

# Konsequenzen des Klimawandels für sandige Küsten und Küstenschutzanlagen



**Peter Fröhle**, Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Wasserbau

Christian Schlamkow und Norman Dreier,  
Universität Rostock, Lehrstuhl für Geotechnik und  
Küstenwasserbau

# Auswirkungen und Konsequenzen des Klimawandels auf sandige Küsten und Küstenschutzanlagen

1. Projekt RAdOst
2. Klimawandel und Konsequenzen für Wasserstände und Wellenbedingungen in der Ostsee
3. Konsequenzen für Küsten- und Hochwasserschutzmaßnahmen
4. Konsequenzen für den Sedimenttransport und für die morphologische Entwicklung der Küste
5. Anpassungsmaßnahmen und Beispiele für Maßnahmen an typischen Küstenschutzanlagen

# RADOST – Projektpartner



GEFÖRDERT VOM



i|ö|w

INSTITUT FÜR ÖKOLOGISCHE  
WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFTEN



 **Helmi  
Geest**  
Zentrum für Materialwissenschaften



**Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung**

ut

**Mecklen  
Vorpommern**

Staatliches Amt für  
Landwirtschaft und  
Mittleres Mecklenburg

**KLIMZUG**



Klimawandel in Regionen



Logo of the German Research Foundation (DFG)



Büro für  
Umwelt und  
Küste

**TUHH**

Technische Universität Hamburg-Harburg

**GICON**  
Großmann Ingenieur Consult GmbH

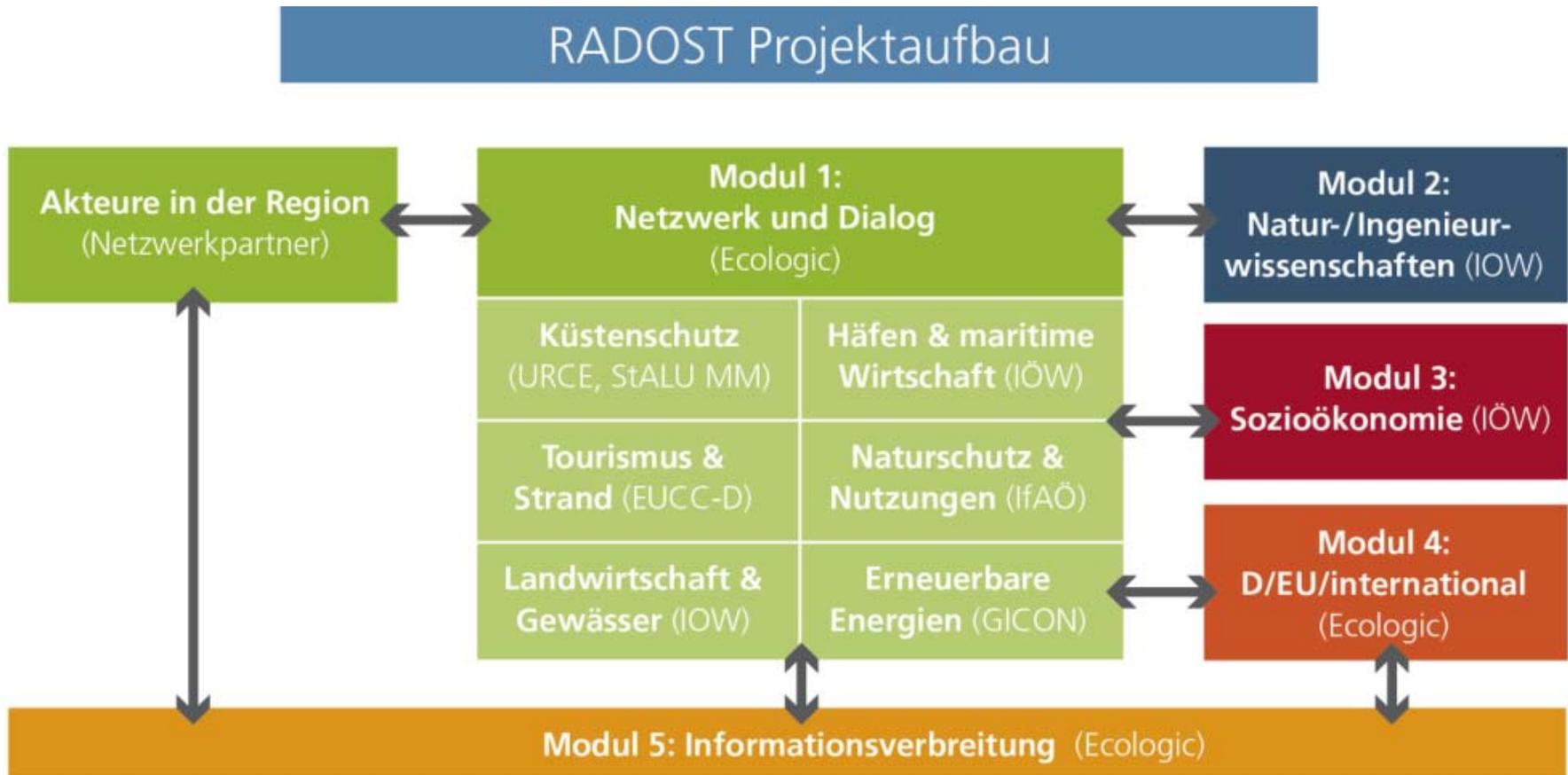


Coastal Research & Management



**H.S.W.**  
Ingenieurbüro  
Gesellschaft für Energie und Umwelt mbH

# RADOST-ein Überblick

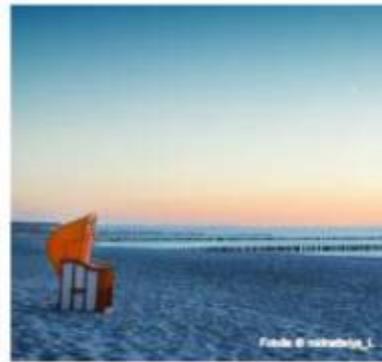


# RADOST-ein Überblick

## Küstenschutz



## Tourismus



## Landwirtschaft und Gewässer



## Naturschutz



## Häfen



## Erneuerbare Energien



# RADOST-Fokusgebiete



# RADOST-Website: [www.klimzug-radost.de](http://www.klimzug-radost.de)



**RA:dOst**  
Regionale Anpassungsstrategien für die deutsche Ostseeküste

Suchbegriffe eingeben...  

Ecologic Institut  
Pfalzburger Straße 43-44  
10717 Berlin

 Deutsch  English

Über RADOST | Veranstaltungen | Presse | Publikationen | Fakten | Links | Intern

**Projektbeschreibung**

Kurzinformationen zum Projekt RADOST können Sie als [PDF herunterladen](#) (1,33 MB).

**Ziel** des RADOST-Vorhabens ist es, Anpassungsstrategien für die deutsche Ostseeküstenregion im Dialog zwischen Wissenschaft, Wirtschaft, Verwaltung und Zivilgesellschaft zu erarbeiten. Dabei geht es gleichermaßen darum, Schaden für Wirtschaft, Gesellschaft und Natur zu minimieren und mit dem Wandel verbundene Entwicklungschancen optimal zu nutzen. Ein weiteres Ziel ist die dauerhafte Stärkung von Akteursnetzwerken und Kommunikationsstrukturen, auch über die Region hinaus.

**RADOST Projektaufbau**

```

    graph LR
      A[Akteure in der Region  
(Netzwerkpartner)] <--> B[Modul 1:  
Netzwerk und Dialog  
(Ecologic)]
      B <--> C[Modul 2:  
Natur-/Ingenieur-  
wissenschaften (IÖW)]
      C <--> D[Modul 3:  
Sozioökonomie (IÖW)]
      A --> B
      B --> C
      C --> D
      B --- B1[Küstenschutz  
(URCE, StALL MM)]
      B --- B2[Häfen & maritime  
Wirtschaft (IÖW)]
      C --- C1[Tourismus &  
Strand (RUC-D)]
      C --- C2[Naturschutz &  
Nutzungen (IAÖ)]
  
```

**RADOST Tour**



Ostseeküste 2100 - Auf dem Weg zu regionaler Klimaanpassung

**Klimaanpassung Küstenregion**

# RADOST-Tour 10.-20.9.2012



## RAdOst Key Questions Thema Küstenschutz

- Wie werden sich die hydrodynamischen Bedingungen entwickeln?
- Müssen wir auf Veränderungen des Sedimenttransports und somit veränderte morphologische Entwicklungen der Küsten vorbereitet sein? Wenn ja, wo?
- Sind aktuelle Küstenschutzstrategien nachhaltig?
- Erlauben aktuelle Bauweise der Küstenschutzwerke nachhaltige Strategien? In welchen Küstenabschnitten müssen wir zuerst reagieren?
- Wie werden wir unsere Küsten in 2050 schützen?

# Klimawandel - Auswirkungen auf den Küstenschutz

direkt und indirekt

## Veränderungen der Windverhältnisse

- mittlere Windverhältnisse
- Starkwind und Sturmereignisse

## Veränderungen des Seegangs

- mittleres Seegangsklima
- extreme Seegangsereignisse

## Veränderungen von Wasserständen

- mittlere Ereignisse
- Extremereignisse

## Veränderungen der Strömungen

- mittlere Strömungen
- extreme Strömungen

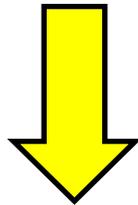


Bauwerksbelastungen, Bemessungsgrundlagen (funktionell und konstruktiv), Morphologie und Sedimenttransport, ...

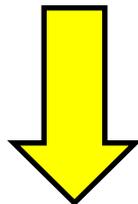
**Quantifizierung der Veränderungen**

# RAdOst Modellkette Küstenschutz

Klimamodell(e)  
global / regional



Seegangsvorhersagemodelle  
regional / lokal



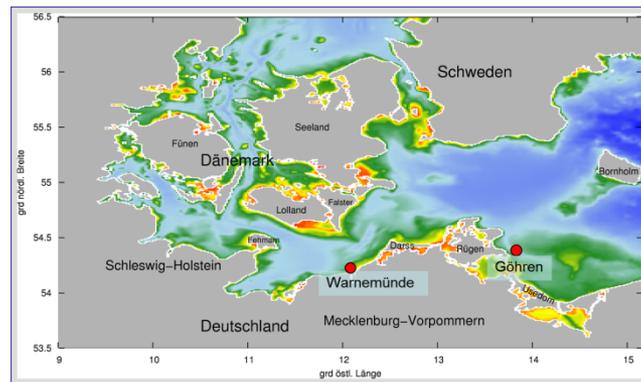
Sedimenttransportmodelle /  
Belastung von Bauwerken



Echam5-MPI



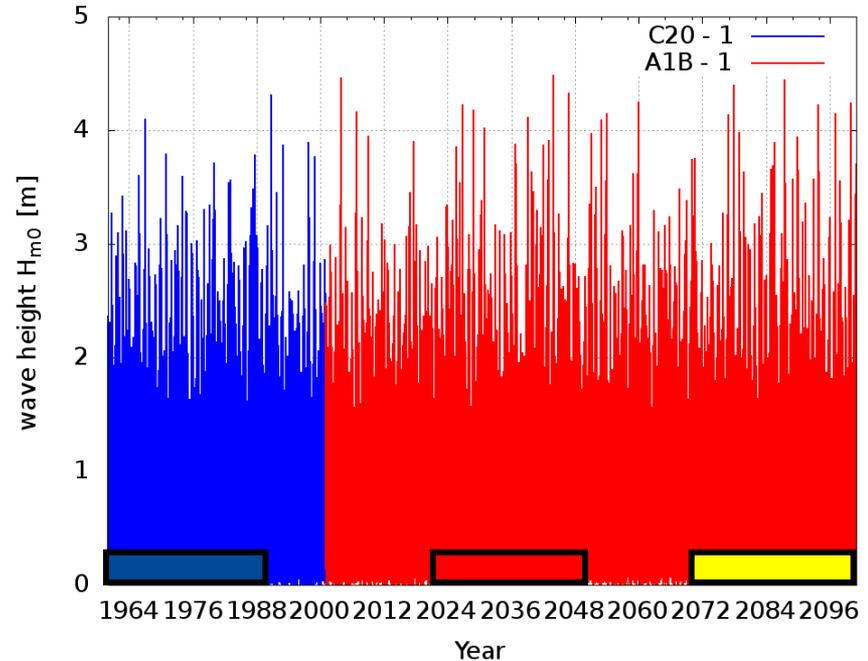
COSMO-CLM



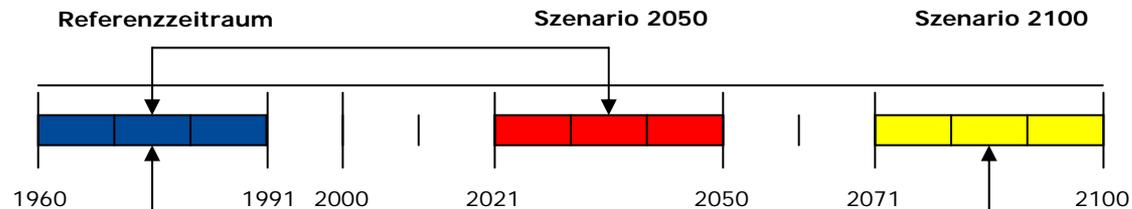
SWAN  
+  
WWK  
+  
Sedimentmodelle

# Modellierung des Wellenklimas

- Wellenhöhen, -perioden und -anlauffrequenzen
- Zeitraum 1960-2100
- Grundlage: Wind-Wellen-Korrelationen und CLM Wind



Wellenhöhen Warnemünde, Szenario A1B – Lauf 1



## Locationen für eine detaillierte Bewertung der Wellenbedingungen



## Modellläufe Datenbasis CLM - Regionalmodell

CLM runs*	forcing (ECHAM5/MPIOM)	period
C20_1	observed anthropogenic	20 <sup>th</sup> century (1960-2000)
C20_2		
C20_3		
A1B_1	global IPCC scenario A1B	projection (2001-2100)
A1B_2		
B1_1	global IPCC scenario B1	
B1_2		

Windbedingungen am Ende des 21. Jahrhunderts :

Veränderung der Häufigkeitsverteilung zu vermehrt auftretenden höheren Windgeschwindigkeiten und der Windrichtungen in Richtung West

Z.B. Erhöhung der mittleren Windgeschwindigkeit (Mittel über 30 Jahre) um bis zu 5% und Veränderung der Windrichtungen um bis zu 10° in Richtung West

↔ *Norddeutsches Klimabüro:*

Mittlere Windgeschwindigkeit +1% to +4% (mittlere Änderungen im Bereich der duteschen Ostseeküste) und 7-13% häufigeres Auftreten westlicher Winde

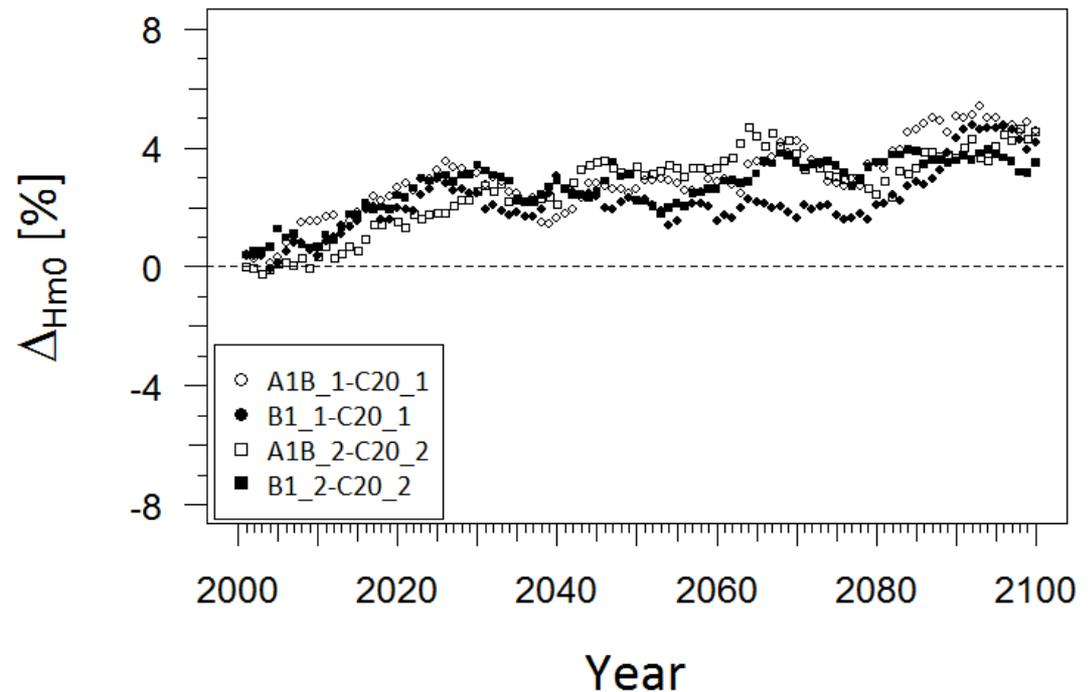
### Anmerkung:

Modellläufe \_1/\_2/(\_3) sind unabhängige Realisierungen der Klimavariabilität!

# Veränderungen des Wellenklima – mittlere Wellenhöhen

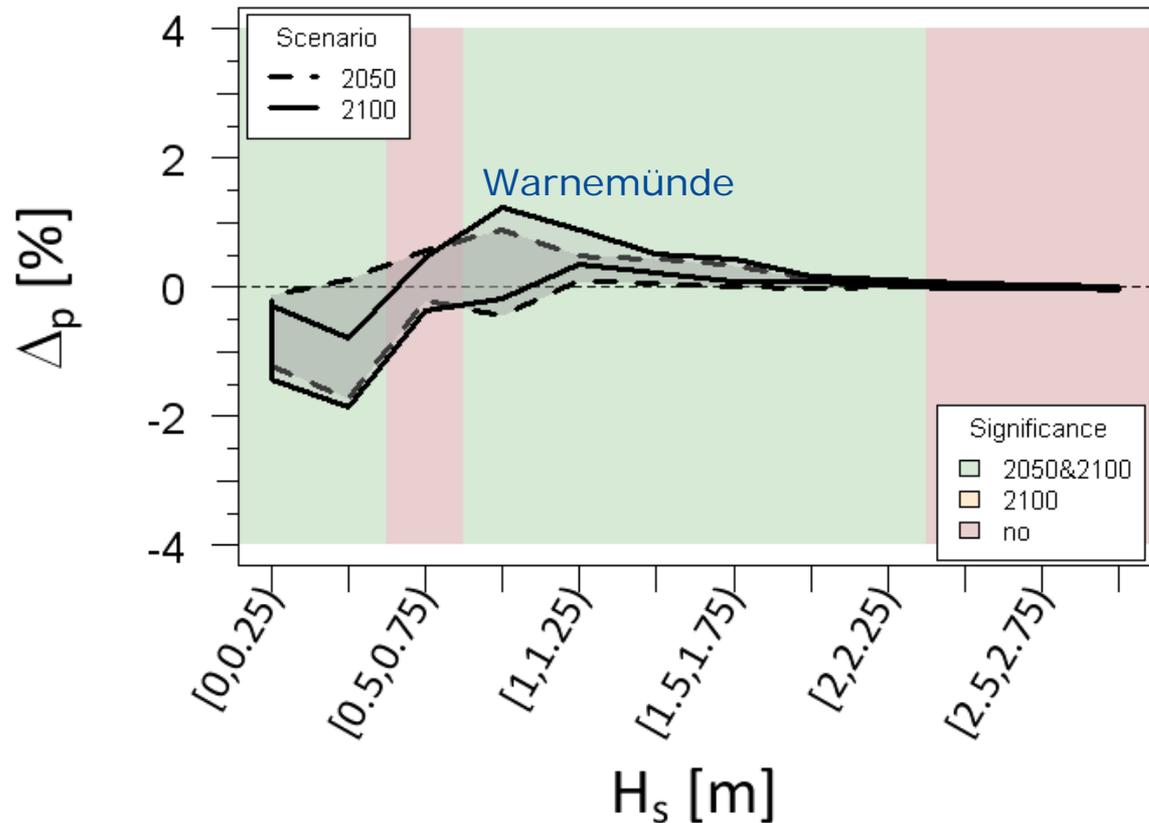
- Szenarien für 2050 und 2100 (A1B, B1) verglichen mit C20 (1960-1991)
- Signifikanztests zeigen für weite Bereiche der Untersuchungen signifikante Veränderungen auf Basis einer 5% Irrtumswahrscheinlichkeit an

## Warnemünde



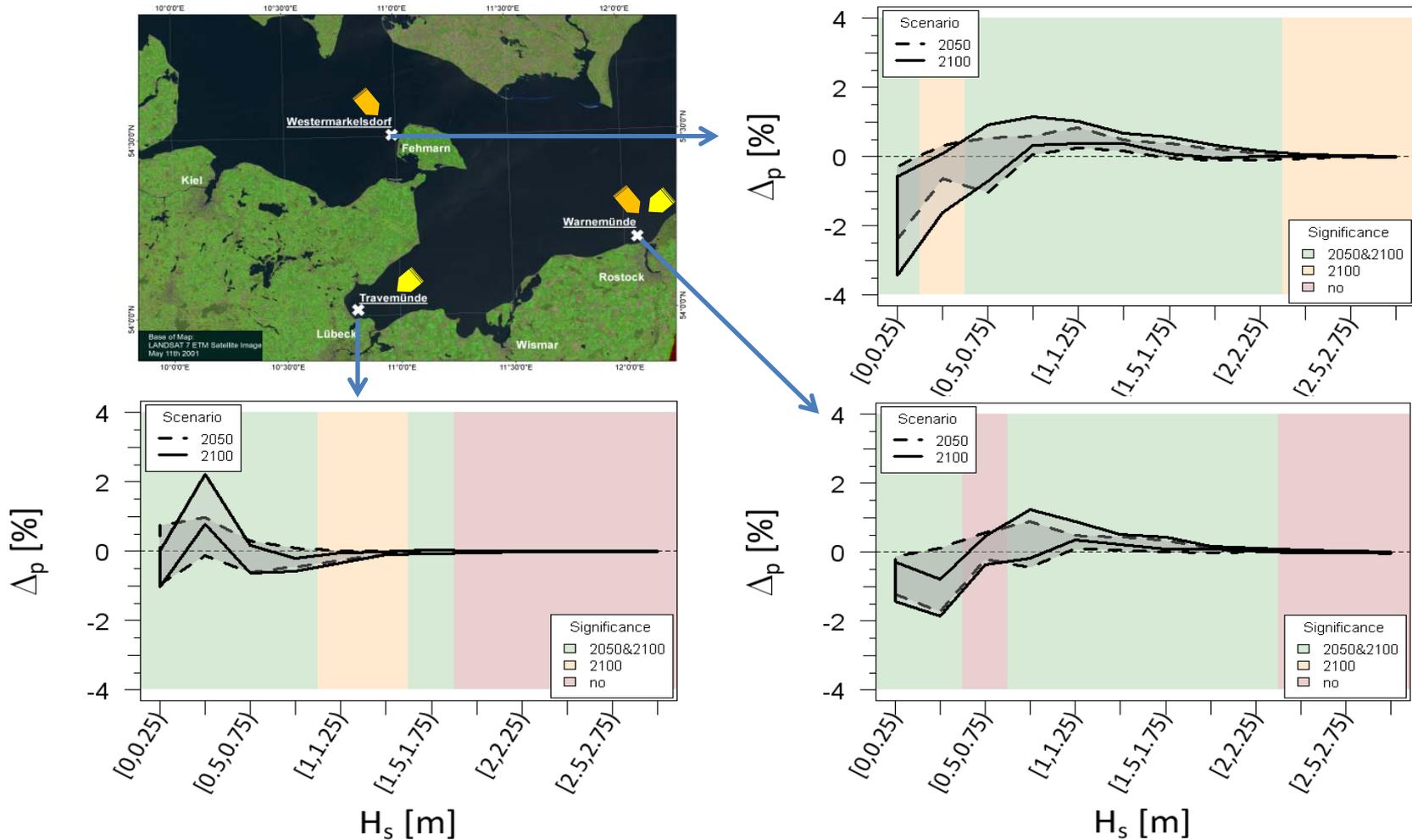
# Veränderungen des Wellenklima – Häufigkeitsverteilung der Wellenhöhen

- Szenarien für 2050 und 2100 (A1B, B1) verglichen mit C20 (1960-1991)
- Signifikanztests zeigen für weite Bereiche der Untersuchungen signifikante Veränderungen auf Basis einer 5% Irrtumswahrscheinlichkeit an

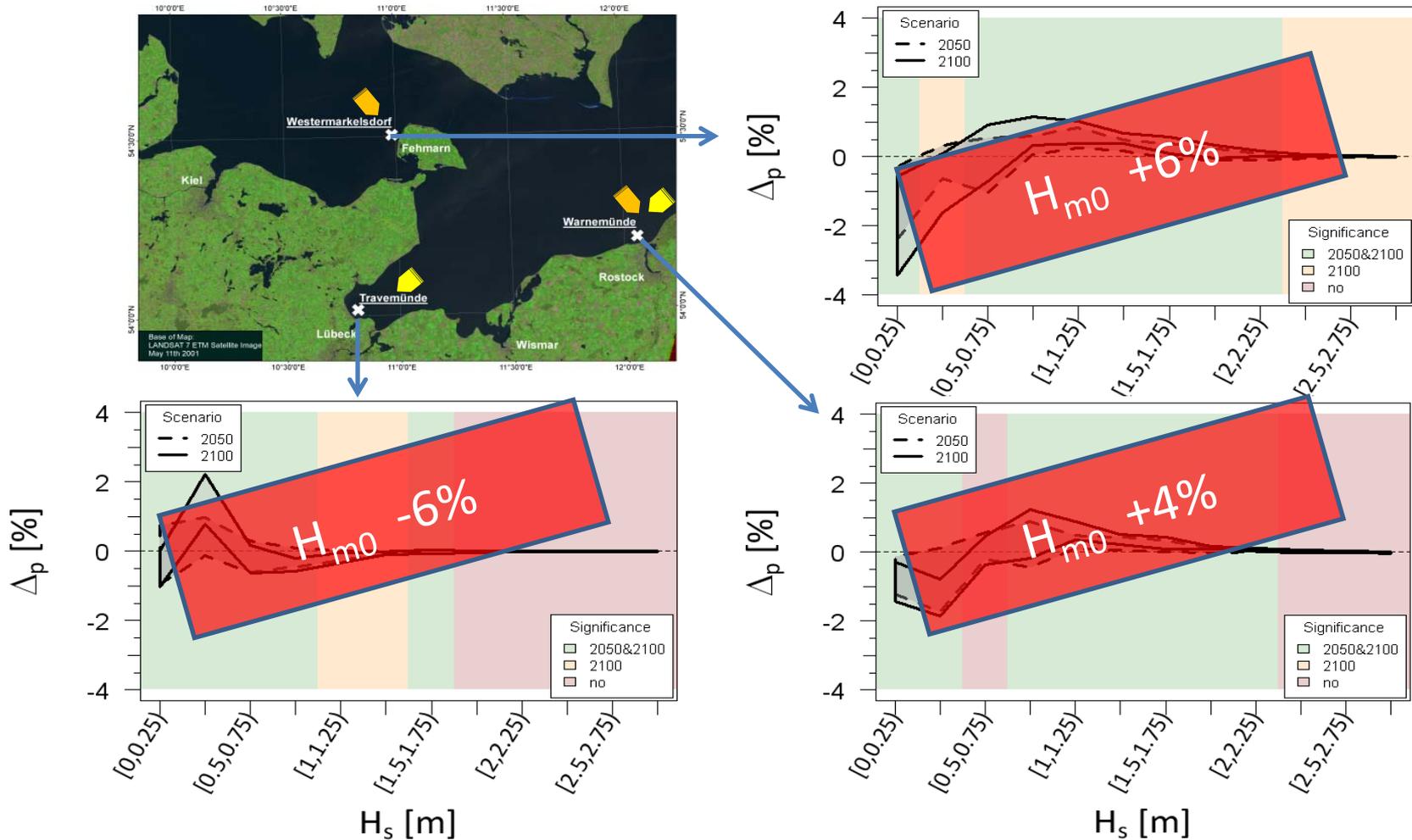


*Spread of change of frequency distribution of wave heights for the scenarios 2050 (2021-2050) and 2100 (2071-2100) for climate change scenarios A1B and B1 compared to the control period (1971-2000). Significance level of 0.05.*

# Veränderungen der mittleren Wellenhöhen



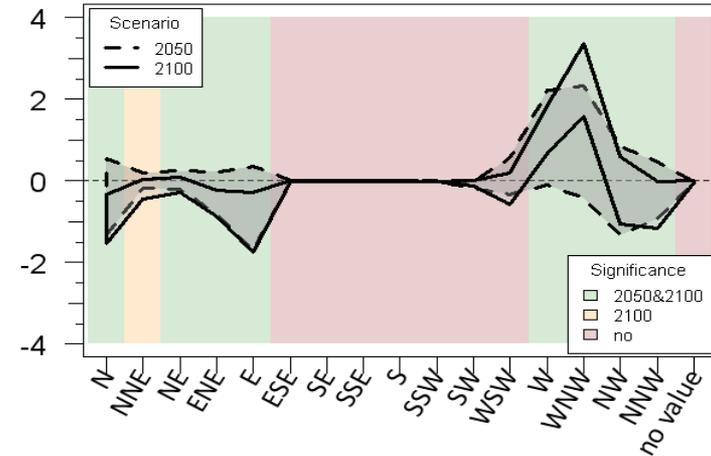
# Veränderungen der mittleren Wellenhöhen



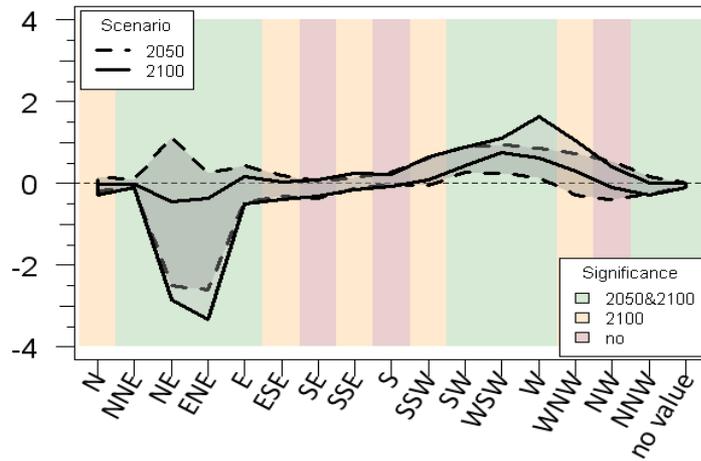
# Veränderungen der Wellenanlaufrihtungen



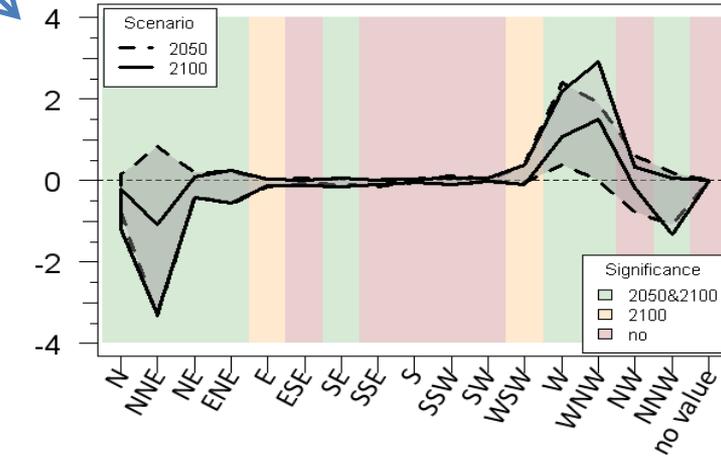
$\Delta_p$  [%]



$\Delta_p$  [%]



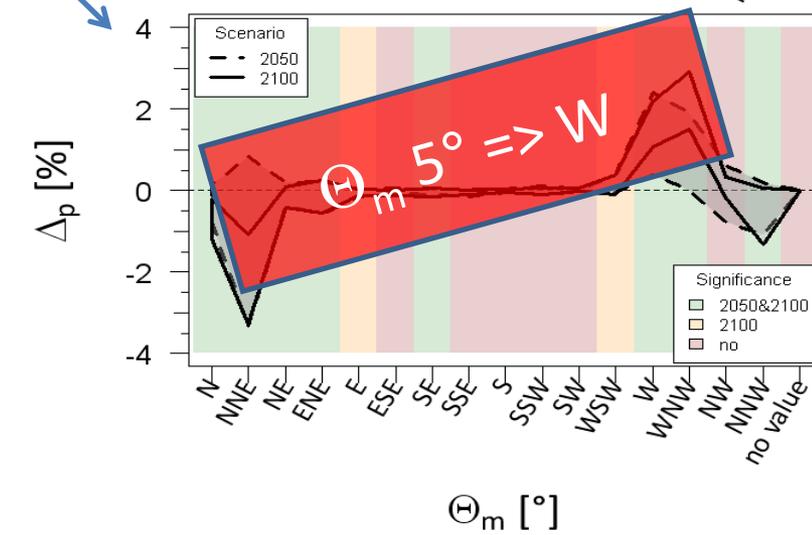
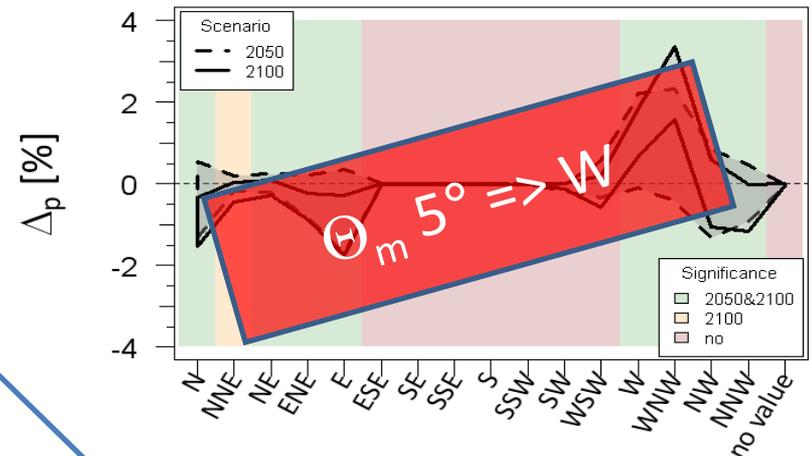
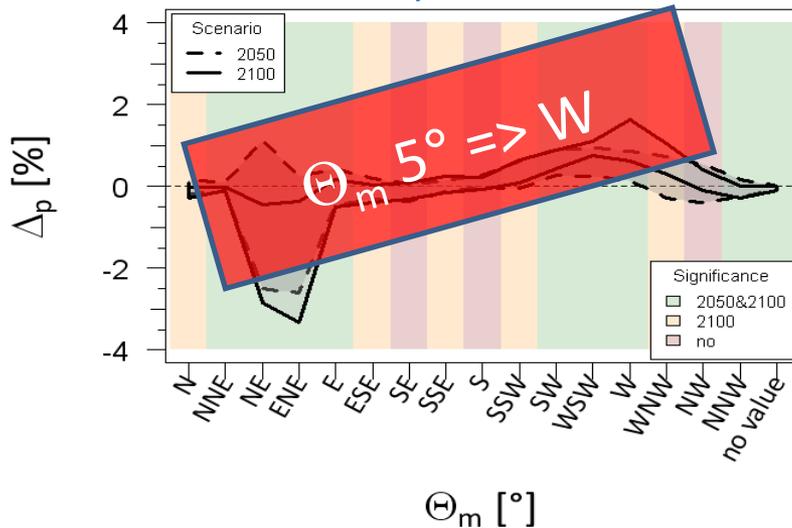
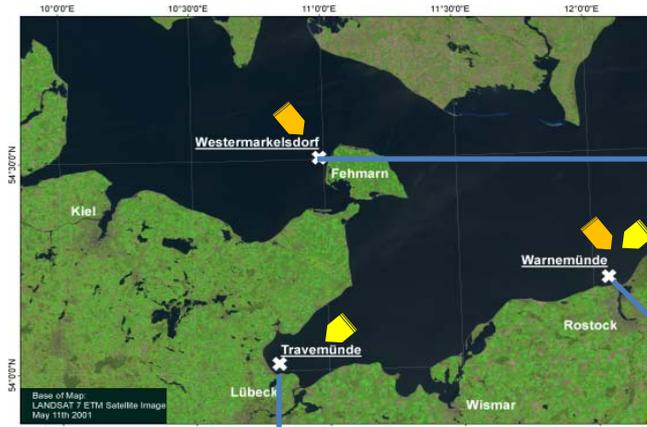
$\Delta_p$  [%]



$\Theta_m$  [°]

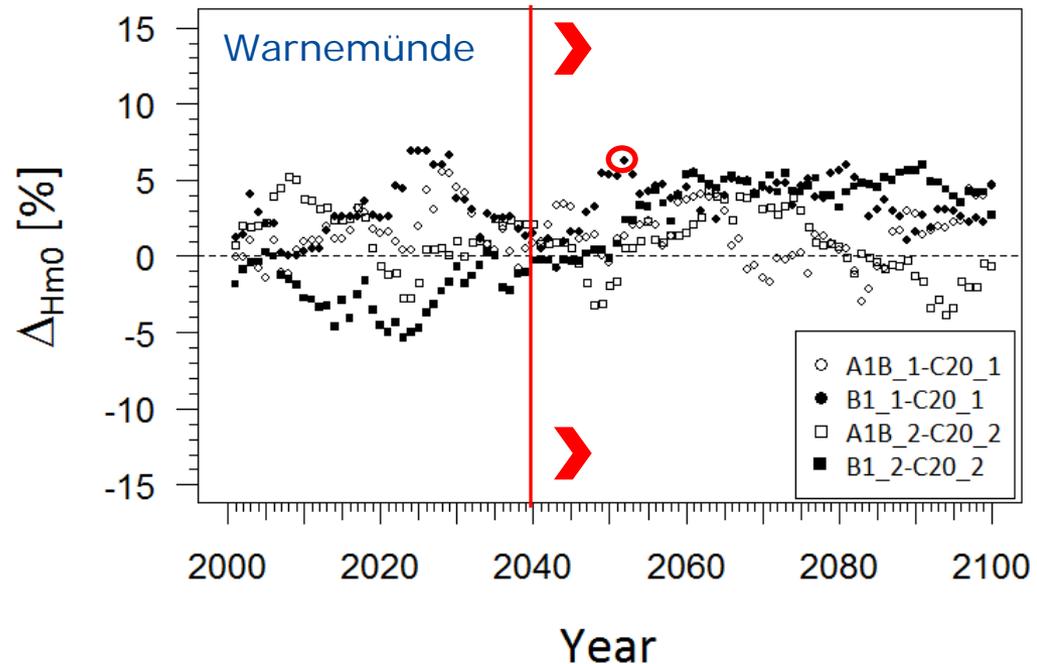
$\Theta_m$  [°]

# Veränderungen der Wellenanlaufrichtungen



## Veränderungen extremer Seegangbedingungen – Warnemünde

- Änderungen extremer Wellenhöhen im Bereich zwischen +6% bzw. –4% möglich
- Lineare Regression zeigt steigenden Trend für drei der vier Realisierungen



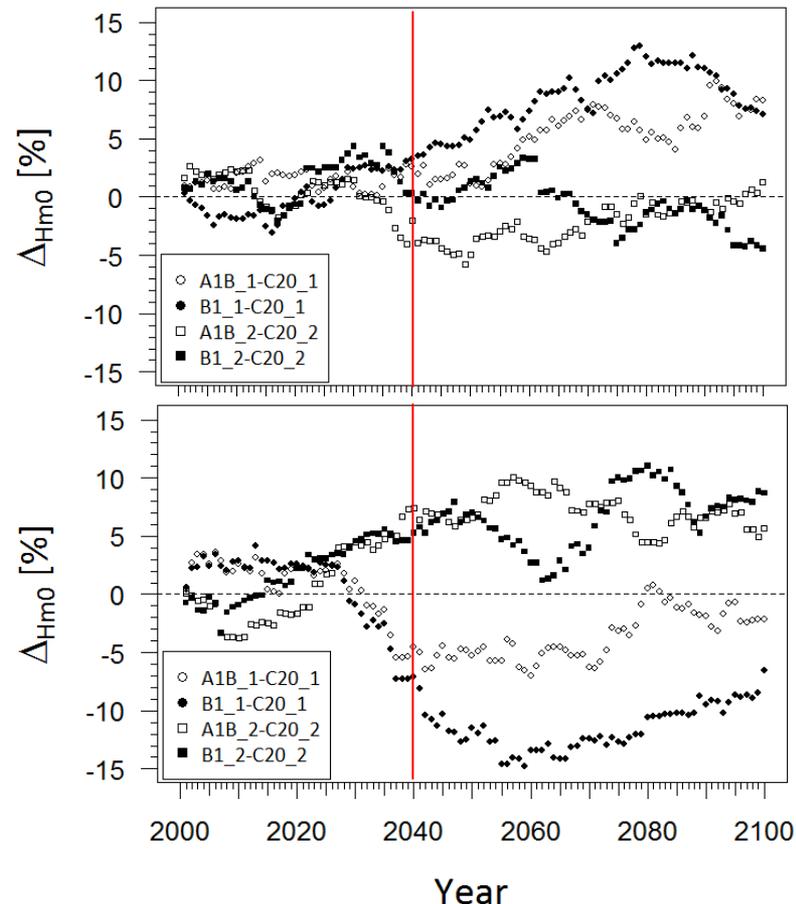
*Changes of extreme wave heights near Warnemünde calculated for transient scenario runs A1B and B1 in time periods of 40 years and a return level of 200years compared to the control period (1961-2000). A log-normal fitting function was applied.*

# Veränderungen extremer Seegangbedingungen – Travemünde und Westermarkelsdorf

- Travemünde  
+14% bzw. -5%
- Westermarkelsdorf  
+12% bzw. -14%

**Allgemein:** Unterschiedliche Klimasignale/Auswirkungen für die drei Lokationen

**In Übereinstimmung** mit den Auswertungen des HZG zum 99. Perzentil für Hs: zumeist Erhöhung der Werte aber auch abnehmende Trends beobachtet



Travemünde

Westermarkelsdorf

## RadOst - Szenarien 2100

Szenario	Wasserstände	Seegang	Sturmfluten
„moderat“	+ 30 cm	Keine signifikanten Veränderungen	Keine signifikanten Veränderungen
„mittel“	+ 60 cm	Mittlere Wellenhöhe + 2% Sturmflutwellenhöhen + 10 %, geringe Änderungen der Wellenanlaufrichtungen (+2% aus W – NW, -2% aus N – NE)	+ 5 % Energie
„hoch“	+ 90 cm	Mittlere Wellenhöhe + 5% Sturmflutwellenhöhen + 15 %, signifikante Änderungen der Wellenanlaufrichtungen (+4% aus W – NW, -4% aus N – NE)	+ 10 % Energie

# Auswirkungen auf sandige Küsten und Küstenschutz – Zusammenfassung

Veränderungen der Wasserstände und der Wellenbedingungen  
erzeugen

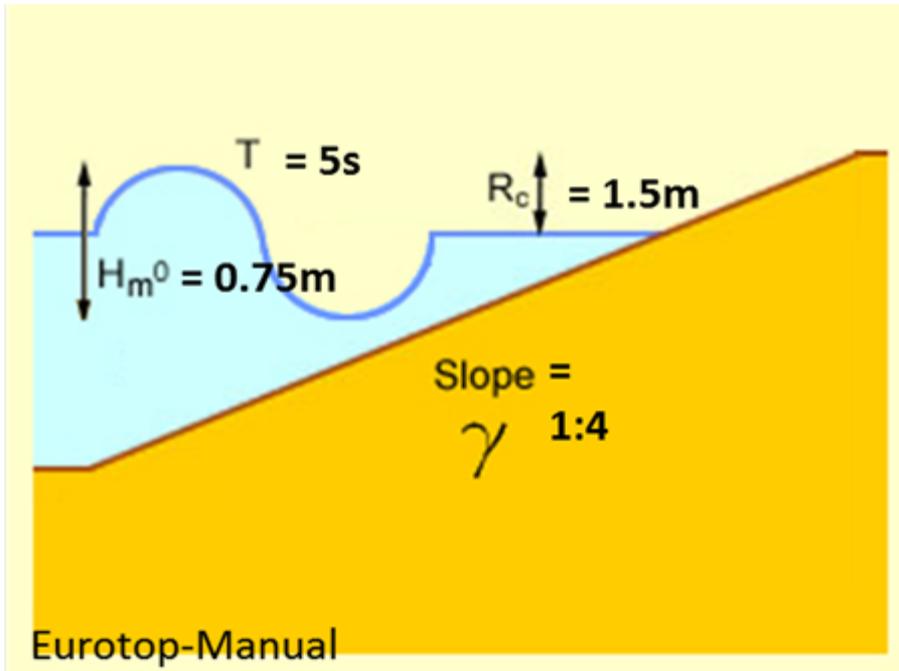
- Auswirkungen auf die Küste, die Schotter, den Strand und das Hinterland
- Höhere Belastung auf Küstenschutzmaßnahmen
- Verminderung des Schutzes für Küstenschutz und Erosionsschutzmaßnahmen

Quantifizierung der Auswirkungen und der Konsequenzen



Verminderung der Sicherheit von Erosions- und Hochwasserschutzmaßnahmen erfordert die Anpassung von Küstenschutzmaßnahmen und –konzepte an veränderte Bedingungen

# Einfluss der Meeresspiegelanstiegs auf Deiche und andere Hochwasserschutzmaßnahmen



Increase of MSL (m)	Flood Water Level relative to MSL (m)	Wave Overtopping Rates (l/s/m)
0.0	1.5	2.5
0.3	1.5	7.3
0.5	1.5	14.7
1.0	1.5	85.0



Hochwasserschutzmaßnahmen werden in Zukunft unsicher

## Erhöhung der Wellenhöhe an einem Deckwerk ( $d_0=2.0\text{m}$ ) Einfluss auf das erforderliche Blockgewicht (Hudson Ansatz)

SLR	$\Delta H_{m0}$	$\Delta W$
0.3 m	+15 %	152 %
0.6 m	+30 %	220 %
0.9 m	+45 %	305 %

Alle anderen Werte konstant!

$$W = \frac{\rho \cdot g \cdot H^3}{K_D \cdot (\rho_r / \rho_w - 1)^3 \cdot \cot(\alpha)}$$



Anpassung an den Meeresspiegelanstieg  
ist erforderlich!

## Erhöhung der Wellenhöhe Offshore Wellenbrecher ( $d_0=15.0\text{m}$ ) Einfluss auf das erforderliche Blockgewicht (Hudson Ansatz)

SLR	$\Delta H_{m0}$	$\Delta W$
0.3 m	0 % - 2 %	5 %
0.6 m	0 % - 4 %	10 %
0.9 m	0 % - 6 %	20 %

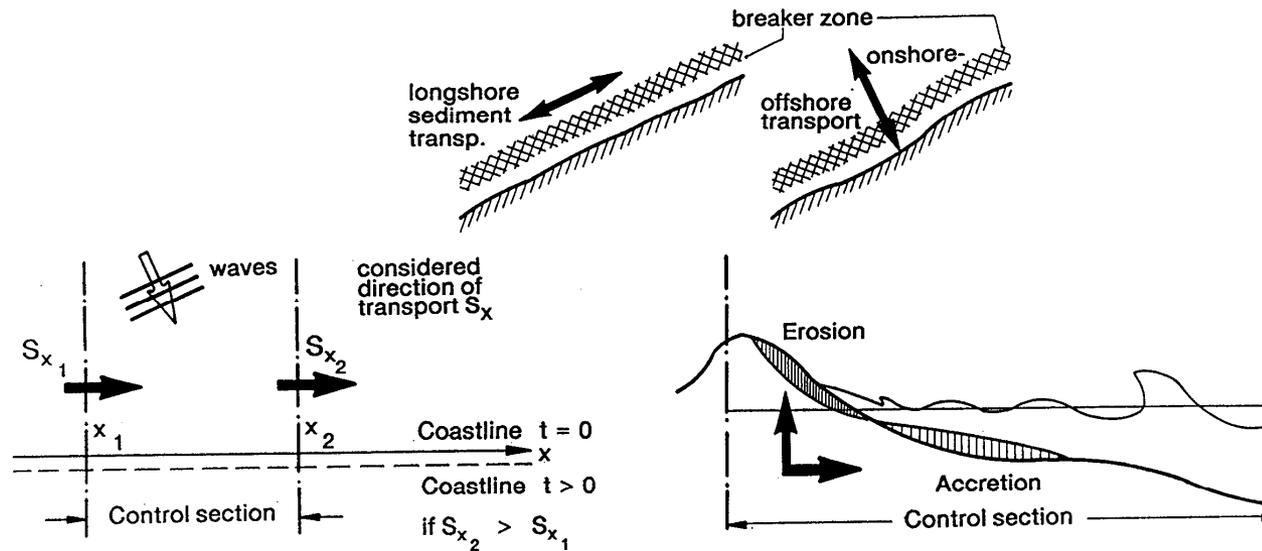
Alle anderen Werte konstant!

$$W = \frac{\rho \cdot g \cdot H^3}{K_D \cdot (\rho_r / \rho_w - 1)^3 \cdot \cot(\alpha)}$$



Anpassung nicht erforderlich!

# Schutz sandiger Küsten - Sedimenttransport



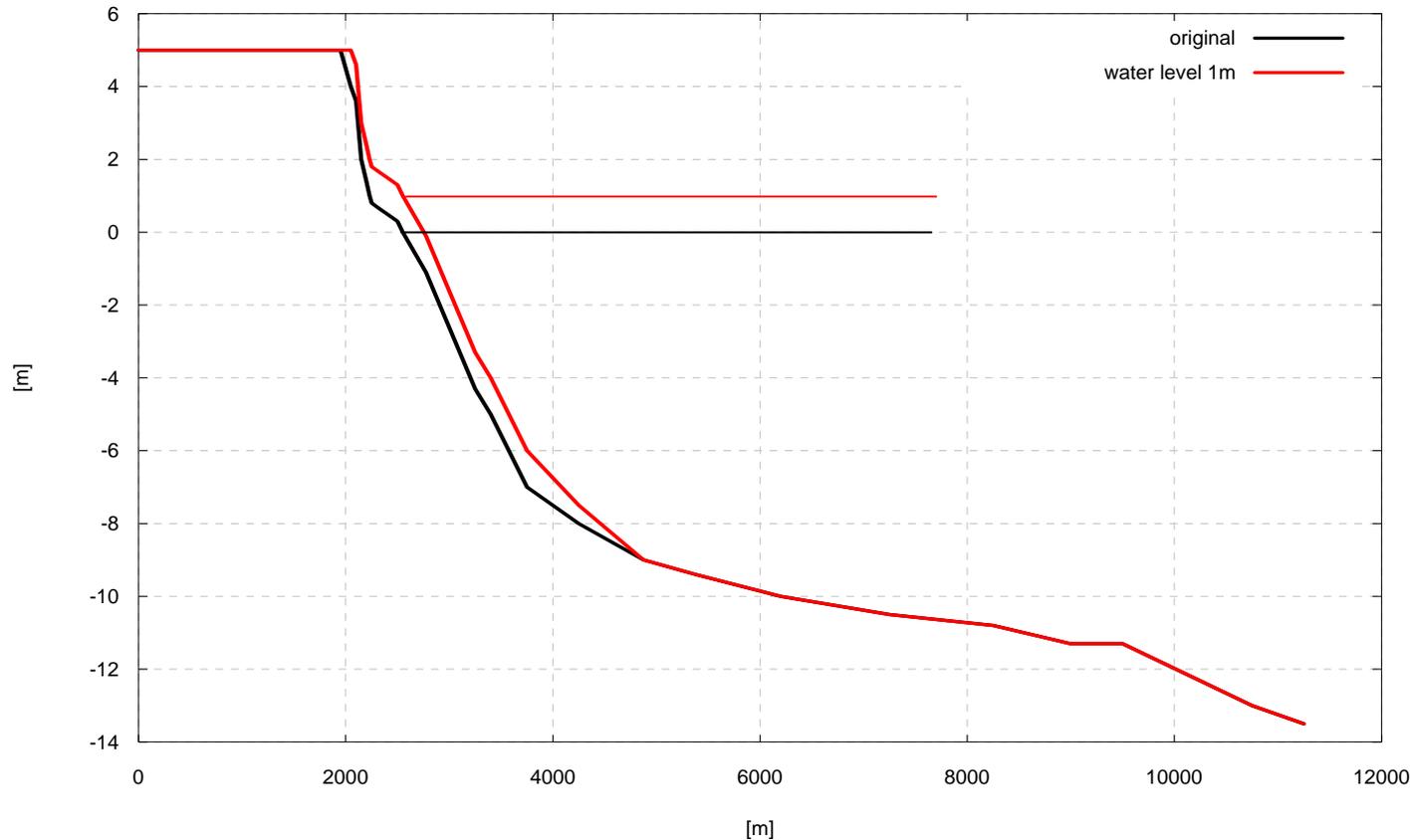
- (a) "Stable coast" :  $S_{x_1} = S_{x_2}$   
(dynamic equilibrium)
- (b) Eroding coast :  $S_{x_2} > S_{x_1}$   
 $\left(\frac{dS}{dx} > 0\right)$
- (c) Accretion :  $S_{x_2} < S_{x_1}$   
 $\left(\frac{dS}{dx} < 0\right)$

"Dynamic" equilibrium, erosion balanced acc. to

- changing water levels
- changing wave climate
- interactions with sediments

# Küstenentwicklung

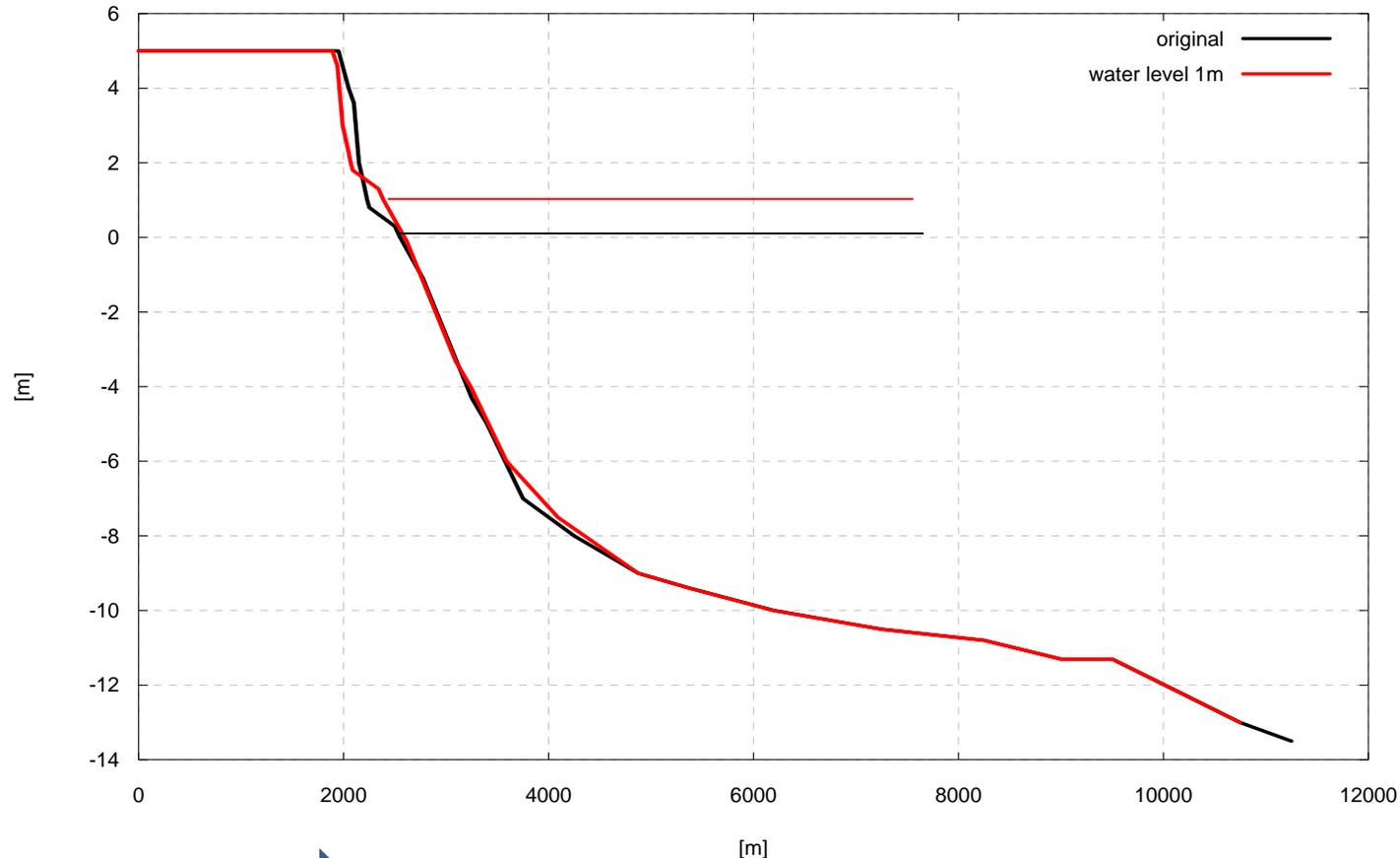
## Reaktion der Küste auf einen dauerhaften Anstieg des Wasserstands



Dynamisches Gleichgewichtsprofil

# Küstenentwicklung

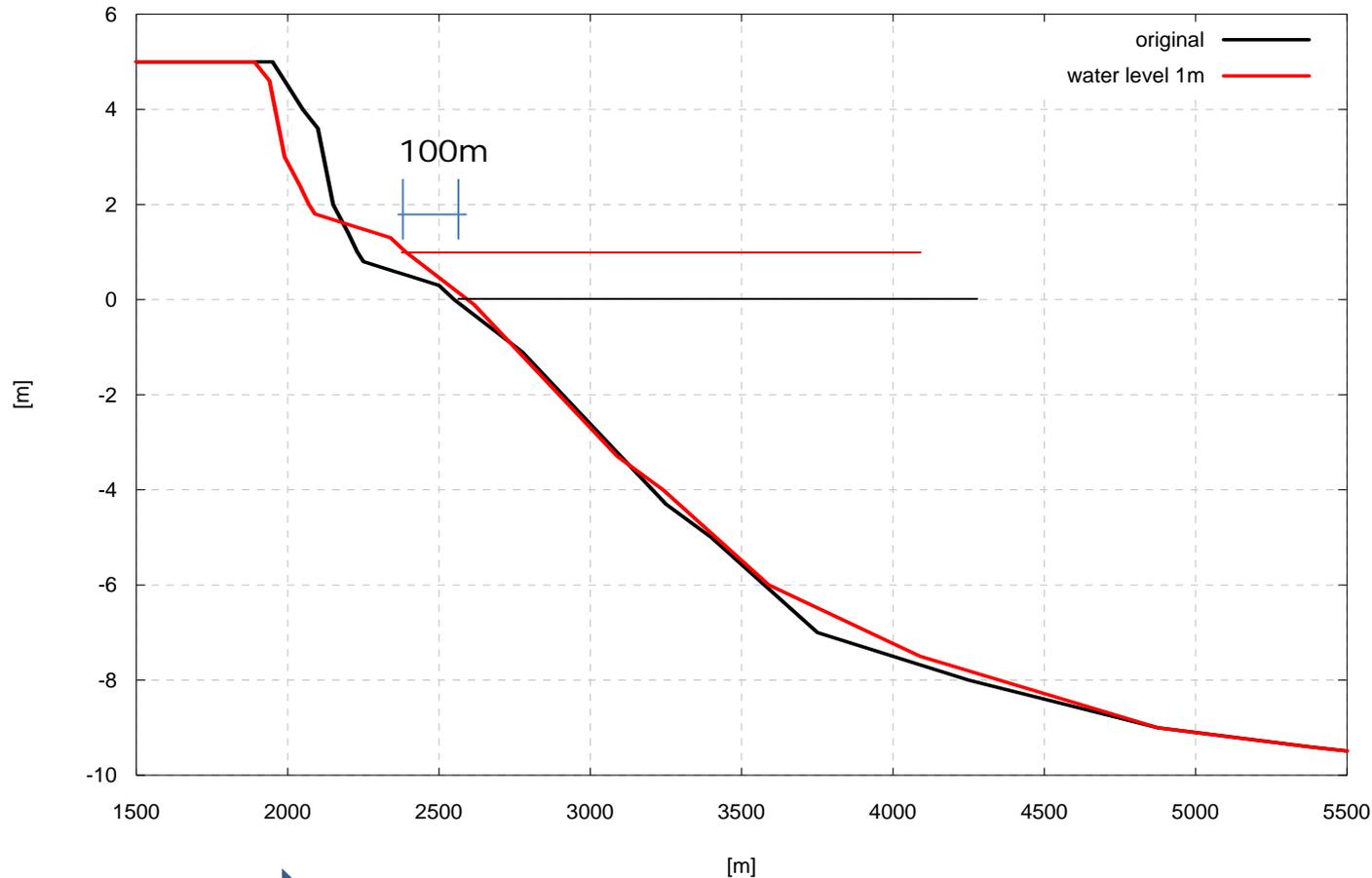
## Reaktion der Küste auf einen dauerhaften Anstieg des Wasserstands



Dynamisches Gleichgewichtsprofil

# Küstenentwicklung

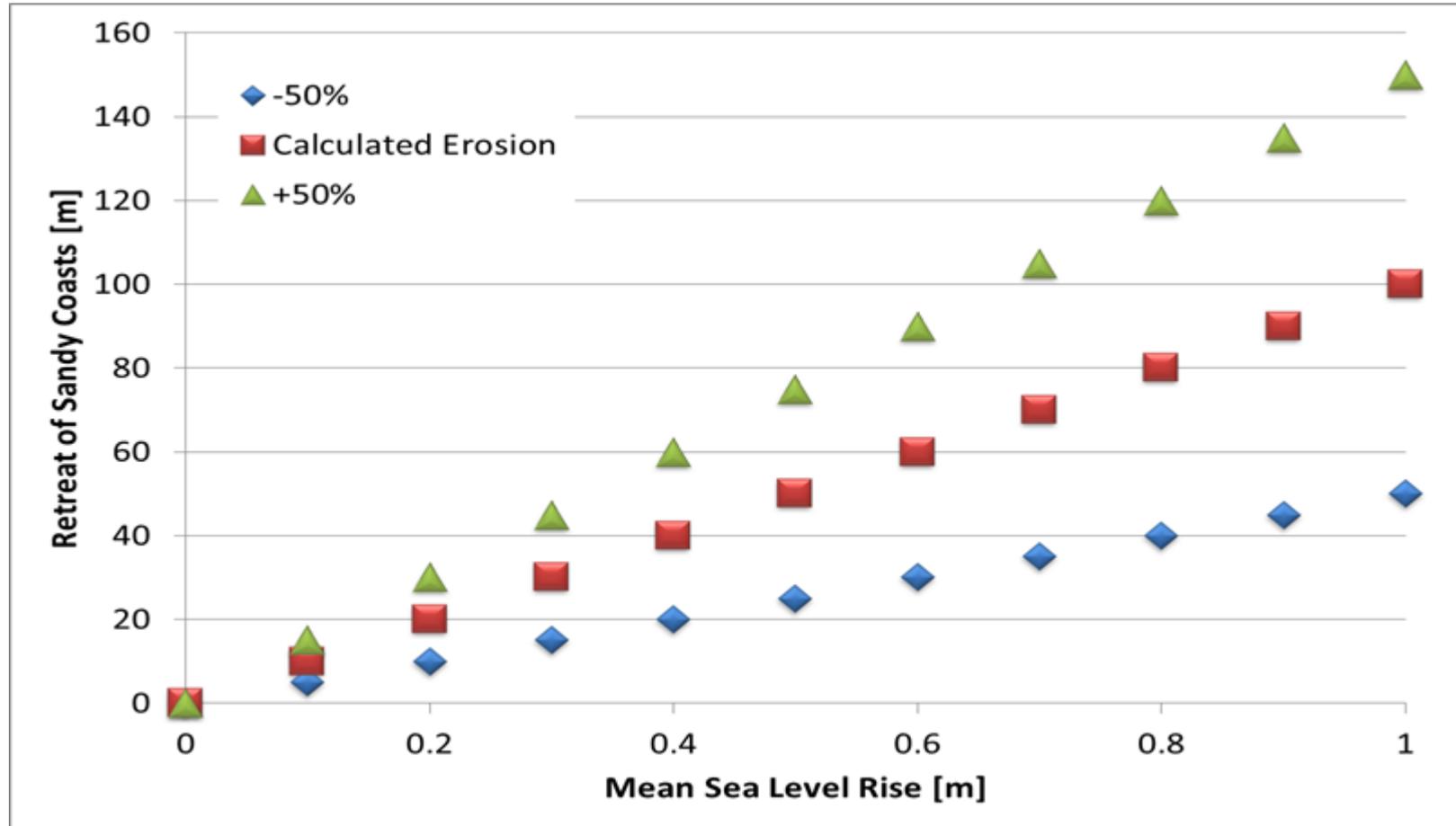
## Reaktion der Küste auf einen dauerhaften Anstieg des Wasserstands



Dynamisches Gleichgewichtsprofil

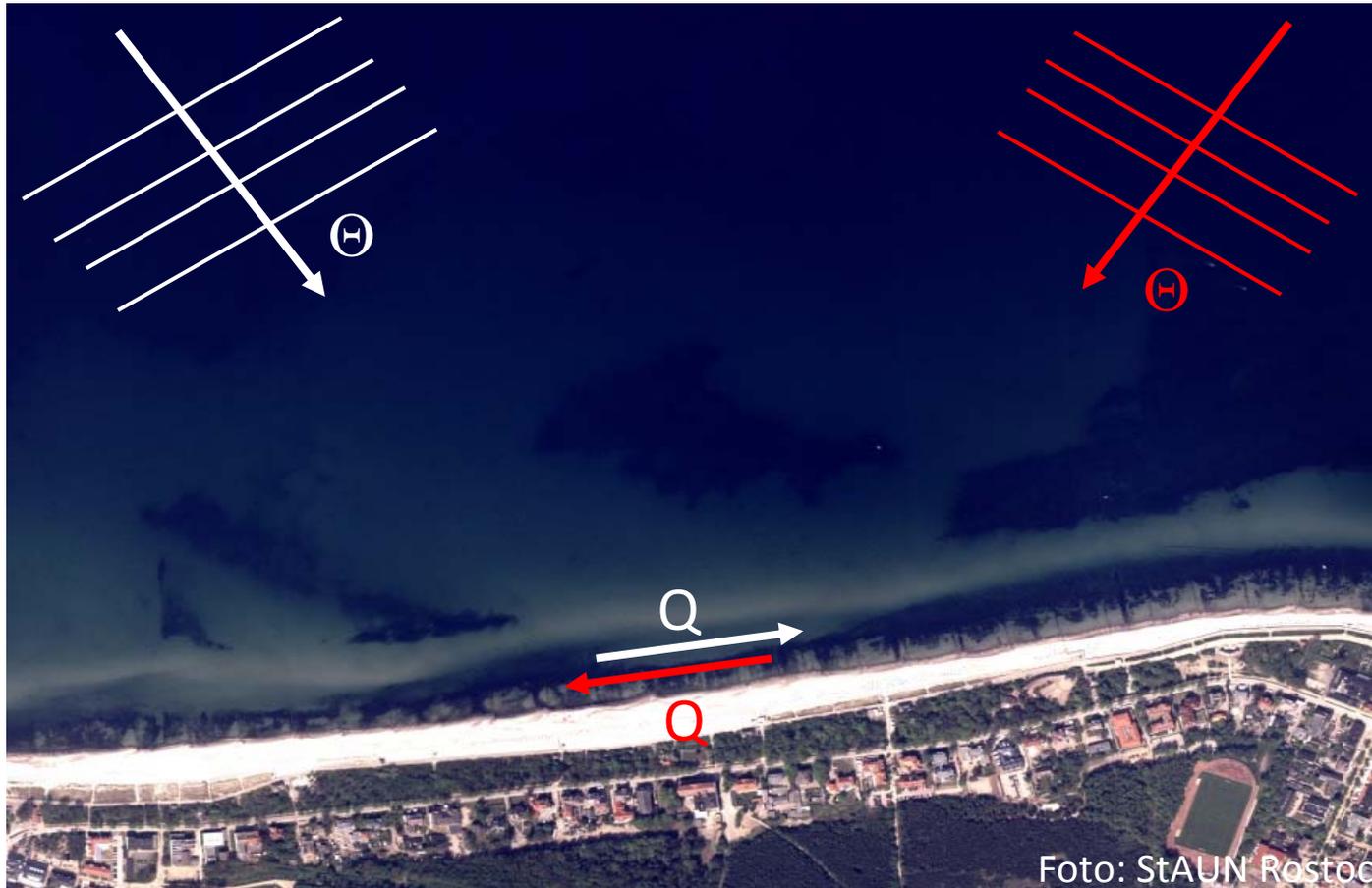
# Küstenentwicklung

## Reaktion der Küste auf einen dauerhaften Anstieg des Wasserstands



Dynamisches Gleichgewichtsprofil

## Einfluss des Klimawandels auf den Küstenlängstransport

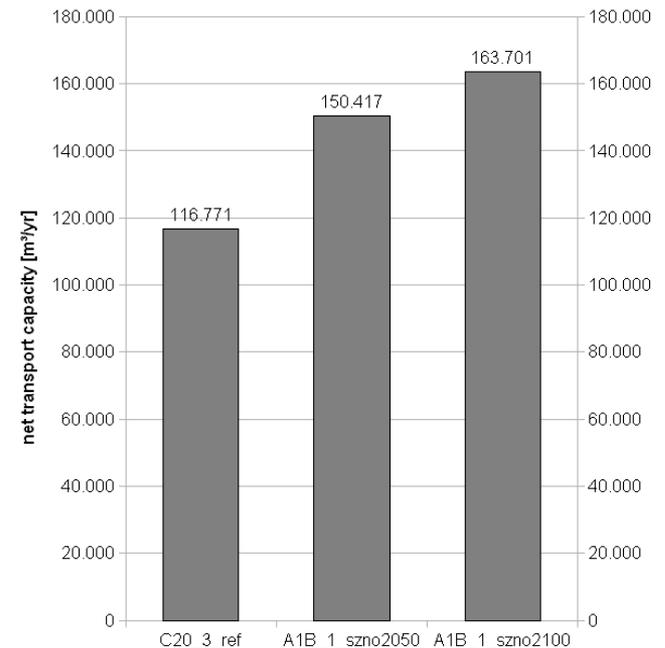
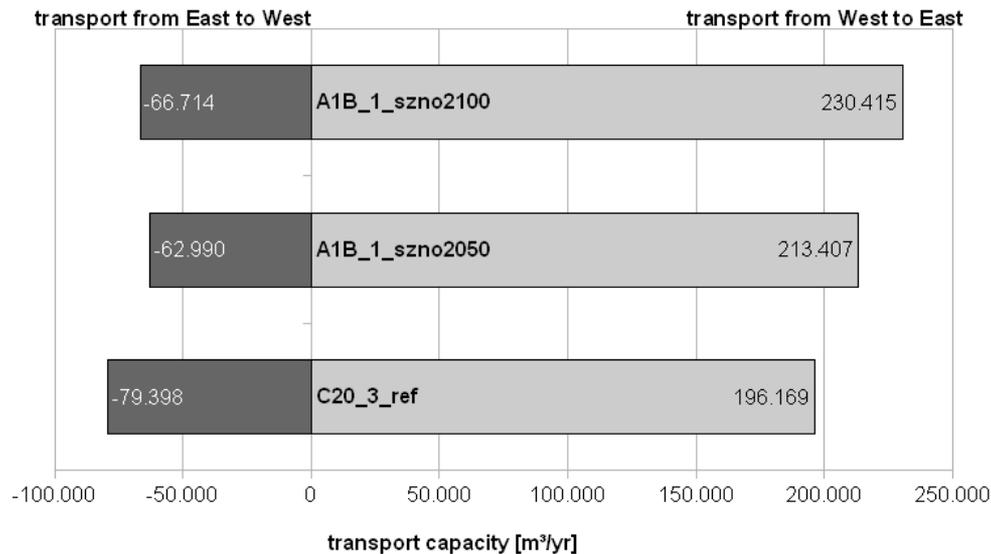


Änderungen der Wellenanlaufrihtung und/oder Strömungen

# Auswirkungen Klimawandel

## Sedimenttransportkapazitäten – Lokation Warnemünde

Ost - West Richtung der Transporte West - Ost



➔ Änderungen der **gerichteten** Transportkapazitäten um bis zu **+20%**  
 Änderungen der **Netto** – Transportkapazitäten um bis zu **+40%**

# Auswirkungen auf die Küste

## Zusammenfassung

Veränderungen von Wasserständen und Seegang

daraus:

- Auswirkungen auf Küste, Strand und Vorstrand
- Höhere Belastungen an Hochwasserschutzanlagen
- Höhere Belastungen auf küstennahe Bauwerke
- Einschränkungen des Sicherheitsniveaus des Küsten- und Hochwasserschutzes



Die Einschränkungen des Sicherheitsniveaus des Küsten- und Hochwasserschutzes erfordern eine Anpassung von Küsten- und Hochwasserschutzkonzepten

## Anpassungsstrategien

Grundsätzlich werden fünf Anpassungsstrategien zur Bewältigung der Folgen des Klimawandels verfolgt:

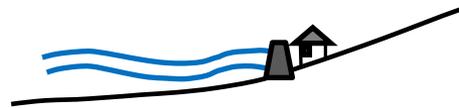
➤ Do nothing



➤ Rückzug



➤ Linie halten



➤ Vorwärtsverteidigung



➤ Beschränkte Eingriffe



Nach IPCC 1991

# Anpassungsstrategien Beispiel Vollschutzdüne

## aktuelle Situation



## Linie seawärts vorverlegen



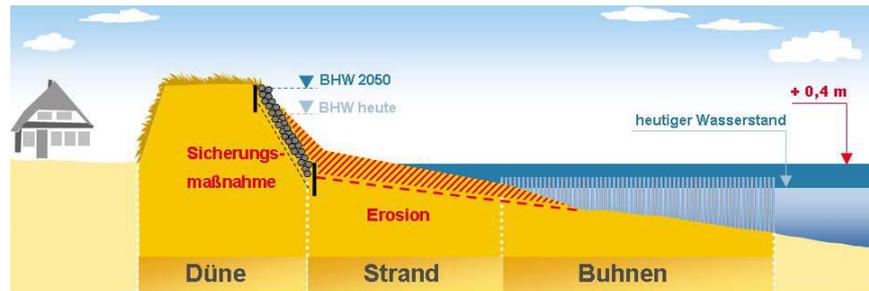
## do nothing



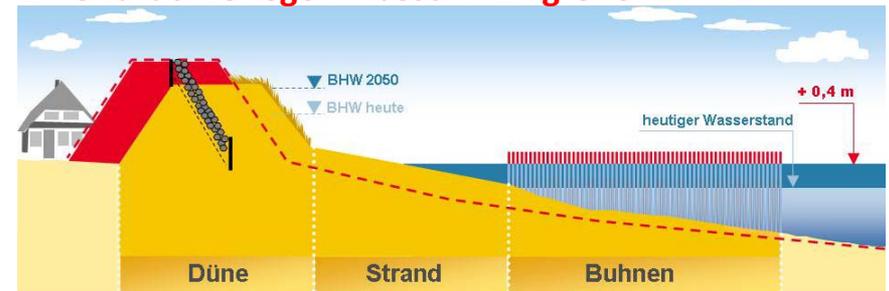
## beschränktes Eingreifen



## Linie halten



## Linie zurückverlegen + beschr. Eingreifen

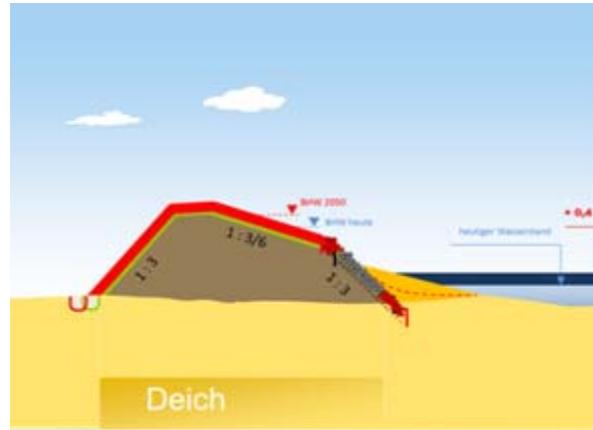


# Anpassungsstrategien: Beispiel Deiche

**Actual Situation**



**Hold the Line**



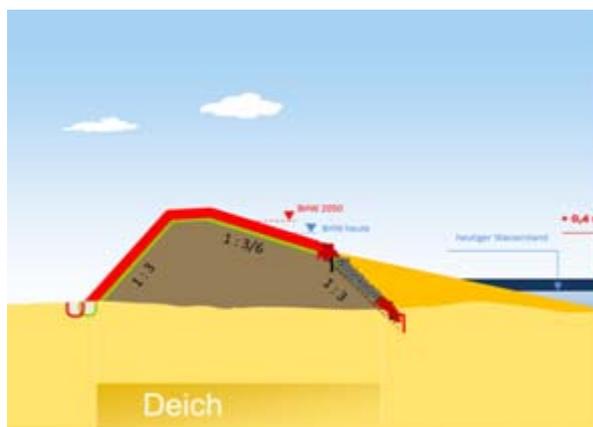
**Limited Action**



**do nothing**



**Seaward shift of the Coast**

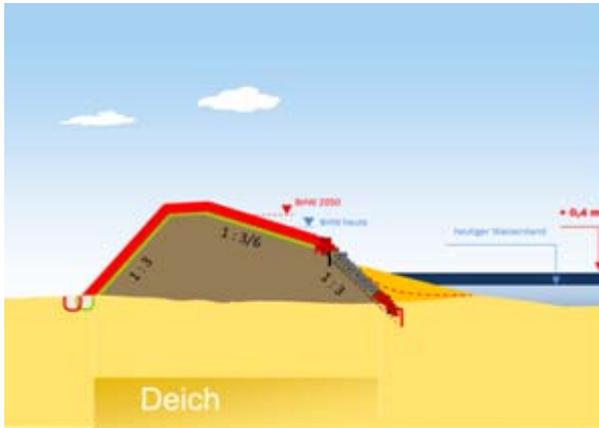


**Managed re-alignment + limited action**



# Anpassungsstrategien: Beispiel Deiche II

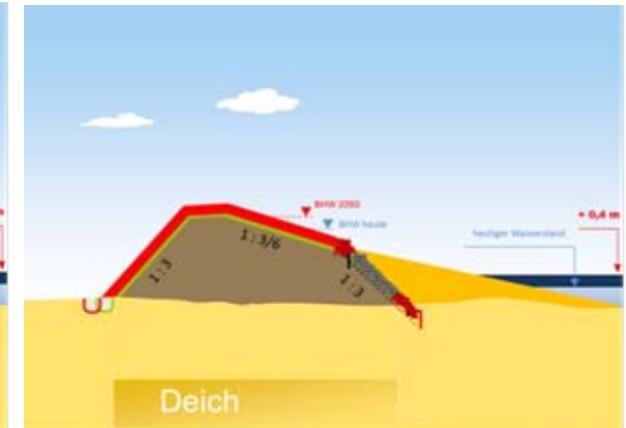
Hold the Line



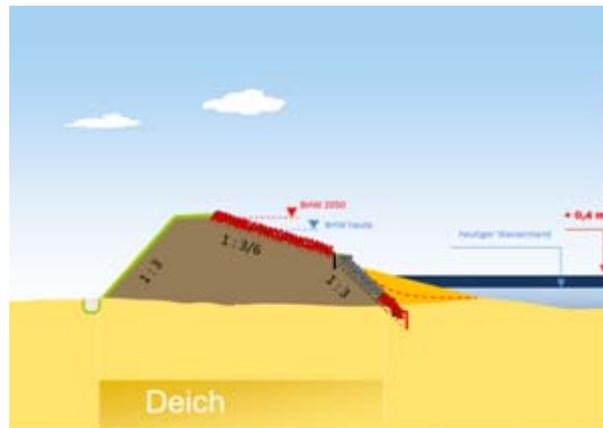
Hold the Line



Seaward shift of the Coast



Hold the Line



Seaward shift of the Coast



Seaward shift of the Coast



# Klimawandel und Küstenschutz

## Zusammenfassung

- Klimawandel hat direkte und indirekte Auswirkungen im Küstenraum
  - Wasserstände werden ansteigen
  - Wellenhöhen werden ansteigen (zumindest in einzelnen Abschnitten)
  - Wellenrichtungen werden sich möglicherweise verändern
  - Häufigkeit und Intensität von Stürmen wird ansteigen

- Höhere Belastungen auf Bauwerke
  - Erosion der Küsten
  - Änderungen des (küstenparallelen) Sedimenttransports
- } Anpassungsstrategien für Bauwerke

- Erhöhung der Versagenswahrscheinlichkeit
  - Überflutete Bereiche werden größer
  - Höhere Wasserstände in überfluteten Gebieten
- } Höheres Risiko im Küstenraum

# Klimawandel und Küstenschutz

## Anpassung

- Anpassungsmaßnahmen können dazu führen, dass das Erscheinungsbild der Küste verändert wird
  - Verfelsung der Küsten
  - Erosion von Stränden vor Deichen / Deckwerken und anderen harten Bauwerken
  - Rückzug aus Küstengebieten und/oder
  - Veränderung von Nutzungen im Küstenraum
  
- Sofern das Erscheinungsbild erhalten werden soll:
  - Querprofil der Küste muss dem Meeresspiegelanstieg in der gesamten aktiven Zone folgen
  - Strandersatz und Sandvorspülungen etc. sind / werden erforderlich, um das Erscheinungsbild der Küste zu erhalten
  - Klassische Küstenschutzanlagen können die Küstenentwicklung positiv beeinflussen und Abschnitte loka schützen

Danke für die Aufmerksamkeit!

