticated individual components.

## nature climate change

## Increasing surge and rise in sea level

Thomas Wahl<sup>1,2\*</sup>, Shalini Ramesh Babu<sup>1</sup>

When storm surge and high tide coincide, the potential for flooding is much greater than from either in isolation. Here we show that the risk of coastal flooding is increasing significantly over the past century, driven by a combination of sea level rise and increasing storm surge. We find that the risk of coastal flooding is increasing significantly over the past century, driven by a combination of sea level rise and increasing storm surge. We find that the risk of coastal flooding is increasing significantly over the past century, driven by a combination of sea level rise and increasing storm surge.

Nearly 40% of the US population lives in coastal areas, and highly developed regions, such as the East and West coasts of the United States, are particularly vulnerable to coastal flooding. Storm surges are a major cause of coastal flooding, and their frequency and intensity are increasing over time. This is due to a combination of factors, including sea level rise, increasing storm surge, and increasing coastal development.

Compound flooding has become a major concern for coastal communities. This is because of the increasing frequency and intensity of storm surges, combined with sea level rise. This is a major concern for coastal communities, and it is important to understand the factors that contribute to compound flooding.

<sup>1</sup>College of Marine Science, University of Virginia, Charlottesville, VA, USA; <sup>2</sup>Department of Civil Engineering, University of Virginia, Charlottesville, VA, USA



## ARTICLE

Received 14 Jan 2015 | Accepted 15 Jun 2015

## Detecting anthropogenic sea level rise

Sönke Dangendorf<sup>1</sup>, Marta Marcos<sup>2</sup> & Jürgen Jensen<sup>1</sup>

While there is scientific consensus that the rate of sea level rise has risen since the late nineteenth century, the attribution to natural or anthropogenic forcing remains unclear. Long-term persistent natural GMSL/LA minimum/maximum anthropogenic characteristics of various contributing components. We find that the persistence of slow, where transient atmospheric processes underestimate of possible natural in the significance of anthropogenic footprints. On the basis of a model assessment (P = 0.99) that anthropogenic origin.

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Research Institute for Water and Environment, University of Siegen, 57076 Siegen, Germany; <sup>2</sup>Centre for Earth and Environmental Dynamics, University of Oslo, NO-0315 Oslo, Norway (email: soenke.dangendorf@uni-siegen.de)

# SCIENTIFIC REPORTS

OPEN

## Reassessment of 20th century global mean sea level rise

Arne Arnsperger<sup>1</sup>, Sönke Dangendorf<sup>1\*</sup>, Marta Marcos<sup>2</sup>, Guy Wöppelmann<sup>3</sup>, Clinton P. Conrad<sup>4</sup>, Thomas Frederikse<sup>5</sup>, and Ricardo Riva<sup>6</sup>

Received: 17 October 2016  
Accepted: 02 December 2016  
Published: 06 January 2017

Coastal protection and relative sea level rise are of increasing importance for many coastal communities. We use hydrographic data and satellite altimetry to reconstruct the 20th-century global mean sea level (GMSL) and compare it with previous estimates. Our reconstruction is based on a combination of tide gauge data and satellite altimetry, and is consistent with previous estimates. We find that the rate of sea level rise has increased significantly over the past century, and is driven by a combination of natural and anthropogenic factors.

Coastal flood risk and relative sea level rise are of increasing importance for many coastal communities. We use hydrographic data and satellite altimetry to reconstruct the 20th-century global mean sea level (GMSL) and compare it with previous estimates.

Coastal protection and relative sea level rise are of increasing importance for many coastal communities. We use hydrographic data and satellite altimetry to reconstruct the 20th-century global mean sea level (GMSL) and compare it with previous estimates.

global mean sea level | tide gauges | vertical land motion | fingerprints | climate change

Estimates of global mean sea level (GMSL) change before the advent of satellite altimetry (e.g. refs. 1–6) rely on a limited data set of coastal tide gauges with both uneven spatial coverage and limited temporal coverage. These tide gauges are grounded on land, and are thus affected by vertical motion of the Earth's crust, caused both by natural processes (e.g. tectonic deformation and glacial isostatic rebound) and by anthropogenic activities (e.g. groundwater depletion and dam building). As a consequence, the reconstructed GMSL is biased by vertical land motion (VLM) and glacial isostatic rebound (GIR). Although these factors hamper our ability to track local sea dynamics and global changes in response to mass loss, we use a combination of tide gauge data and satellite altimetry to reconstruct the 20th-century GMSL and compare it with previous estimates. Our reconstruction is based on a combination of tide gauge data and satellite altimetry, and is consistent with previous estimates. We find that the rate of sea level rise has increased significantly over the past century, and is driven by a combination of natural and anthropogenic factors.

<sup>1</sup>Research Institute for Water and Environment, University of Siegen, 57076 Siegen, Germany; <sup>2</sup>Centre for Earth and Environmental Dynamics, University of Oslo, NO-0315 Oslo, Norway; <sup>3</sup>Centre for Earth and Environmental Dynamics, University of Oslo, NO-0315 Oslo, Norway; <sup>4</sup>Centre for Earth and Environmental Dynamics, University of Oslo, NO-0315 Oslo, Norway; <sup>5</sup>Centre for Earth and Environmental Dynamics, University of Oslo, NO-0315 Oslo, Norway; <sup>6</sup>Centre for Earth and Environmental Dynamics, University of Oslo, NO-0315 Oslo, Norway

\*Correspondence: soenke.dangendorf@uni-siegen.de

www.nature.com/scientificreports/

SCIENTIFIC REPORTS | 7:40171 | DOI: 10.1038/srep40171

Dank an DFG, BMBWF und KFKI für Forschungsförderung!

NATURE CLIMATE CHANGE | ADVANCE ONLINE PUBLICATION | www.nature.com/natureclimatechange

© 2015 Macmillan Publishers Limited. All rights reserved

