

Wasserbauliche Untersuchungen als Grundlage für die nachhaltige Sicherung der Halligen im Klimawandel

Prof. Dr.-Ing. Peter Fröhle

Dr.-Ing. Edgar Nehlsen

Yohannis Tadesse (M. Sc.)

Dipl.-Ing. Vincent Gabalda

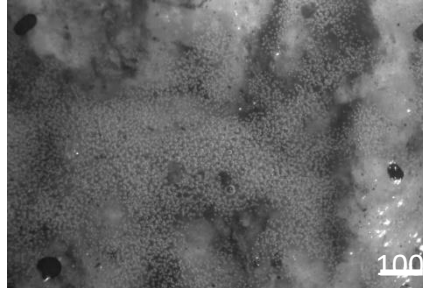
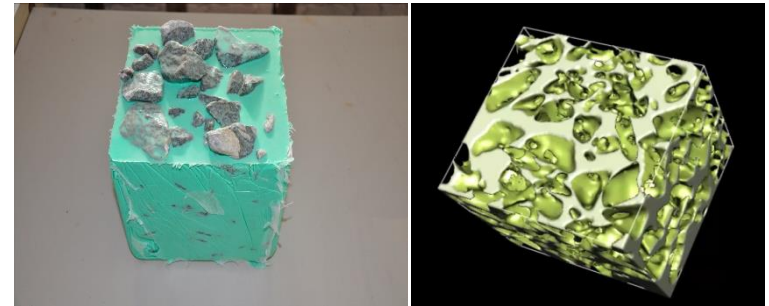
Institut für Wasserbau

Technische Universität Hamburg

Untersuchungen der TUHH – Fragestellungen 1

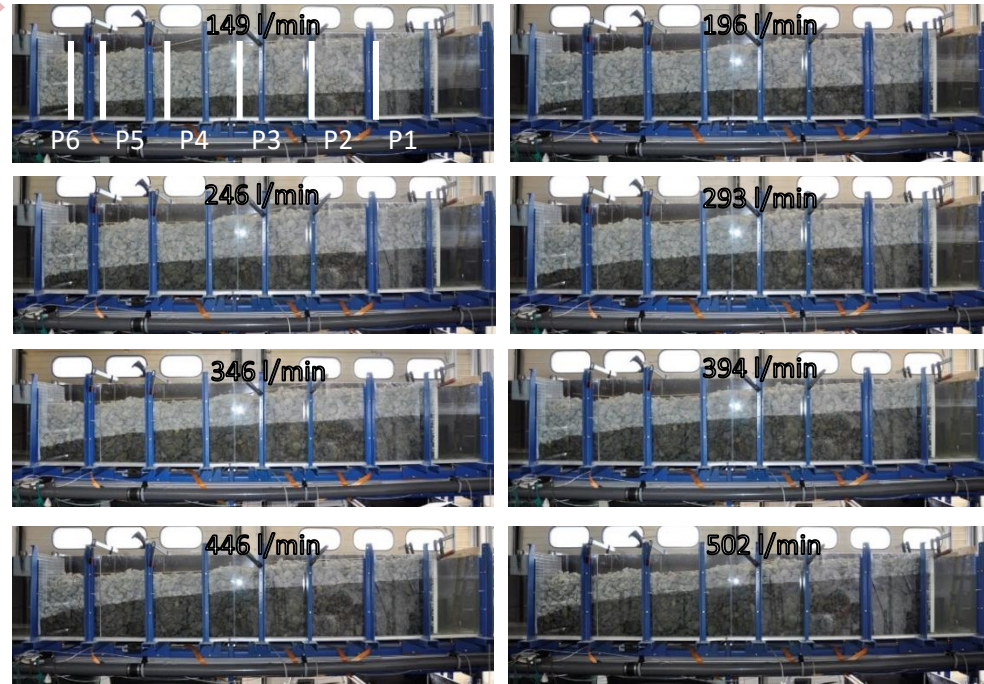
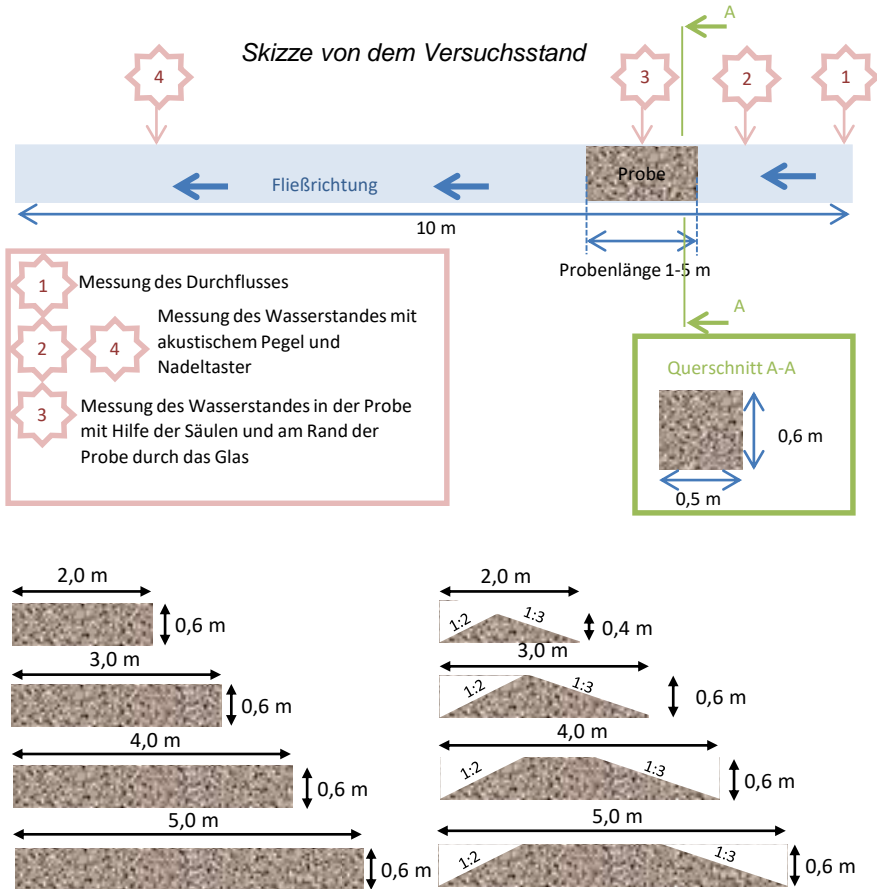
➤ Hydraulische Modellversuche an Halligdeckwerken (ElastoCoast)

- 1. Porosität / 2. Porenstruktur
- 3. Wasserdurchlässigkeit
- 4. Sedimentrückhalt / -rücklösung
- 5. Abrasion Polyurethan-Beschichtung
- 6. Wellenbelastung an der Halligkante



3. Untersuchung der Durchlässigkeit

b. Tests mit Horizontaldurchströmung in einer offenen Rinne



Wasserstand in der Probenlänge (3m) [Bilder: Gabalda 2014]

Untersuchende Profile

3. Untersuchung der Durchlässigkeit

Vergleich des Durchflusses mit und ohne Steinschüttung

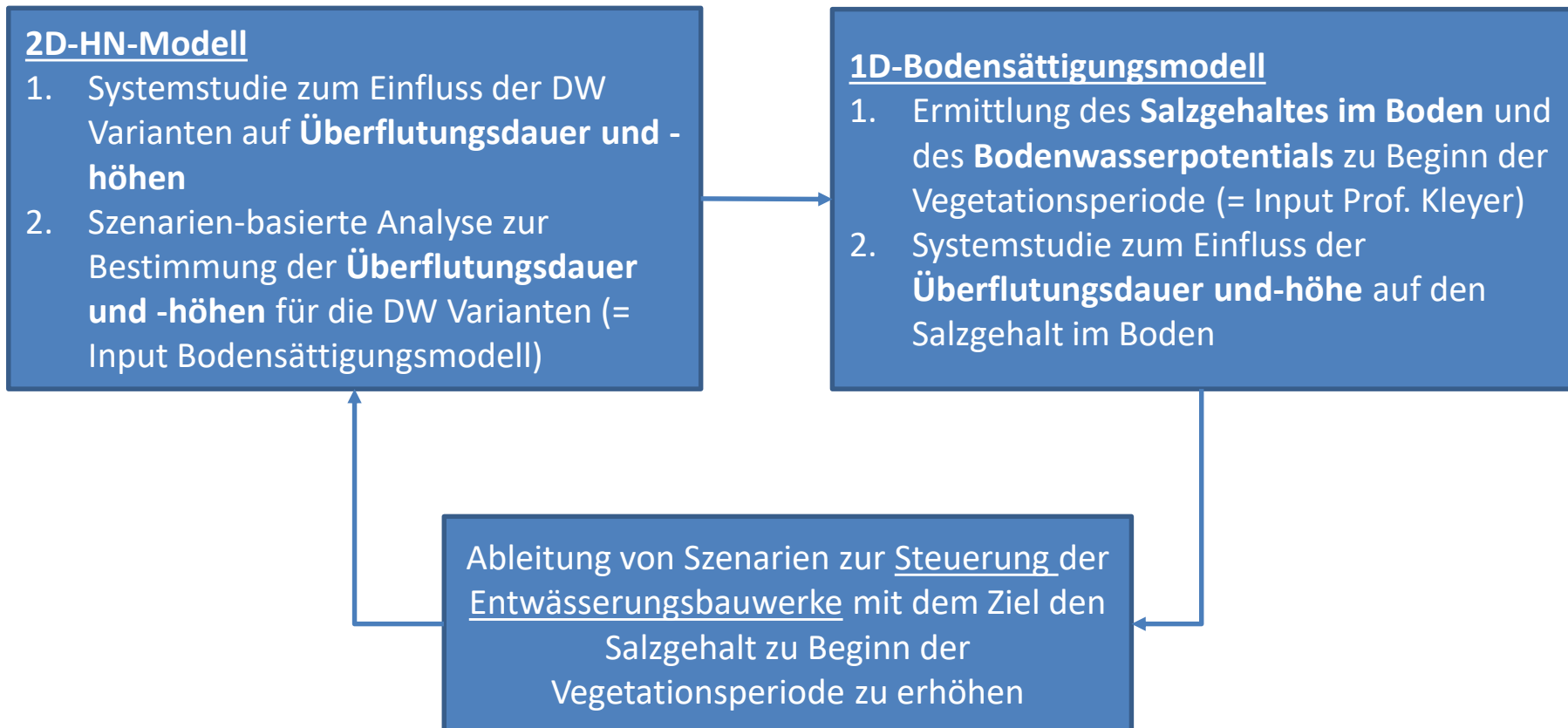
Überstauhöhe	q (l/(s*m)) (mit Halligigel 2m - Durchströmlänge)	q (l/(s*m)) (mit Halligigel 3m - Durchströmlänge)	q (l/(s*m)) (mit Halligigel 4m - Durchströmlänge)	q (l/(s*m)) ohne Halligigel Telemac	q (l/(s*m)) ohne Halligigel Poleni
0,1m	2	2	2	63	54
0,2m	7	5	4	186	152
0,3m	15	10	8	368	280
0,4m	26	17	13	609	431
0,5m	40	26	19	910	602
0,6m	57	36	25	1270	792

Der Zufluss von Wasser auf eine Hallig durch einen Halligigel in Abhängigkeit von der Durchströmlänge für stationäre Verhältnisse wird um rd. **95%** (2m Durchströmlänge) bis **98%** (4m-5m Durchströmlänge) vermindert

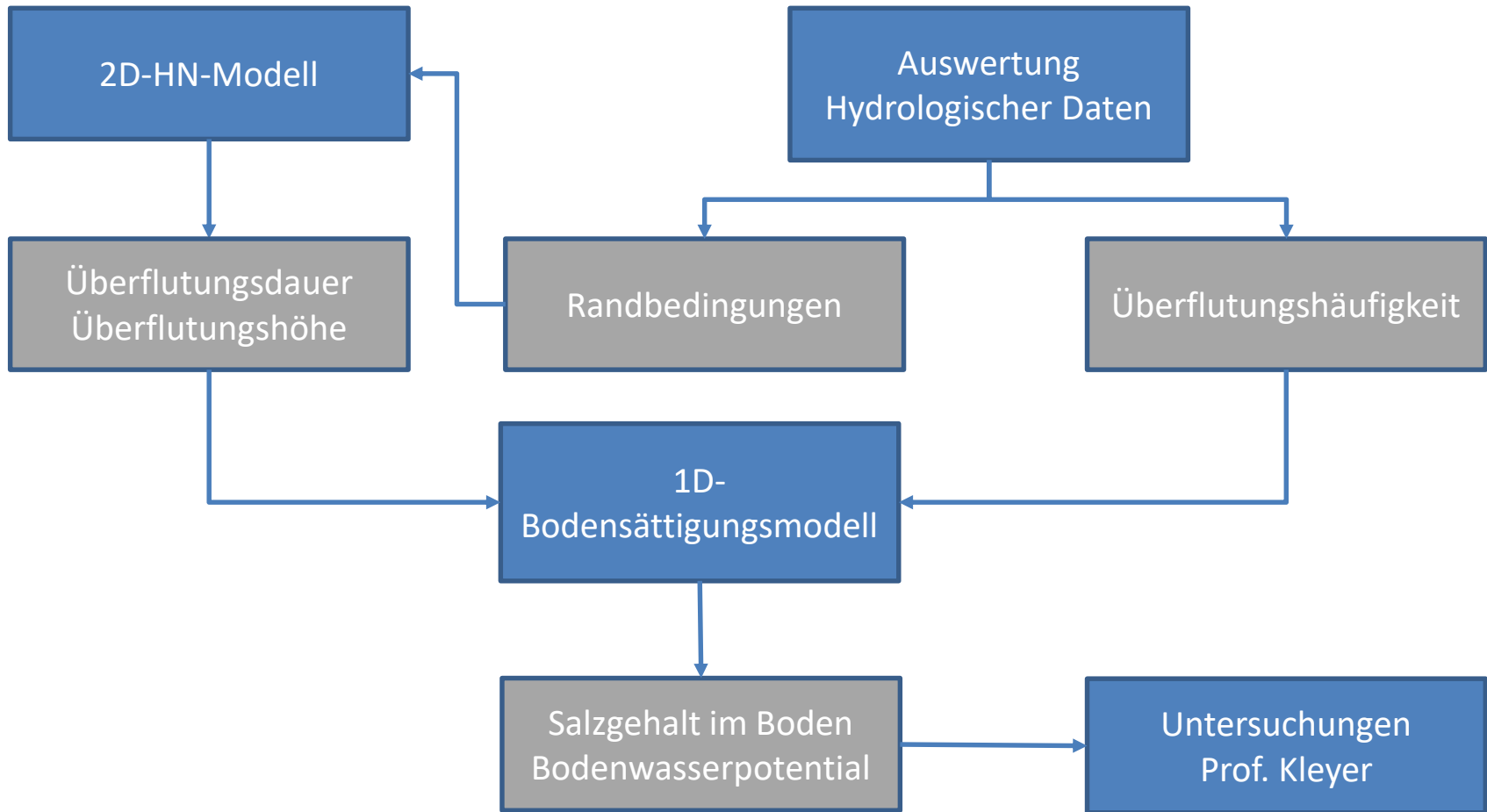
Untersuchungen der TUHH – Fragestellungen 2

- Modellierung von Überflutung und Entwässerung von Halligen – am Beispiel der Hallig Langeneß
 - Untersuchung des Einflusses einer Erhöhung oder sonstigen baulichen Änderung der Halligkanten-Befestigung / Höhe der Deckwerke auf
 - die Anzahl der Überflutungen
 - die Dauer der Überflutungen
 - Untersuchung der Veränderung der Überflutungsdauer durch
 - eine veränderte Steuerung der Entwässerungsbauwerke der Hallig nach Landunter
 - Anlage von Geländeschwellen (=veränderte Topographie) zur Verzögerung des Abflusses
 - einen veränderten Meeresspiegel
 - Aufbau und Betrieb eines hydrologischen Prinzipmodells zur Modellierung des Wasserhaushalts in der ungesättigten Bodenzone als Grundlage für die landschaftsökologische Bewertung im Hinblick auf die Aussüßung

Vorgehen

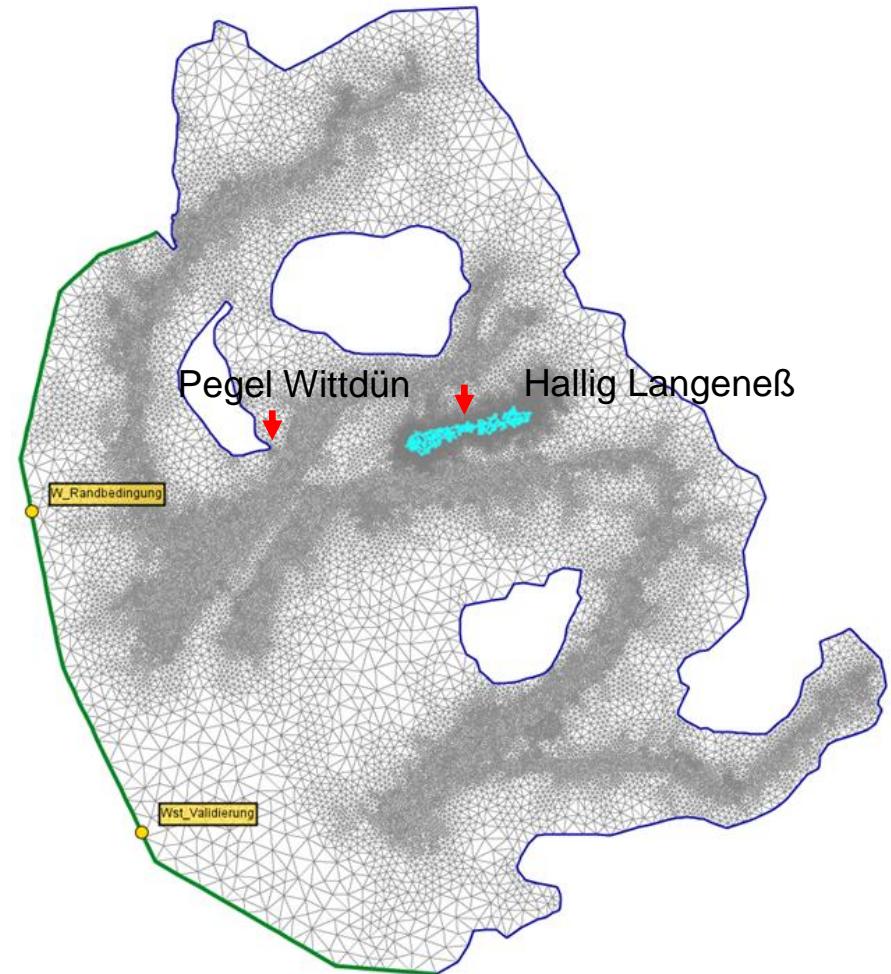


Modelle und Parameter



Modellaufbau – Datengrundlage zur Gitternetzgenerierung

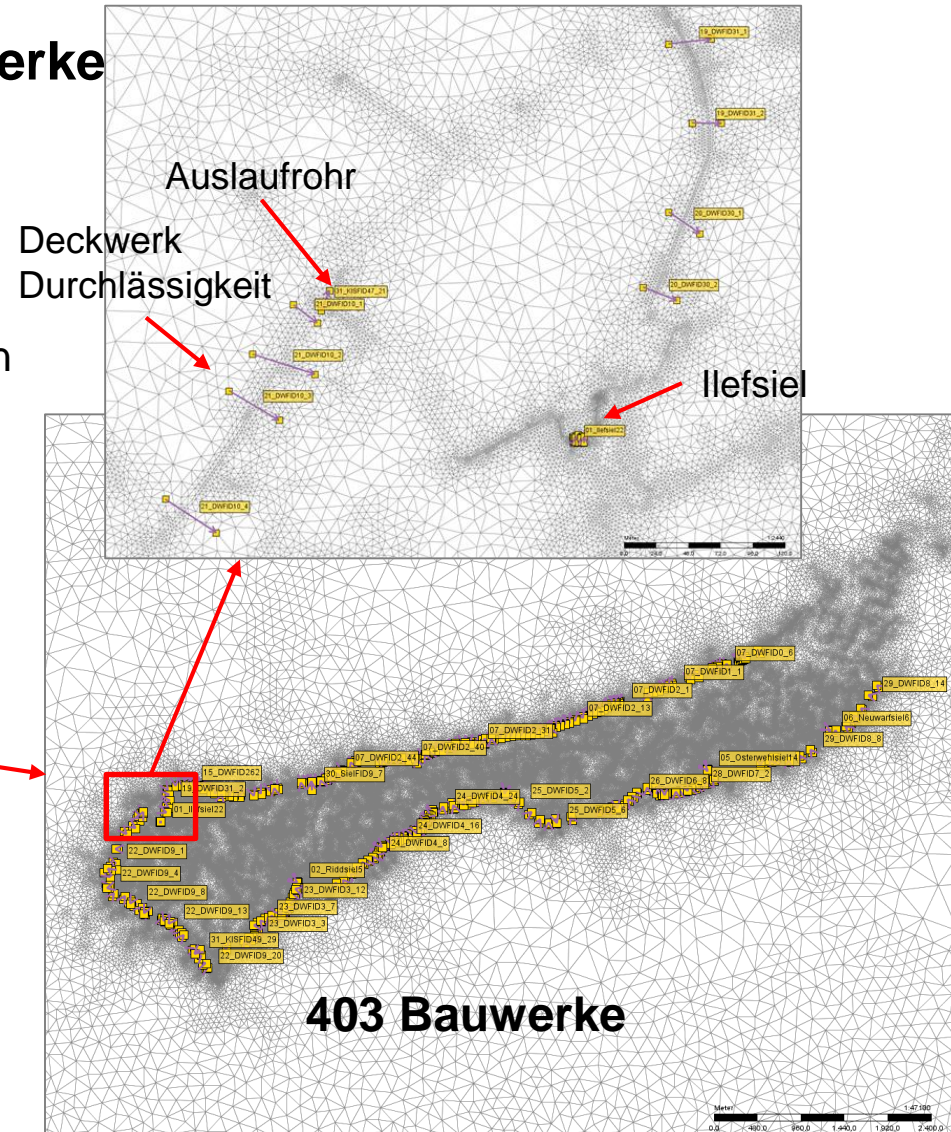
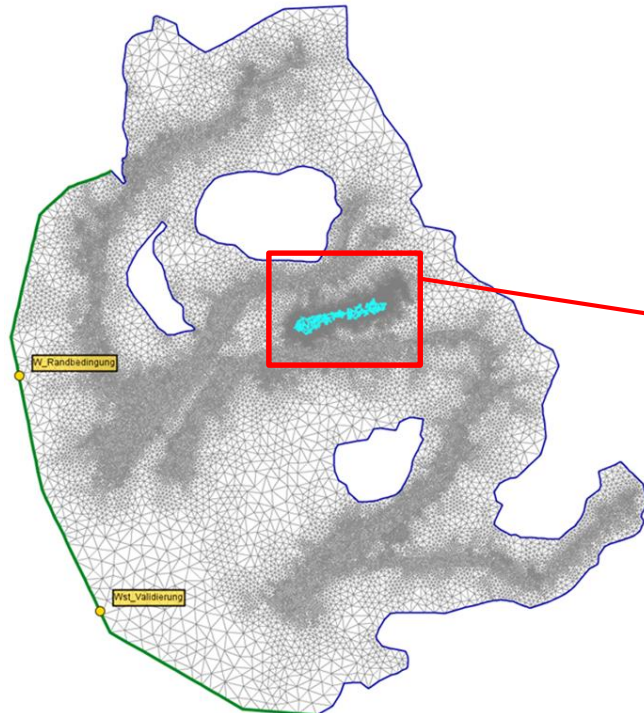
- Höhendaten
 - DGM_2014 (LKN)
 - Bathymetrie von 2012 (LKN)
 - Deckwerk Profildaten (LKN)
- Bruchkanten
 - Prielsystem der Hallig Langeneß
 - Deckwerksdaten (LKN)
 - Rauigkeitsdaten (Prof. Kleyer)
- Model und Rechengitternetz optimiert für Hallig Langeneß
- Anzahl Gitternetzelemente
 - ca. 834.000
 - davon 90 % auf der Hallig Langeneß



Modellaufbau – Einbindung Bauwerke

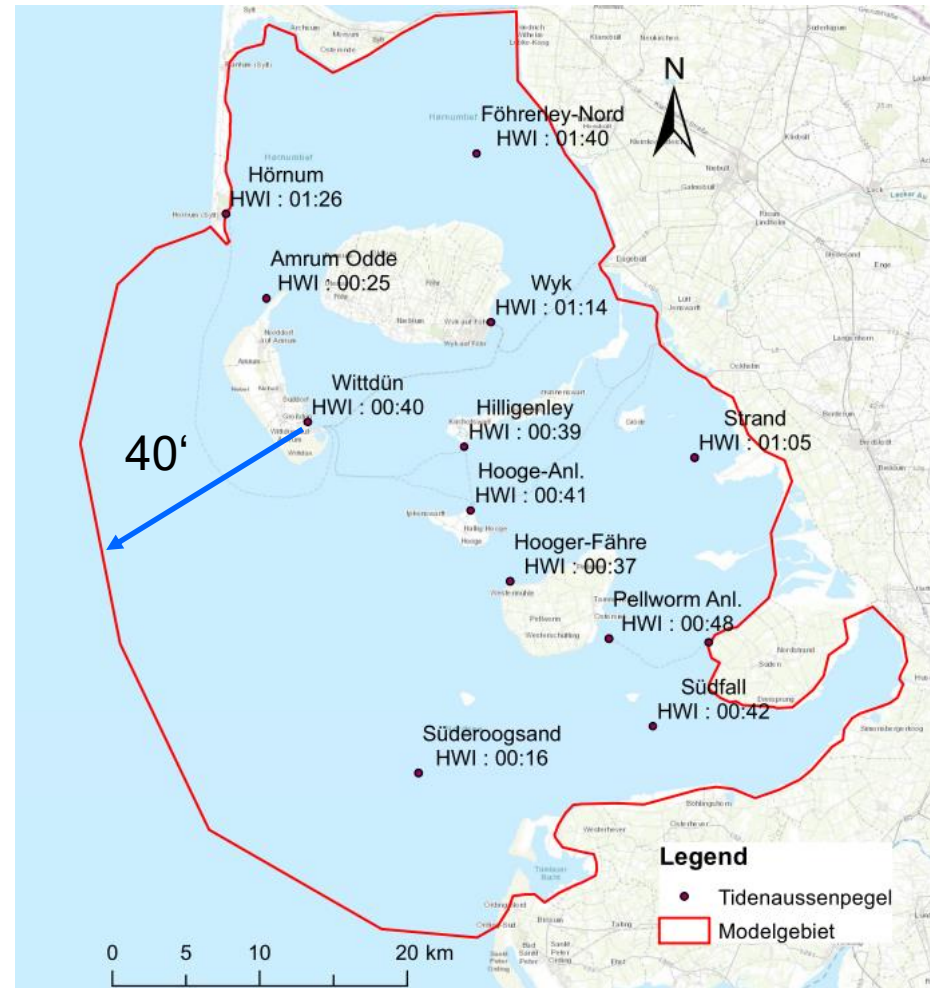
Berücksichtigte Bauwerkstypen im Modell

- Siele
- Auslaufrohre
- Deckwerk (Durchlässigkeit)
 - Durchlässigkeit basiert auf Ergebnissen von Projekt Hallig Deckwerke



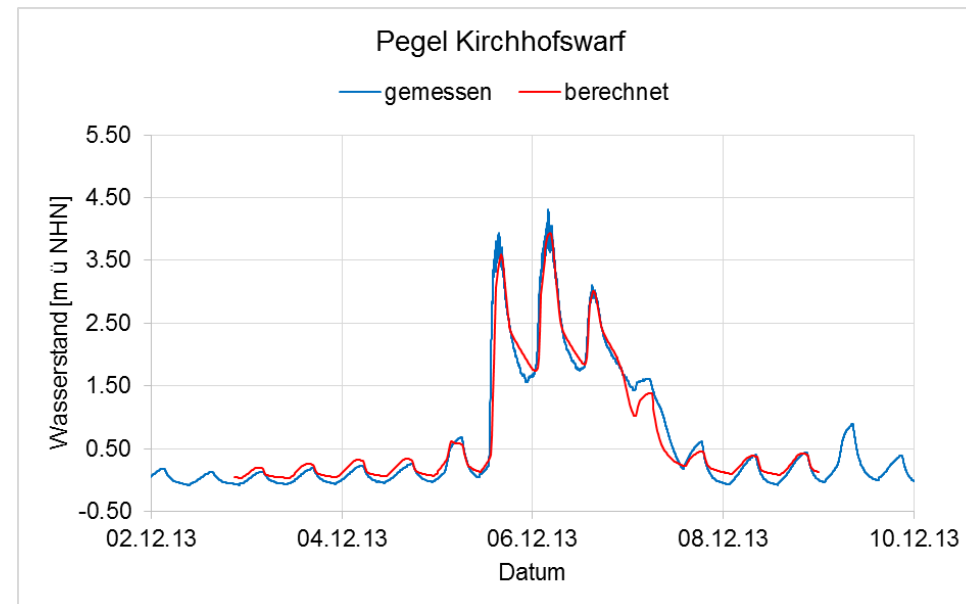
Modellaufbau – Randbedingung

- Modellrandbedingung am offenen Rand (Nordsee)
 - Gemessener Wasserstand am Pegel Wittdün, zeitlich versetzt um 40 Minuten (orientiert an astronomischen Gezeiten)
 - Ergebnis: gute Übereinstimmung im Bereich Hallig Langeneß (siehe folgende Folien zur Kalibrierung und Validierung)



Kalibrierung/Validierung

- Parameter: Rauheit und Wirbelviskosität
- Sehr gute Abbildung der gemessenen Wasserstände
- Geringfügige Abweichungen => zurückführbar auf Abweichungen zwischen Realität und Modell, z.B.
 - Steuerung der Entwässerungsbauwerke (Siele)
 - Zustand der Bauwerke



Untersuchte Zustände

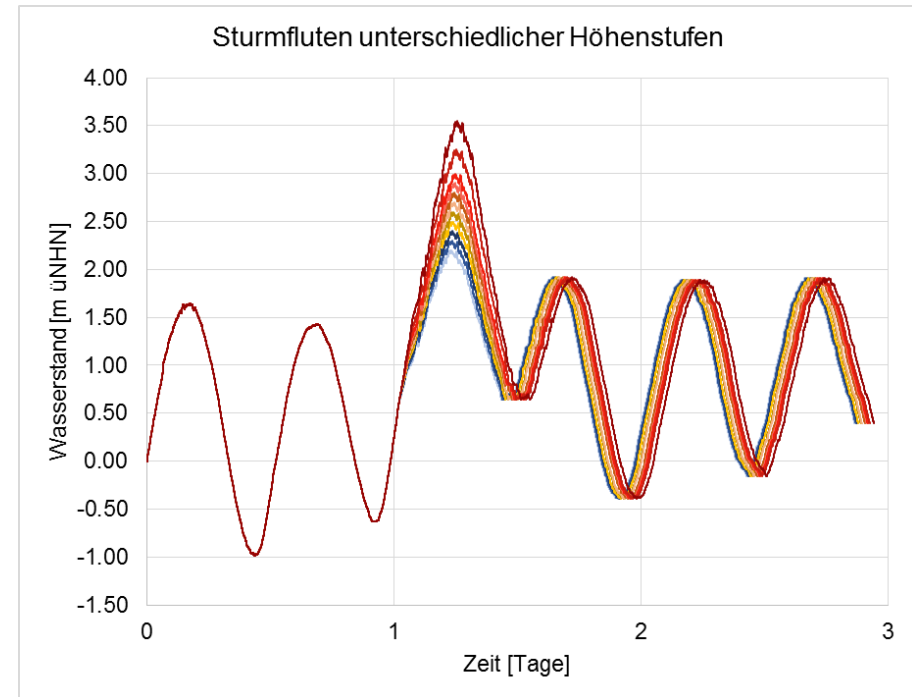
- Ist-Zustand
- Variante I: 80 cm über GOK → gemäß der Baupläne (Genehmigungsantrag)
- Variante II: 50 cm Erhöhung der Deckwerke, d.h. 30 cm über GOK
- (Variante III: Variante I mit Lücken)
- Ohne Halligrauhstreifen („Igel“)

Systematische Untersuchungen zu den Auswirkungen der 4 DW Varianten bei Überflutungen

- Modellrechnungen für alle vier DW Varianten
 - Ist-Zustand
 - Variante 1
 - Variante 2
 - Ohne „Igel“

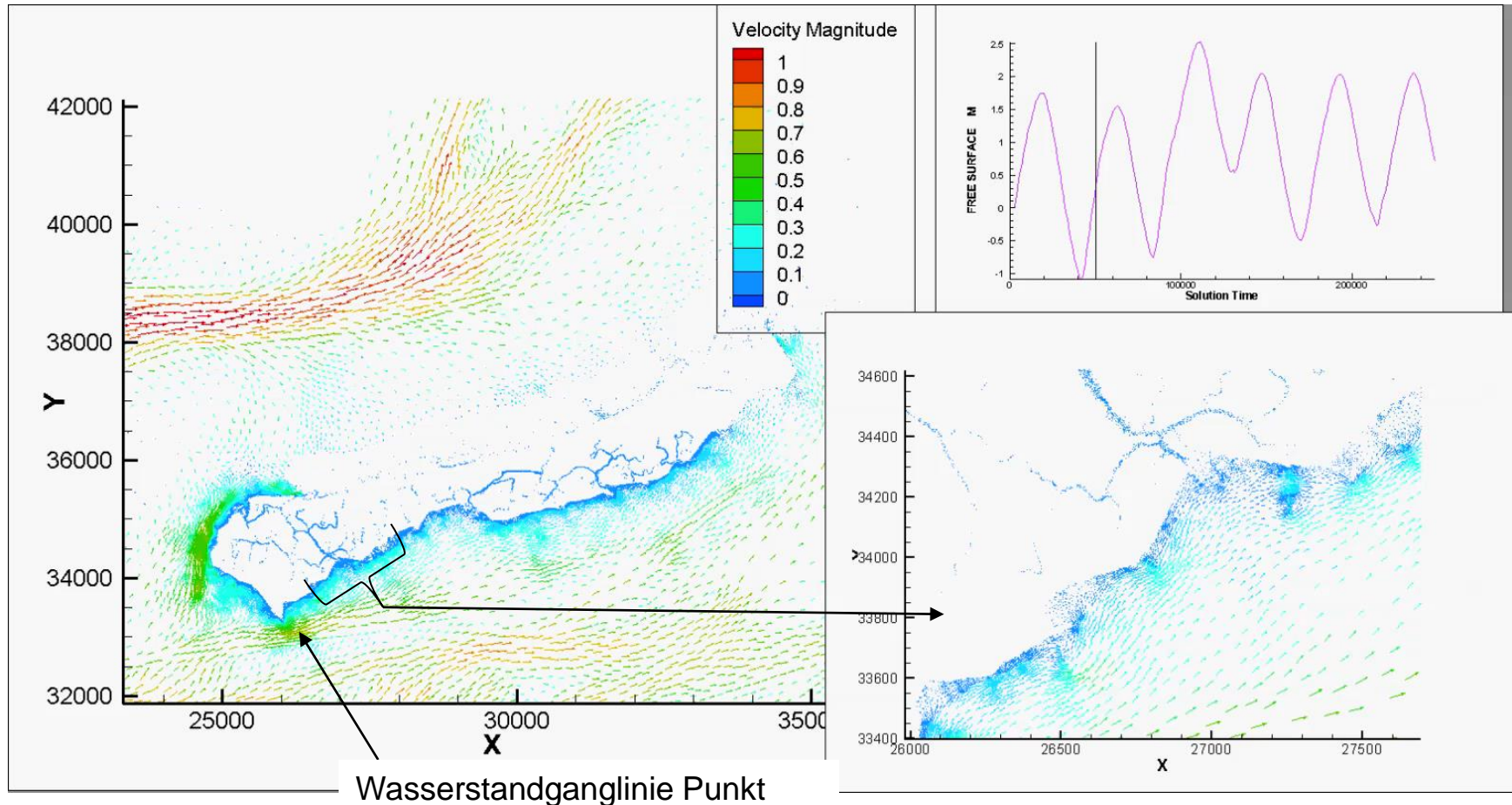
- Modellrechnungen für Sturmfluten unterschiedlicher Höhenstufen
 - 2,10 mNHN
 - 2,2 mNHN
 - 2,3 mNHN
 - 2,4 mNHN
 - 2,5 mNHN
 - 2,6 mNHN
 - ...
 - 3,55 mNHN

- Insgesamt **48** Rechenläufe



Ausgewählte Ergebnisse: Ablauf einer Überflutung

Sturmflutstufe = 2,4 m NHN (Ist-Zustand)



Ausgewählte Ergebnisse: Überflutete Flächen

Sturmflutstufe = 2,4 m NHN

Ist-Zustand



Bemerkung: Überflutungsflächen in der Nähe von Hallig Langeneß gezeigt

Ausgewählte Ergebnisse: Überflutete Flächen

Sturmflutstufe = 2,4 m NHN

DW Variante 1



Bemerkung: Überflutungsflächen in der Nähe von Hallig Langeneß gezeigt

Ausgewählte Ergebnisse: Überflutete Flächen

Sturmflutstufe = 2,4 m NHN

DW Variante 2



Bemerkung: Überflutungsflächen in der Nähe von Hallig Langeneß gezeigt

Ausgewählte Ergebnisse: Überflutete Flächen

Übersicht über die überfluteten Flächen:

Insgesamt sind in den untersuchten Höhenstufen folgende Flächen überflutet [ha]

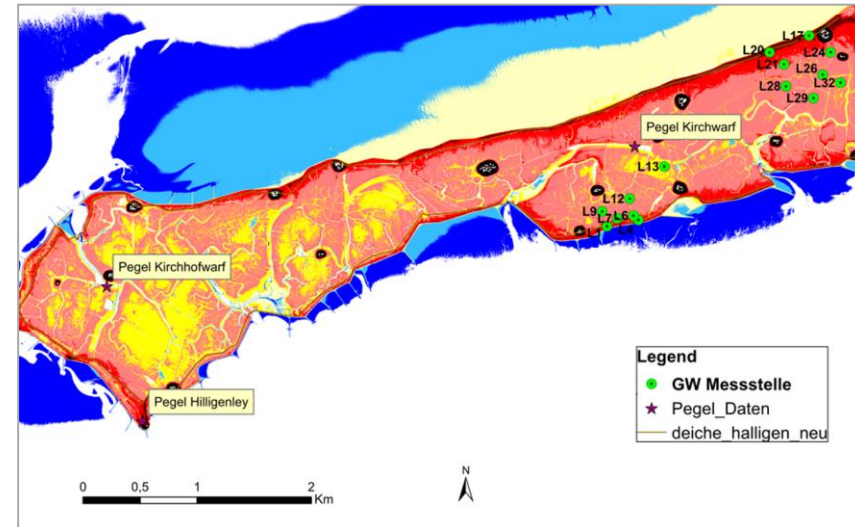
Höhenstufe	Ist-Zustand	Variante I	Variante II	Ohne „Igel“
2,10m NHN	99,6	99,0	99,0	122,9
2,20m NHN	218,3	213,5	213,4	455,9
2,30m NHN	472,3	451,2	453,2	746,9
2,40m NHN	828,9	812,8	822,4	873,6
2,50m NHN	883,8	882,4	883,5	888,5
2,60m NHN	889,8	889,5	889,8	890,4

Fazit: Überflutungssimulationen

- Für Wasserstände $< \text{NHN}+2.60\text{m}$ haben die Halligdeckwerke ortsabhängig (lokal) einen
 - Einfluss auf die Überflutungsdauer
 - Einfluss auf die Anzahl der Überflutungen
- Für Wasserstände $\geq 2.60\text{m}$ haben Halligdeckwerke nur noch einen geringen
 - Einfluss auf Überflutungsdauer
 - Einfluss auf die Anzahl der Überflutungen
- Die Höhenlage der Halligdeckwerke hat in der untersuchten Bandbreite keinen signifikanten Einfluss auf die Überflutungsdauer und die Anzahl der Überflutungen

Datengrundlage

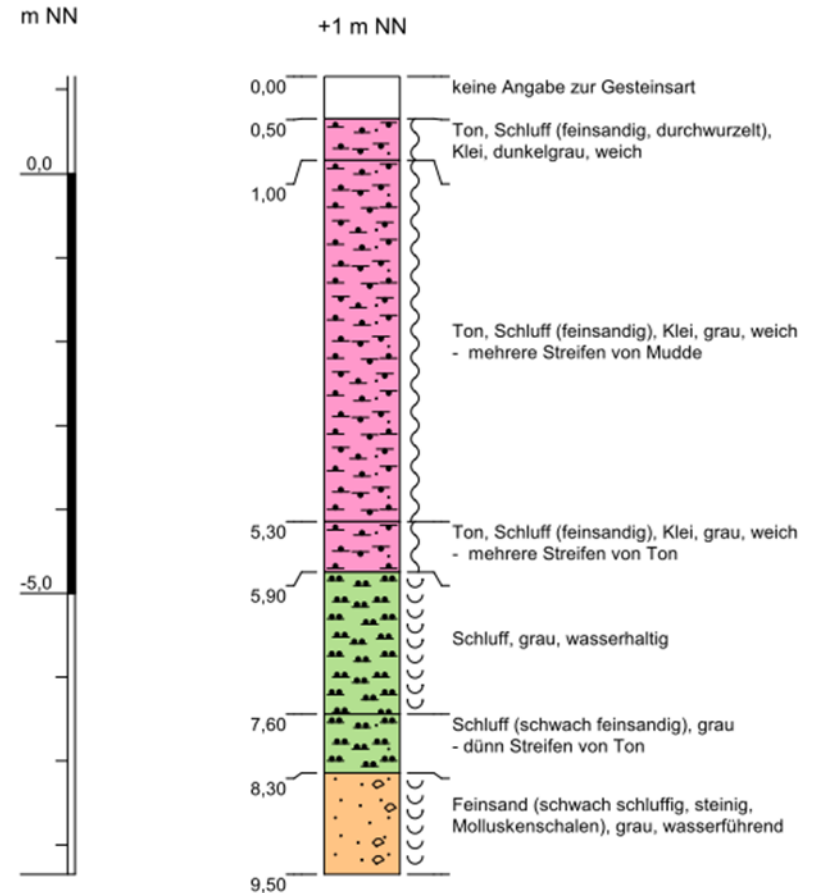
- Aufbau des Untergrunds der Hallig Langeness
 - Voruntersuchungen von Prof. Kleyer (bis 80 cm Tiefe)
 - Bodenaufschlüssen aus dem geologischen Landesarchiv
 - Eigenschaften der Bodenschichten aus Literatur bzw. KA5
- Randbedingungen (oberer Rand)
 - Überstauhöhe bzw. Niederschlage
- Randbedingungen (unterer Rand)
 - mittlere Tide
- Kalibrierung und Validierung
 - Messungen aus 2013/2014 von Prof. Kleyer



Bodenaufschlüsse

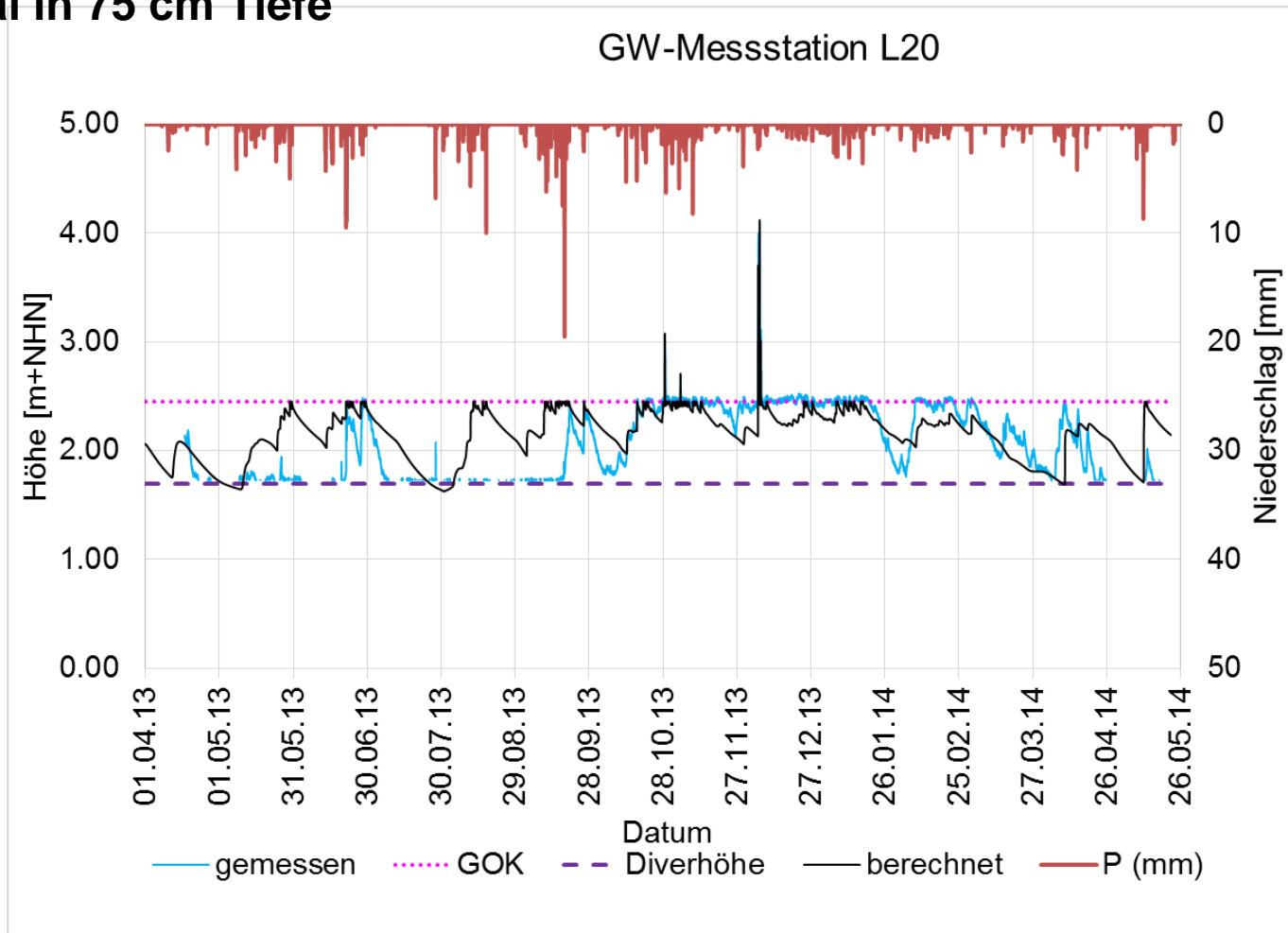
- Etwa 75 Aufschlüsse mit einer Tiefe > 4 m auf der Hallig Langeness
- All Profile zeigen eine mächtige Kleischicht
- Aufschluss 1317/0011/B wird als repräsentativ für die Hallig Langeneß angesetzt

Aufschluss: 1317/0011/B



Kalibrierung / Validierung

Potential in 75 cm Tiefe



Kalibrierung / Validierung

Zusammenfassung

- Die berechnete Potentialehöhen in 75 cm Tiefe stimmen recht gut mit den gemessenen Werte (Prof. Kleyer) überein
- Die berechneten Salzgehalte in 10 cm Tiefe
 - Stimmen in der Mehrzahl mit den gemessenen Werten (Prof. Kleyer) recht gut überein
 - weichen an einigen wenigen Messstationen von den gemessenen Werte ab. Dies wird jeweils auf lokale Einflussfaktoren, wie zum Beispiel der Einfluss von nahe an der Messstation liegenden Prielen zurückgeführt werden.



Bodenwasserhaushaltsmodell ist prognosefähig

Überschreitungen – über 2.20 mNHN (Ist-Zustand)

WWJ/Monat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Summe
2001	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	5	7
2002	2	4	1	0	0	0	0	0	0	3	0	1	11
2003	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3
2004	2	2	2	0	0	1	0	0	1	0	0	2	10
2005	4	2	1	0	0	0	0	0	0	1	1	2	11
2006	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	4
2007	7	0	1	0	0	1	0	0	0	0	3	5	17
2008	4	3	2	0	0	0	0	0	0	1	2	1	13
2009	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	3
2010	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	0	4
2011	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	4
2012	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	5	10
2013	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	3
2014	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	3	5
2015	4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	4	9
2016	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1	8
Mittlewert	1.9	0.9	0.5	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.3	0.8	1.2	1.9	7.6

Auswertungen hydrologischer Daten

Repräsentativer Ablauf der Überflutungen innerhalb eines Jahres

Monat (Kalender)	Anzahl der Überschreitungen über 2,2 mNHN		Sturmflutstufe	Angenommenes Ereignis (WWJ)
	Mittelwert	Gewählte Anzahl		
1	1.9	2	2.6; >2.8	2015
2	0.9	1	2.6	2016
3	0.5	1	2.2	2015
4	0.0	0		
5	0.0	0		
6	0.1	0		
7	0.0	0		
8	0.0	0		
9	0.3	0		
10	0.8	1	2.4	2011
11	1.2	1	2.8	2016
12	1.9	2	2.4; 2.7	2015 / 2012

Repräsentatives Niederschlagsjahr – DWD Station Wrixum, Föhr

- Niederschlagsjahr 2009 wird als repräsentativ angenommen

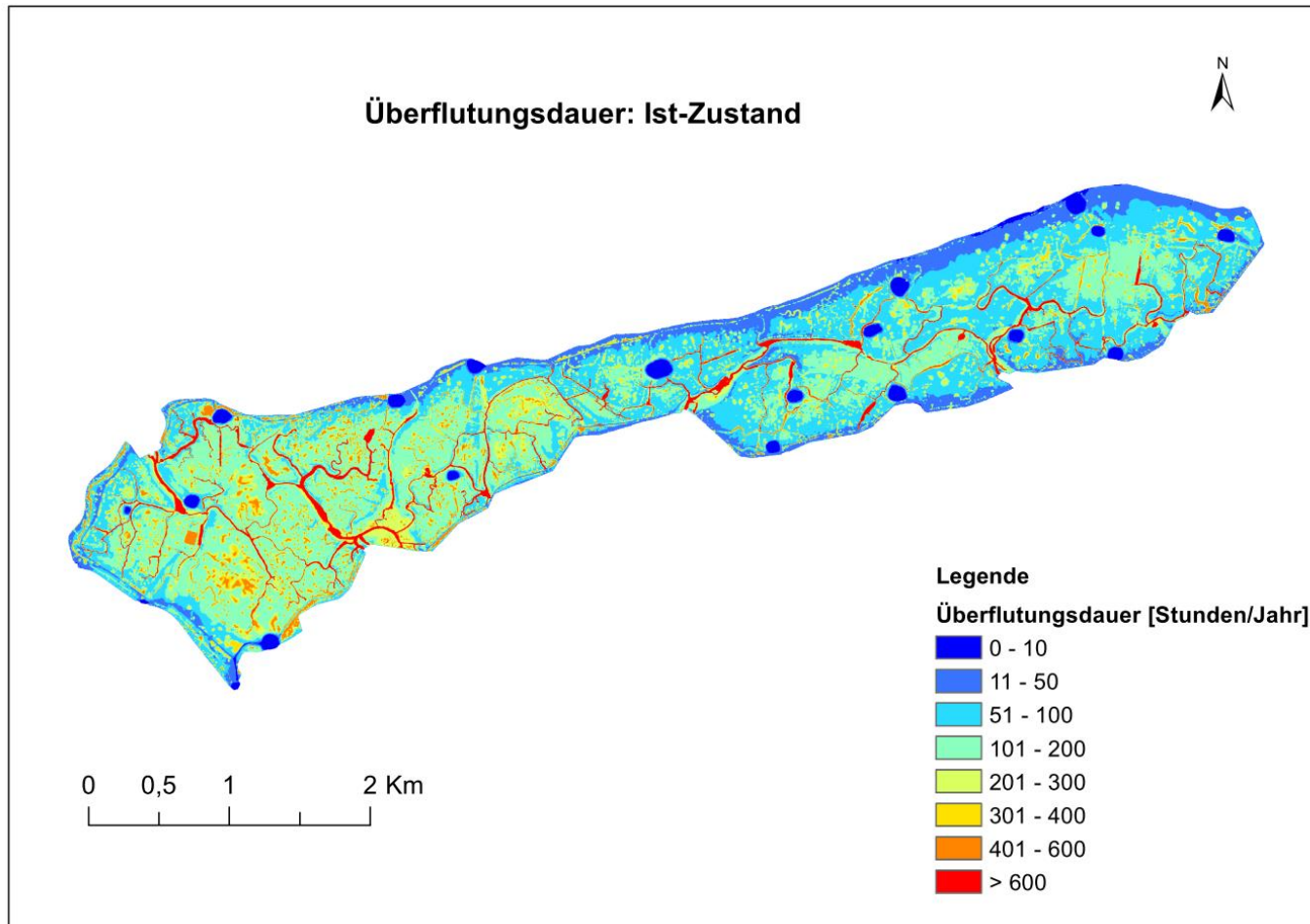
Jahr	Niederschlag [mm/Jahr]
2006	702,0
2007	874,7
2008	814,9
2009	833,8
2010	844,5
2011	727,4
2012	966,1
2013	843,7
2014	945,5
2015	927,3
2016	702,6
Mittelwert	834,8

Zusammenfassung

- Ableitung repräsentativer Sturmfluten (für eine Sturmflutsaison)
- Ableitung repräsentatives Niederschlagsjahr

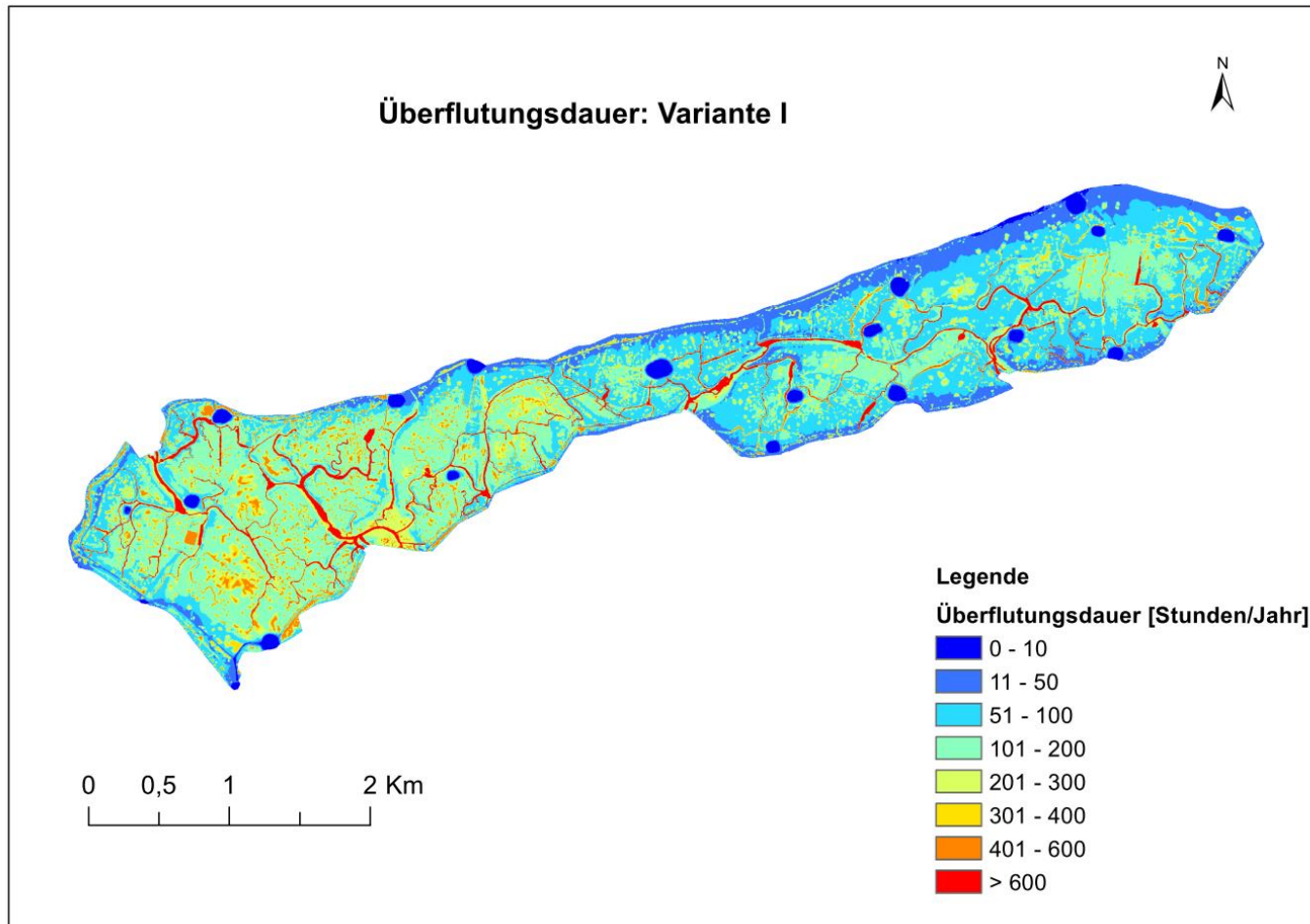
=> Grundlage für die szenarienbasierten Analysen

Simulierte Überflutungsdauer – Ist-Zustand (Deckwerk) Überflutungsdauer am Ende einer repräsentativen Sturmflutsaison



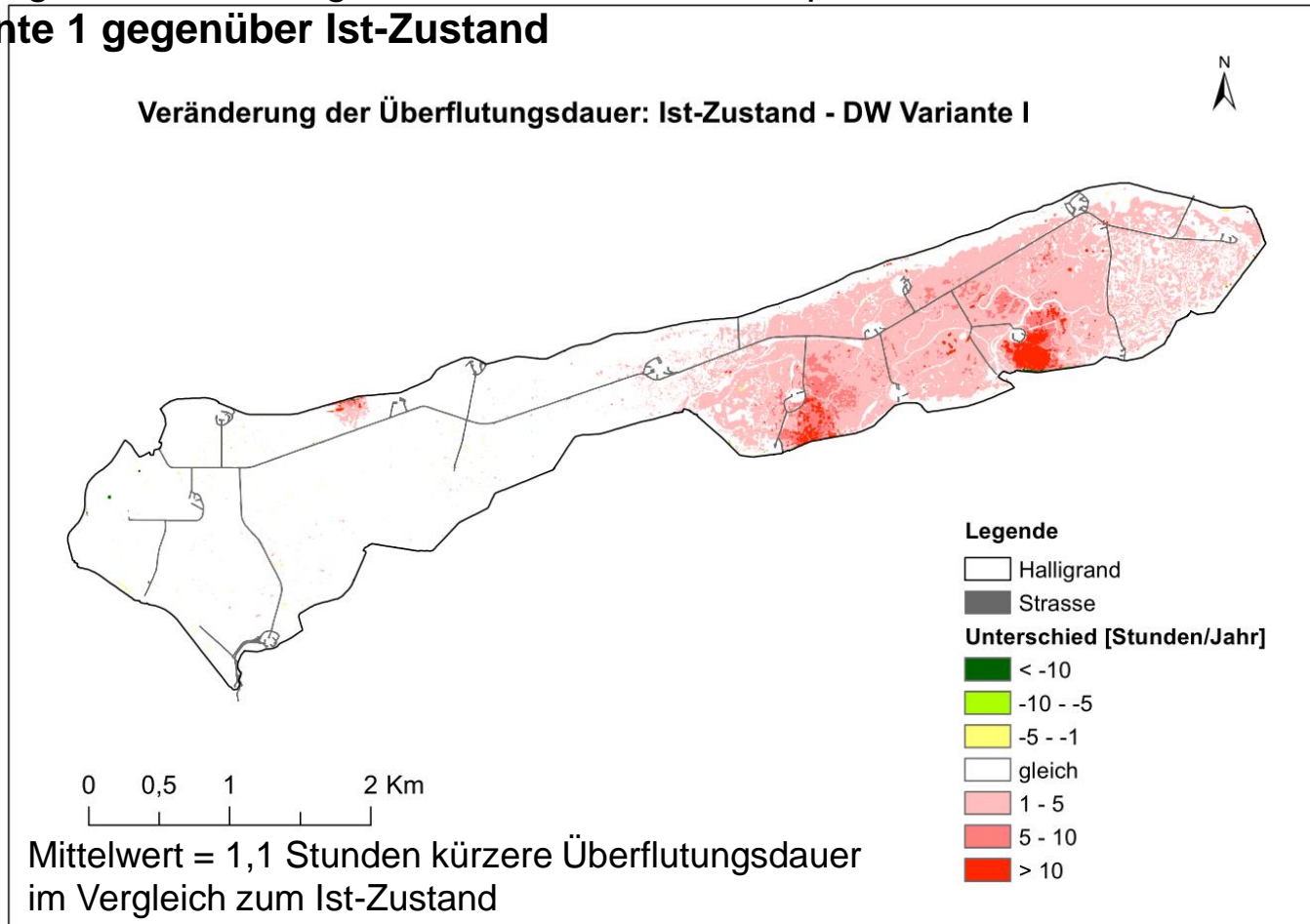
Simulierte Überflutungsdauer – Deckwerk Variante I

Überflutungsdauer am Ende einer repräsentativen Sturmflutsaison



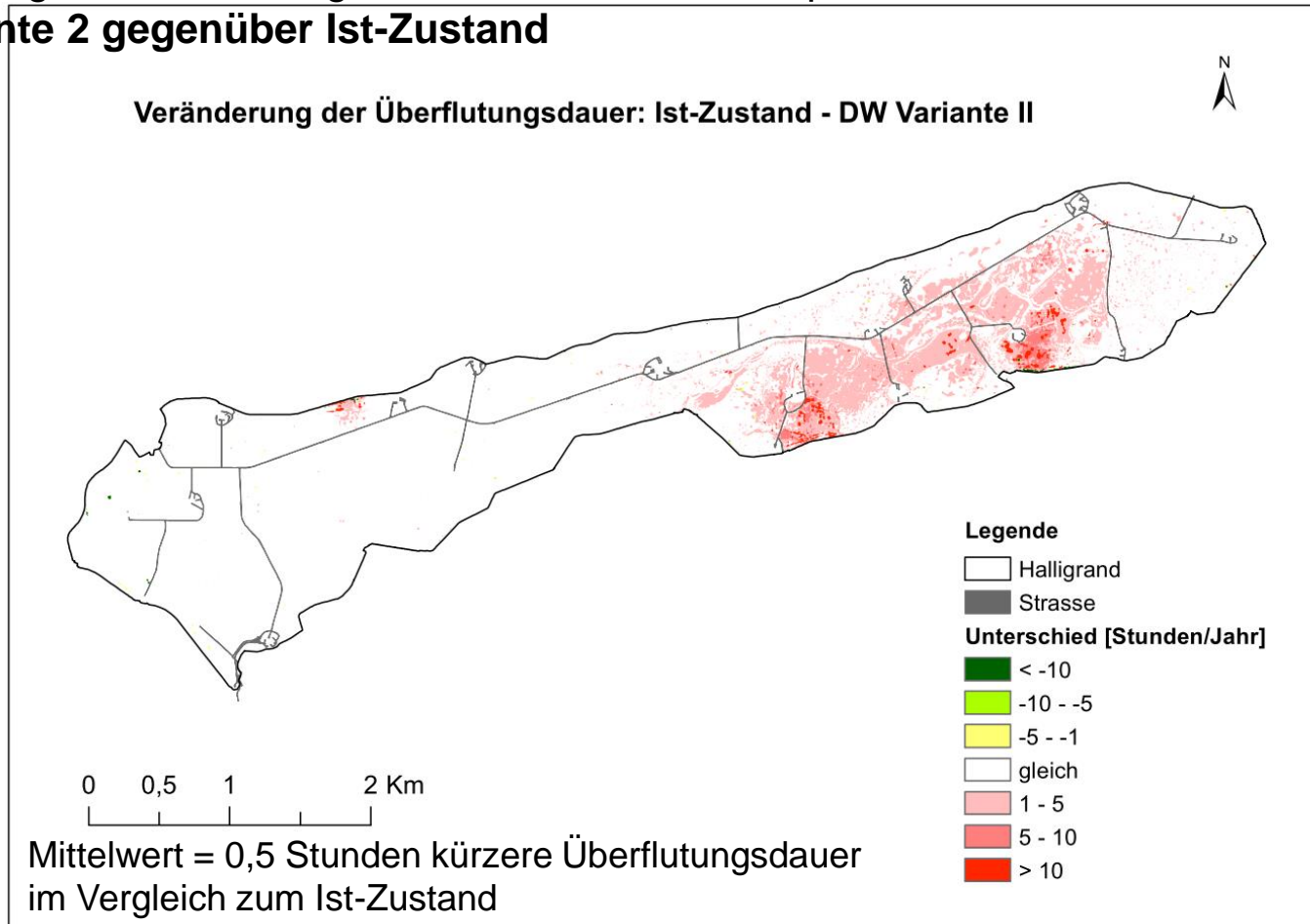
Veränderung der Überflutungsdauer

Veränderung der Überflutungsdauer am Ende einer repräsentativen Sturmflutseason:
DW Variante 1 gegenüber Ist-Zustand

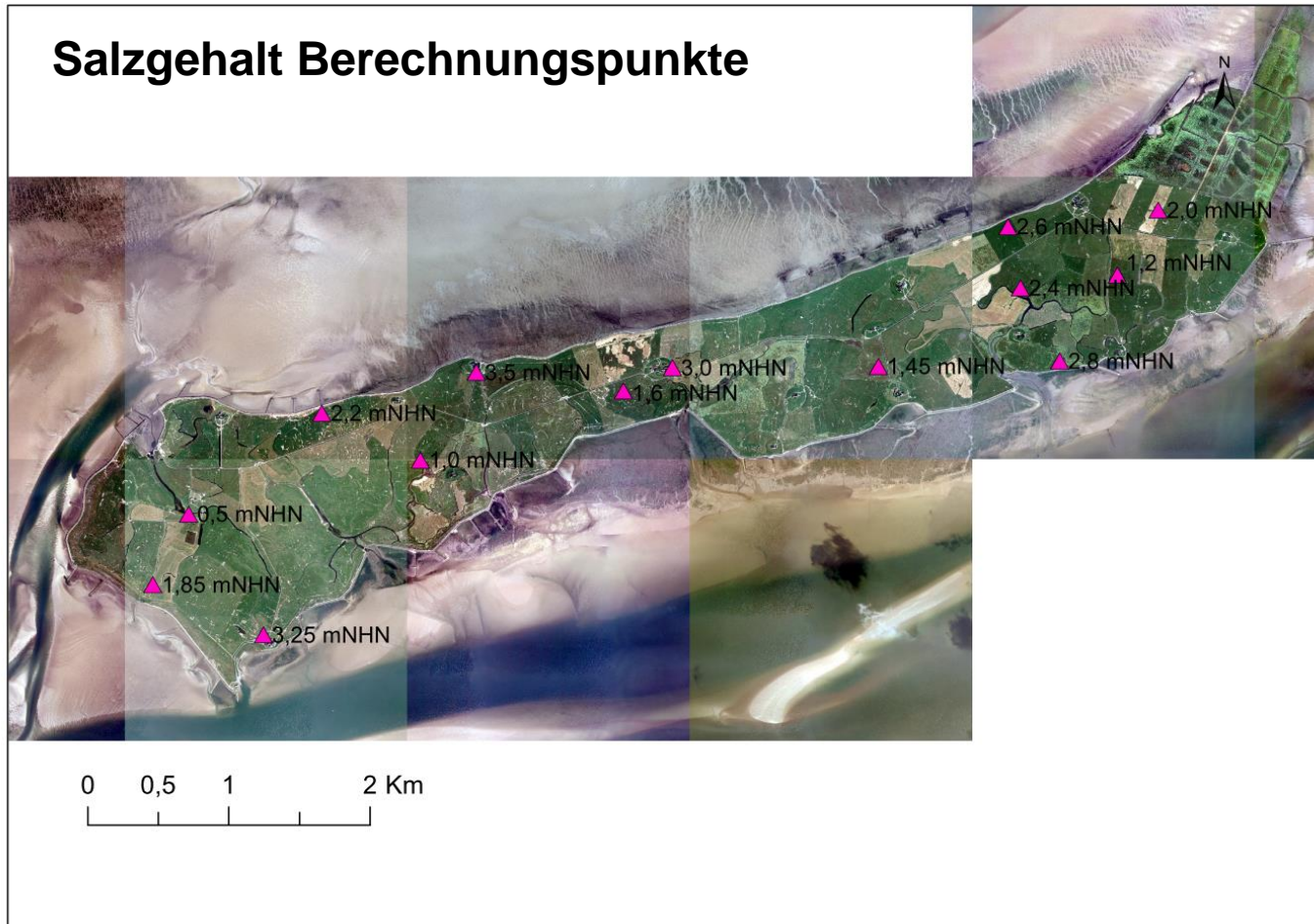


Veränderung der Überflutungsdauer

Veränderung der Überflutungsdauer am Ende einer repräsentativen Sturmflutseason:
DW Variante 2 gegenüber Ist-Zustand

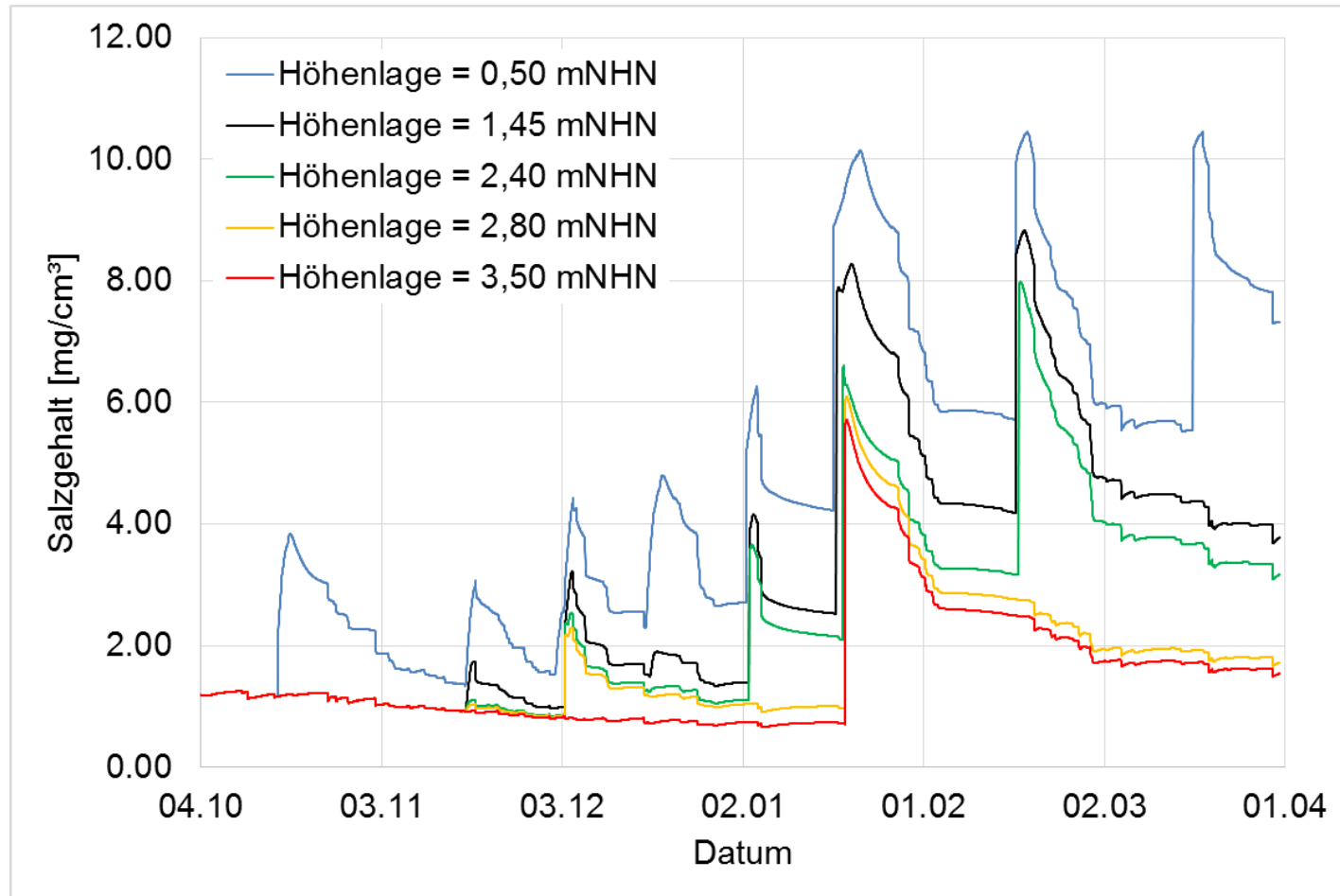


Bestimmung der Bodensalzgehalt- Berechnungspunkte



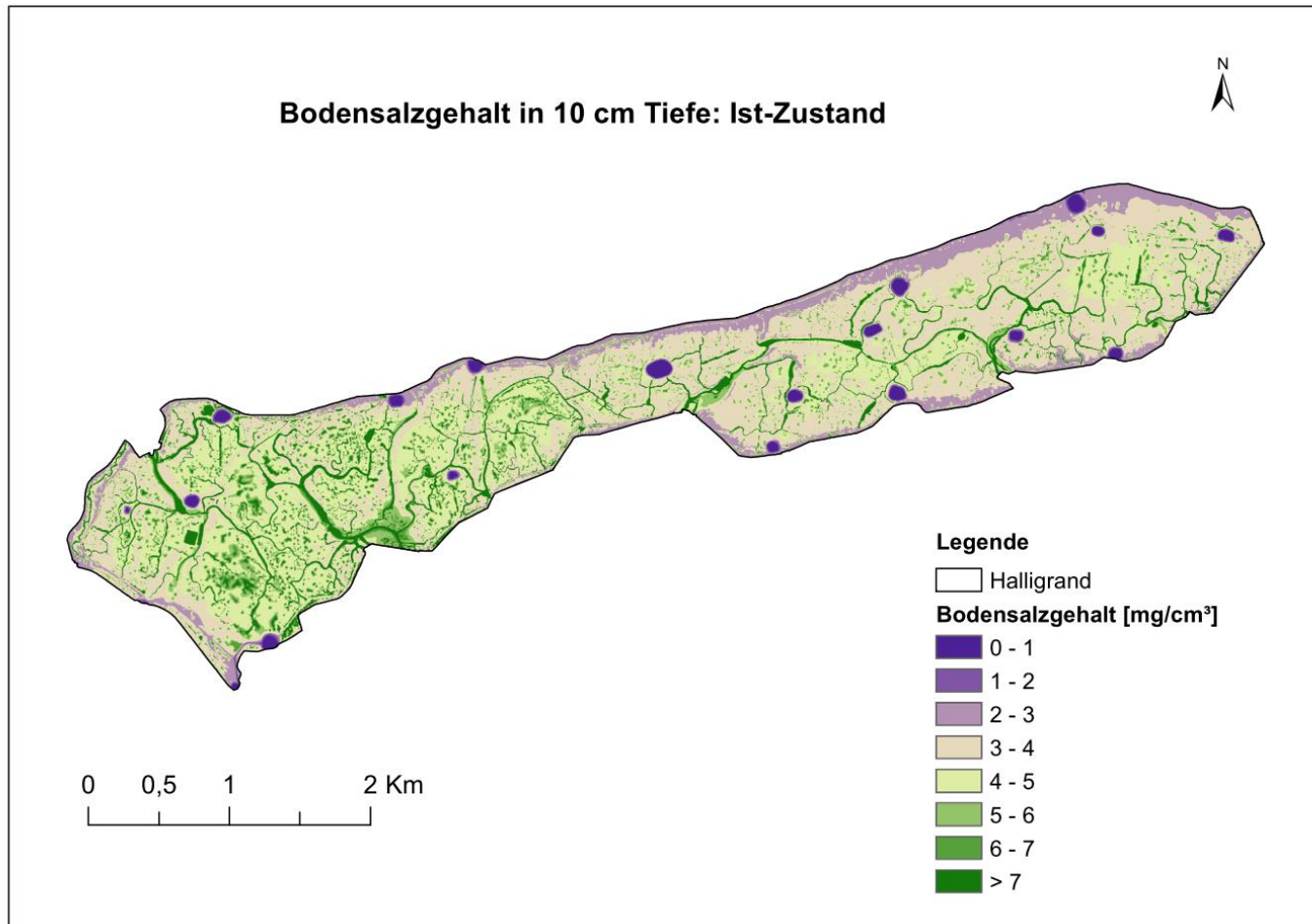
Bodensalzgehalt – Ausgewählte Ergebnisse

Salzgehalt in 10 cm Tiefe für eine repräsentative Sturmflutsaison



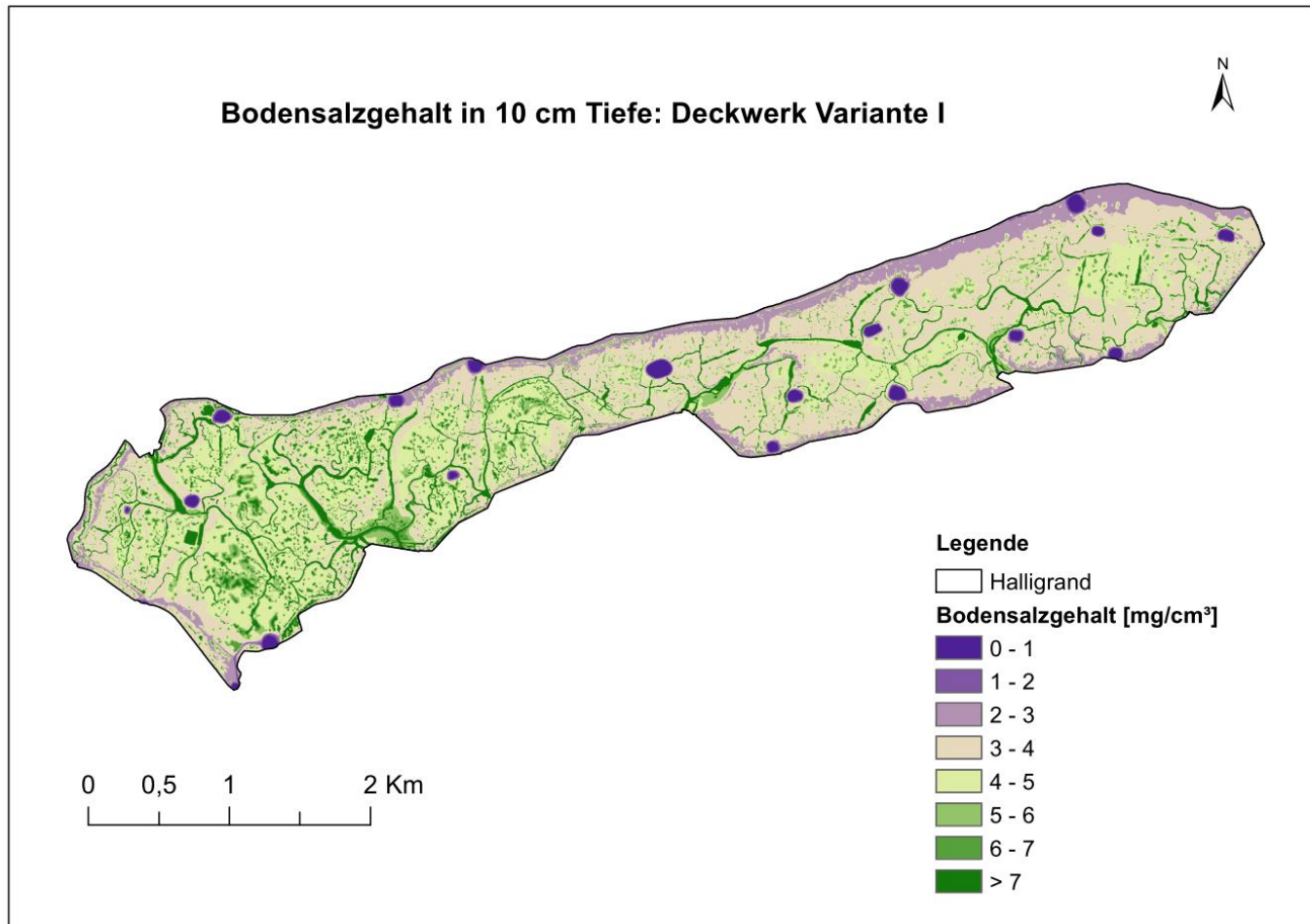
Ist-Zustand

Berechnete Bodensalzgehalt am Anfang der Vegetationsperiode



Variante I

Berechnete Bodensalzgehalt am Anfang der Vegetationsperiode



Zusammenfassung

- Bestimmung der Überflutungsdauern und –höhen mit dem 2D HN-Modell für die repräsentativen Sturmfluten und DW Variante
- Bestimmung des Bodensalzgehalts mit dem Bodensättigungsmodell für die repräsentativen Sturmfluten und DW Variante

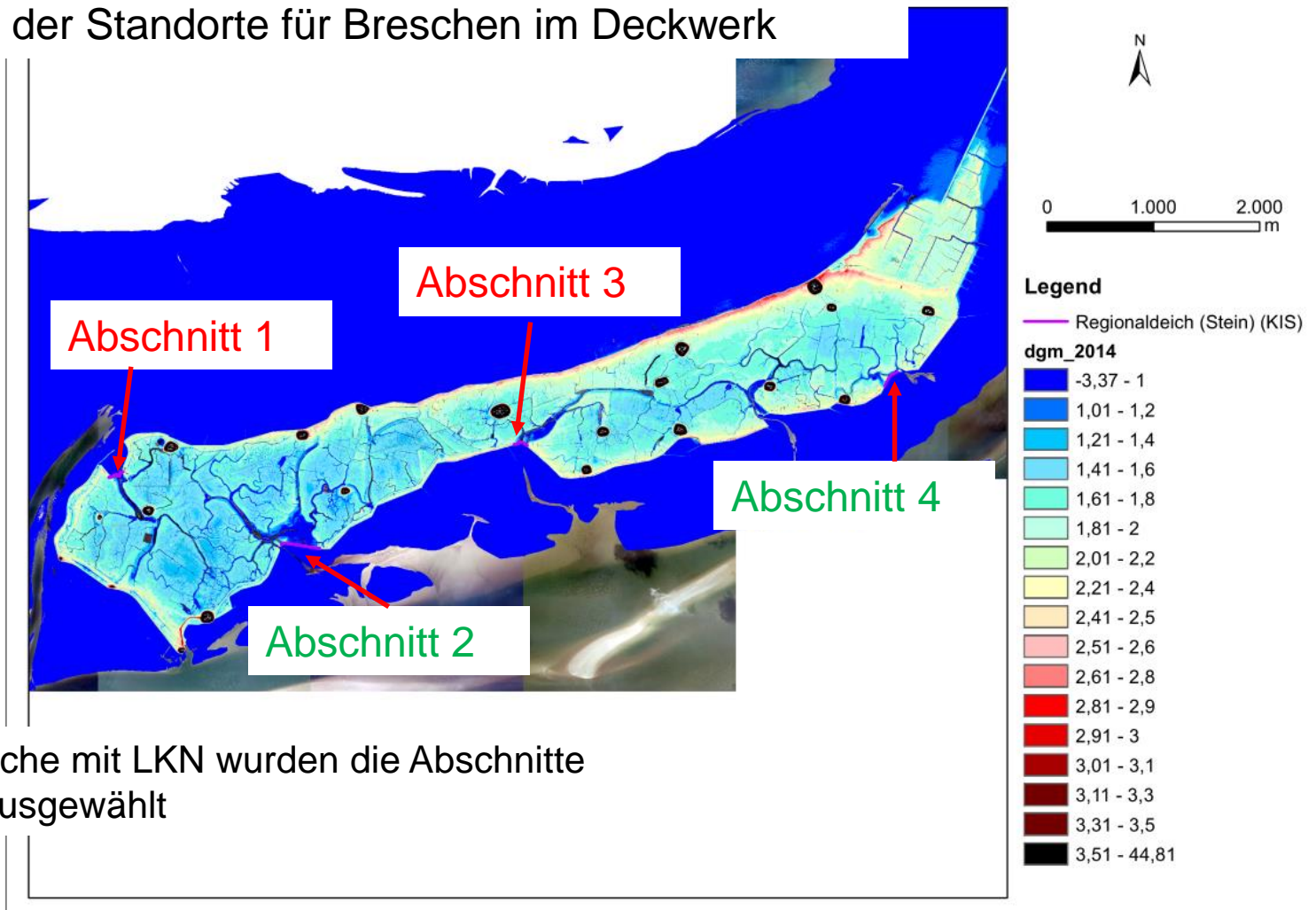
=> Grundlage für die Untersuchungen zur Anpassungsmaßnahmen

Steuerung der Entwässerung

- Auf Grundlage der Ergebnisse der Überflutungsmodellierung wurden in Abstimmung mit dem LKN verschiedene Optionen für die Steuerung der Entwässerung auf der Hallig untersucht mit dem Ziel, das salzhaltige Wasser eines Landunters länger auf der Hallig verweilen zu lassen
- zwei grundsätzliche Ansätze wurden verfolgt:
 - eine Lösung mit festen Breschen (Breschenlösung)
 - und eine Lösung mit einem geänderten Betrieb der Siele (Siellösung)

Breschenlösuna

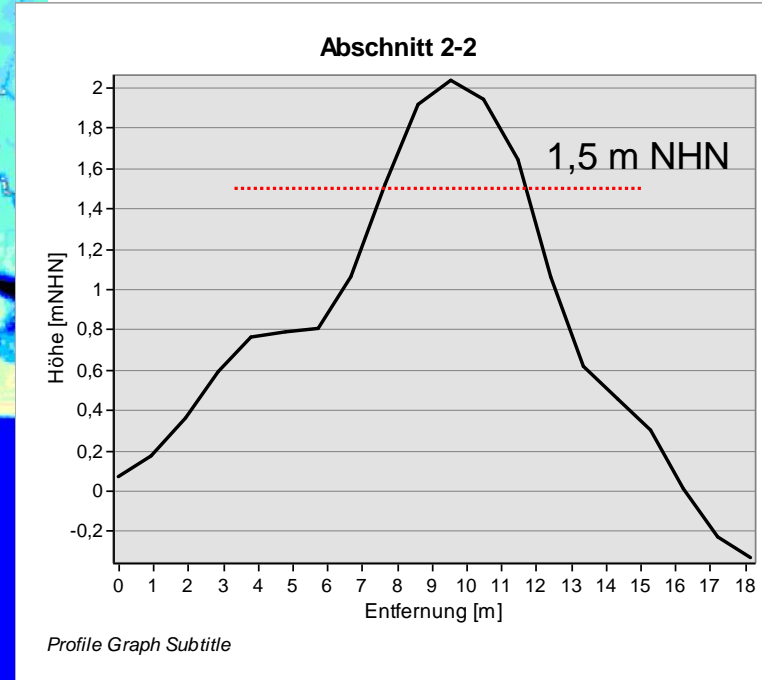
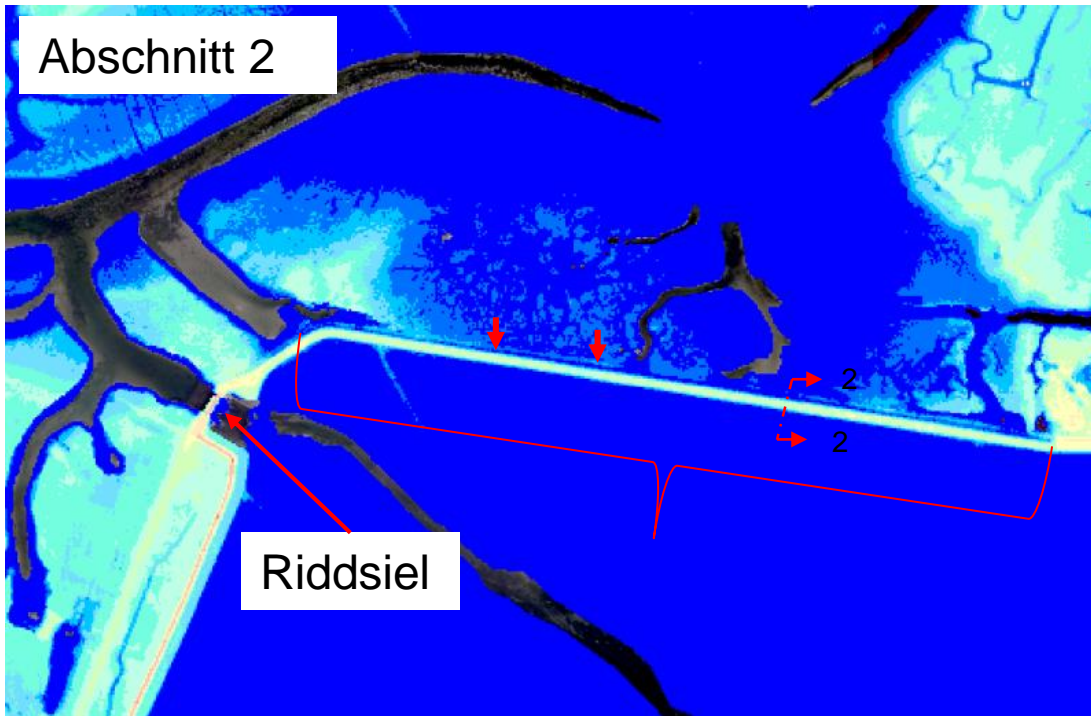
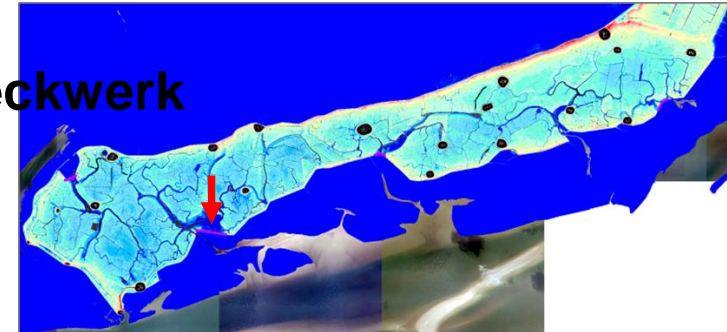
Auswahl der Standorte für Breschen im Deckwerk



In Absprache mit LKN wurden die Abschnitte 2 und 4 ausgewählt

Auswahl der Standorte für Breschen im Deckwerk

2 x 5 m breite Bresche in der Nähe vom Riddsiel

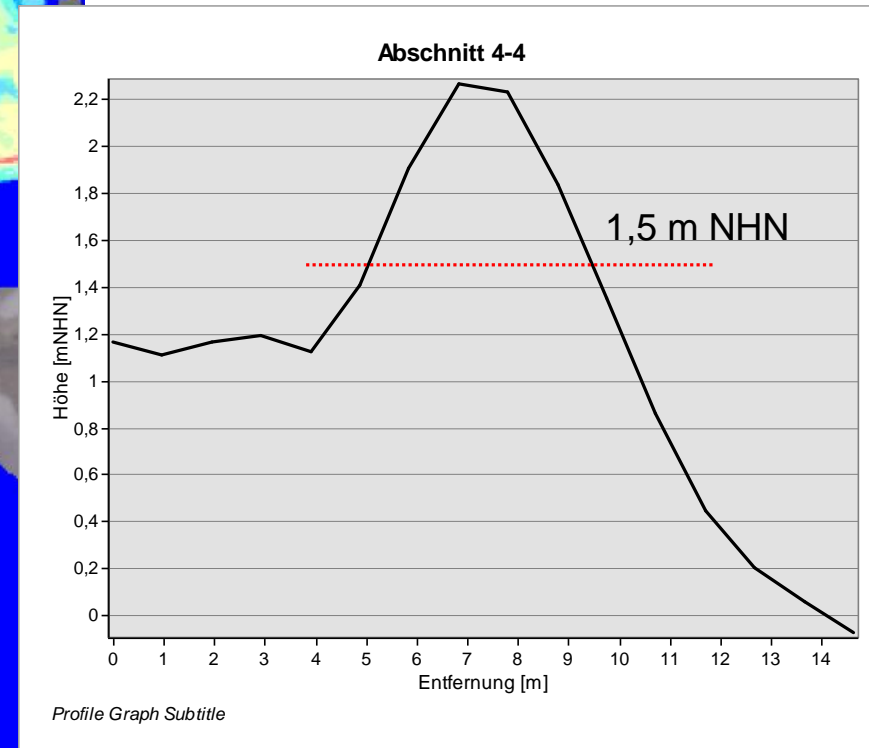
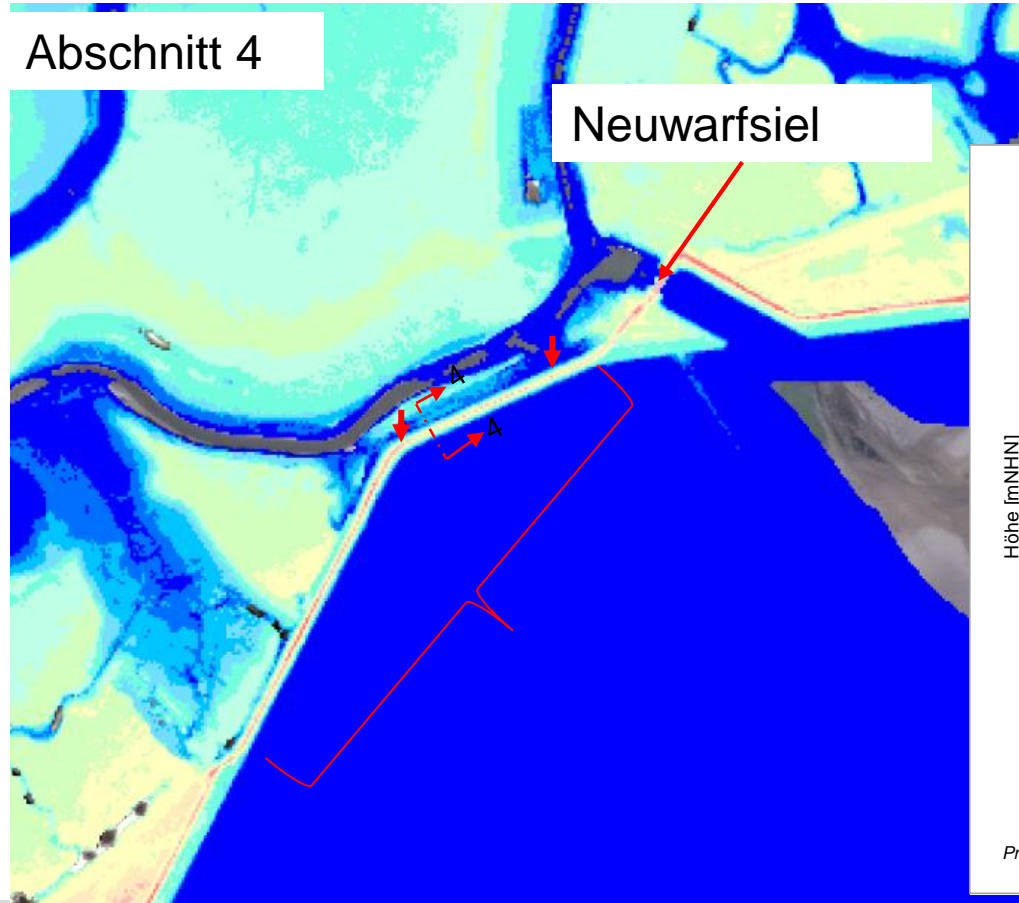


Auswahl der Standorte für Breschen im Deckwerk

2 x 5 m breite Bresche in der Nähe vom Neuwarfsiel

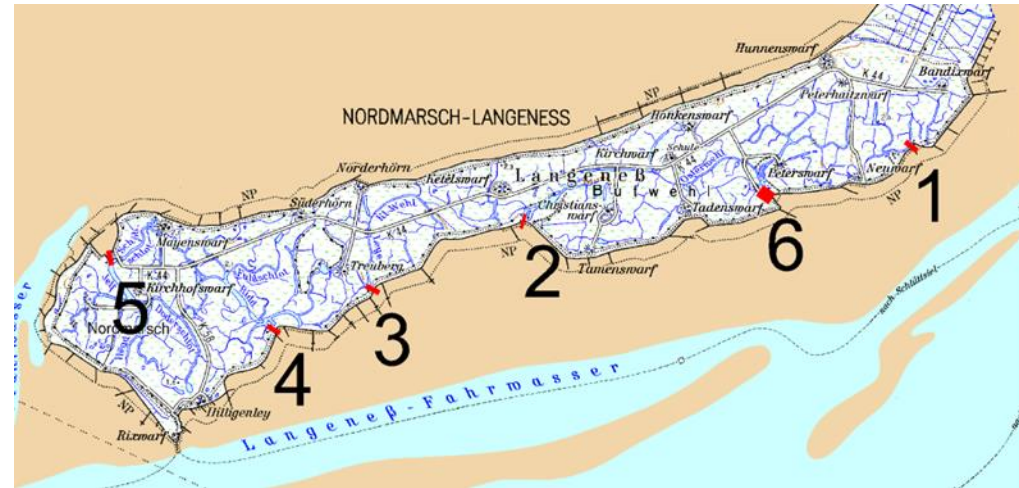
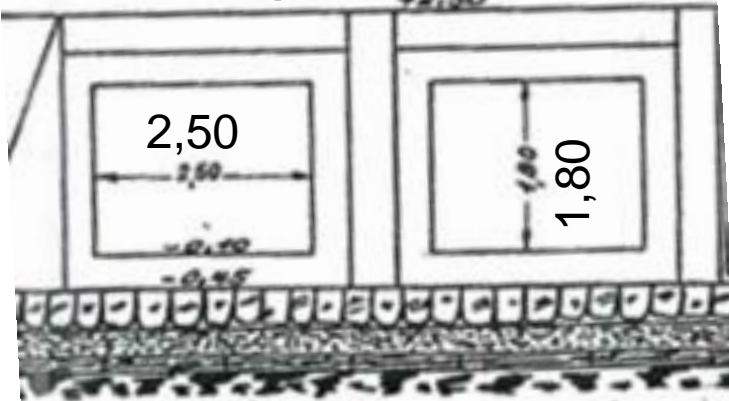


Abschnitt 4



Profile Graph Subtitle

Siellösung: Übersicht Siele



Nr.	Name	Kammern	Kammerhöhe [m]	Kammerbreite [m]	Sohlhöhe [mNHN]
1	Neuwarfsiel	2	1,8	2,5	-0,16
2	Westerwehlsiel	3	1,8	2,5	-0,10
3	Treubergsiel	1	1	3	+0,50
4	Riddsiel	3	1,8	2,5	-0,07
5	Ilef-Siel	3	1,8	2,5	-0,02
6	Osterwehlsiel	3	1,8	2,5	-0,16

Siellösung: Untersuchte Steuerungen

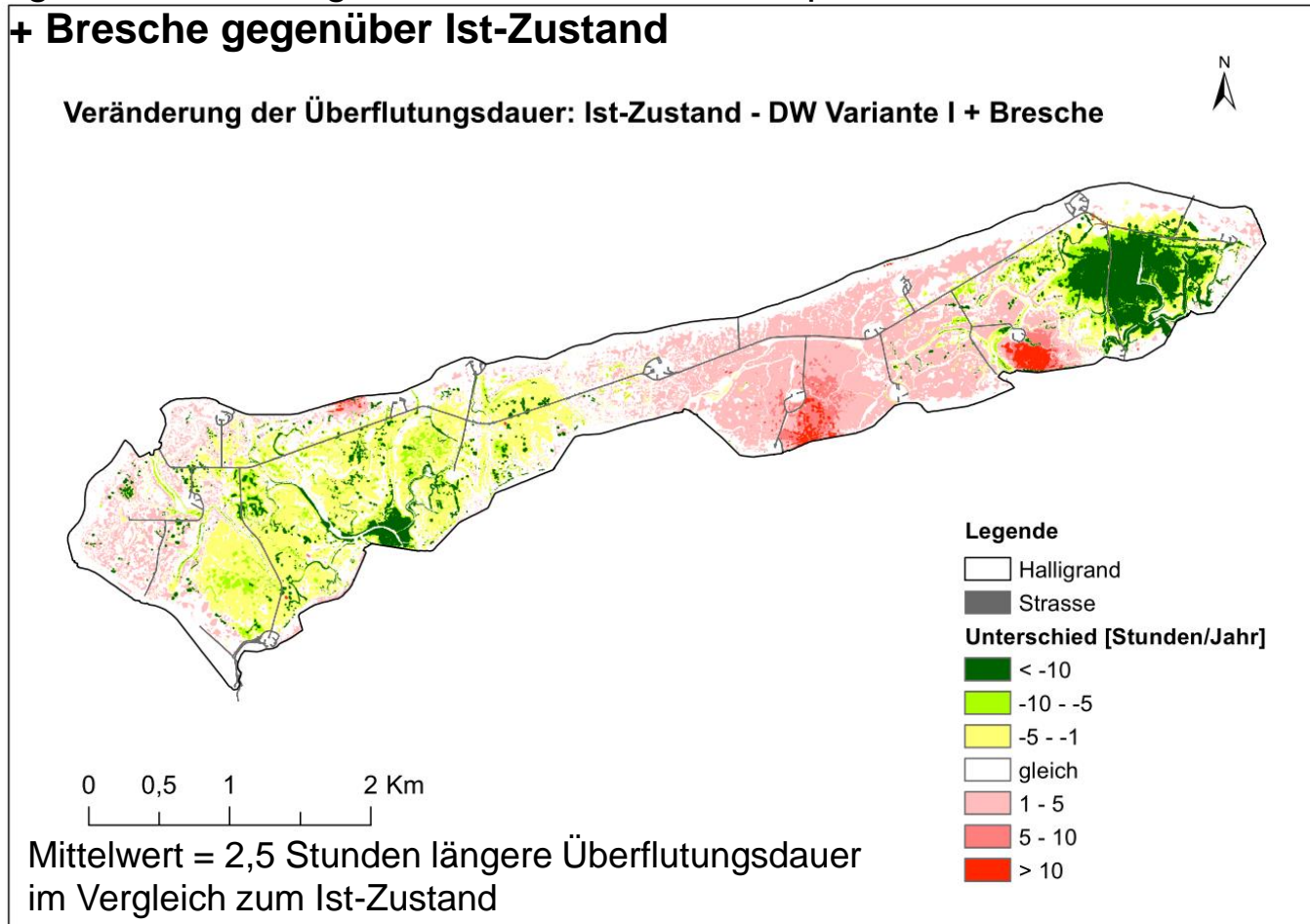
Nr.	Steuerung	Verfügbare Leistung (bezogen auf alle Siele)
1	Variante I + alle Siele geschlossen	0 %
2	Variante I + alle Siele 50% geschlossen	50%
3	Variante I + Siele mit 3 Kammern 1 geschlossen	73 %
4	Variante I + 3 Siele 50% geschlossen (Westerwehl-, Osterwehl- und Neuwarfsiel)	73 %
5	Variante II + 3 Siele 50% geschlossen (Westerwehl-, Osterwehl- und Neuwarfsiel)	73 %
6	Variante II + 3 Siele eine Kammer geschlossen (Westerwehl-, Osterwehl- und Neuwarfsiel)	80 %
7	Variante I + Schließung je einer Sielkammer der Mehrkammersiele (2 Kammern oder 3 Kammern)	67%

In Abstimmung mit dem LKN die grün markierte Steuerungen sind im Detail analysiert

Veränderung der Überflutungsdauer: Bresche

Veränderung der Überflutungsdauer am Ende einer repräsentativen Sturmflutseason:

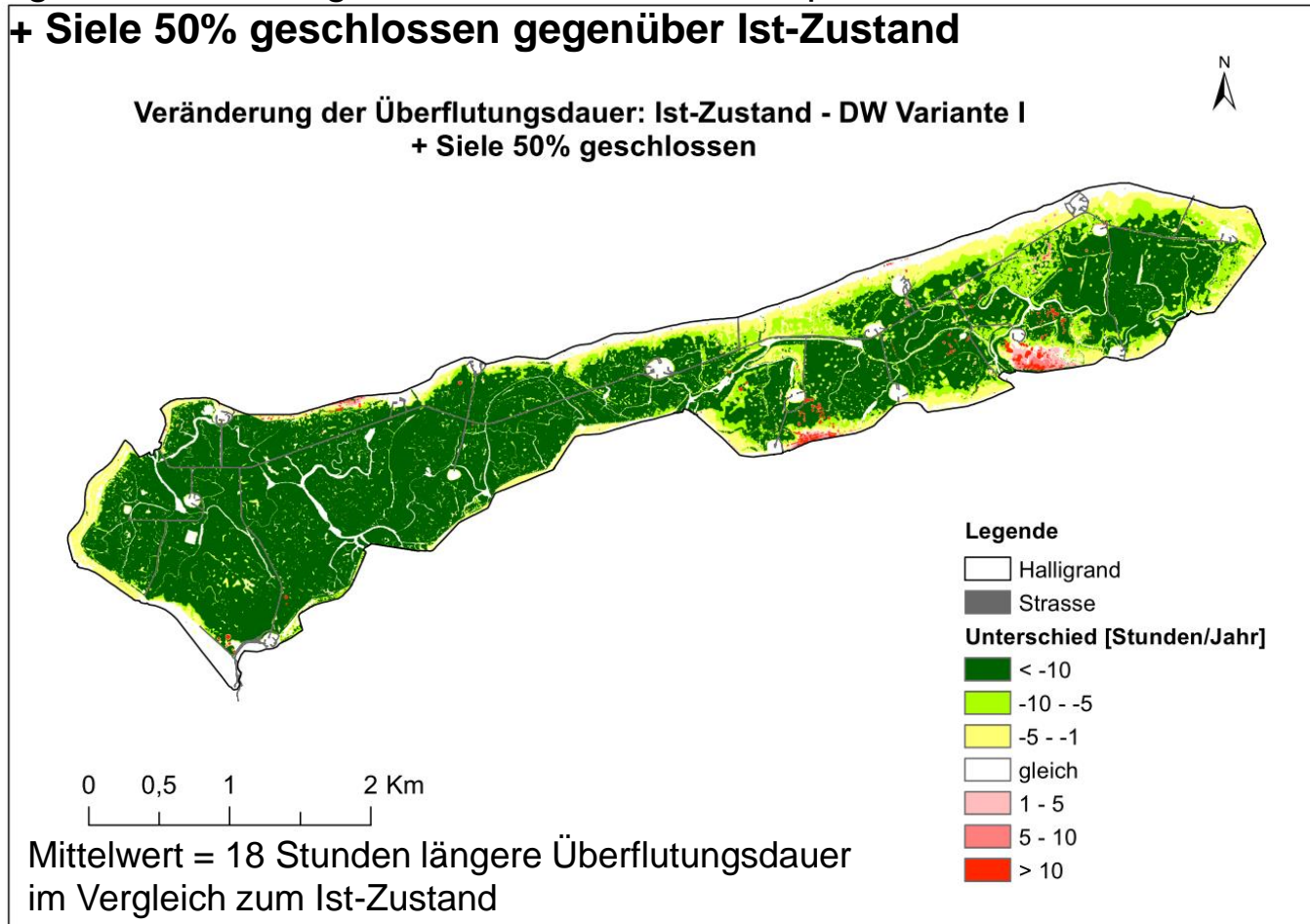
Variante I + Bresche gegenüber Ist-Zustand



Veränderung der Überflutungsdauer: Veränderte Steuerung der Siele

Veränderung der Überflutungsdauer am Ende einer repräsentativen Sturmflutseason:

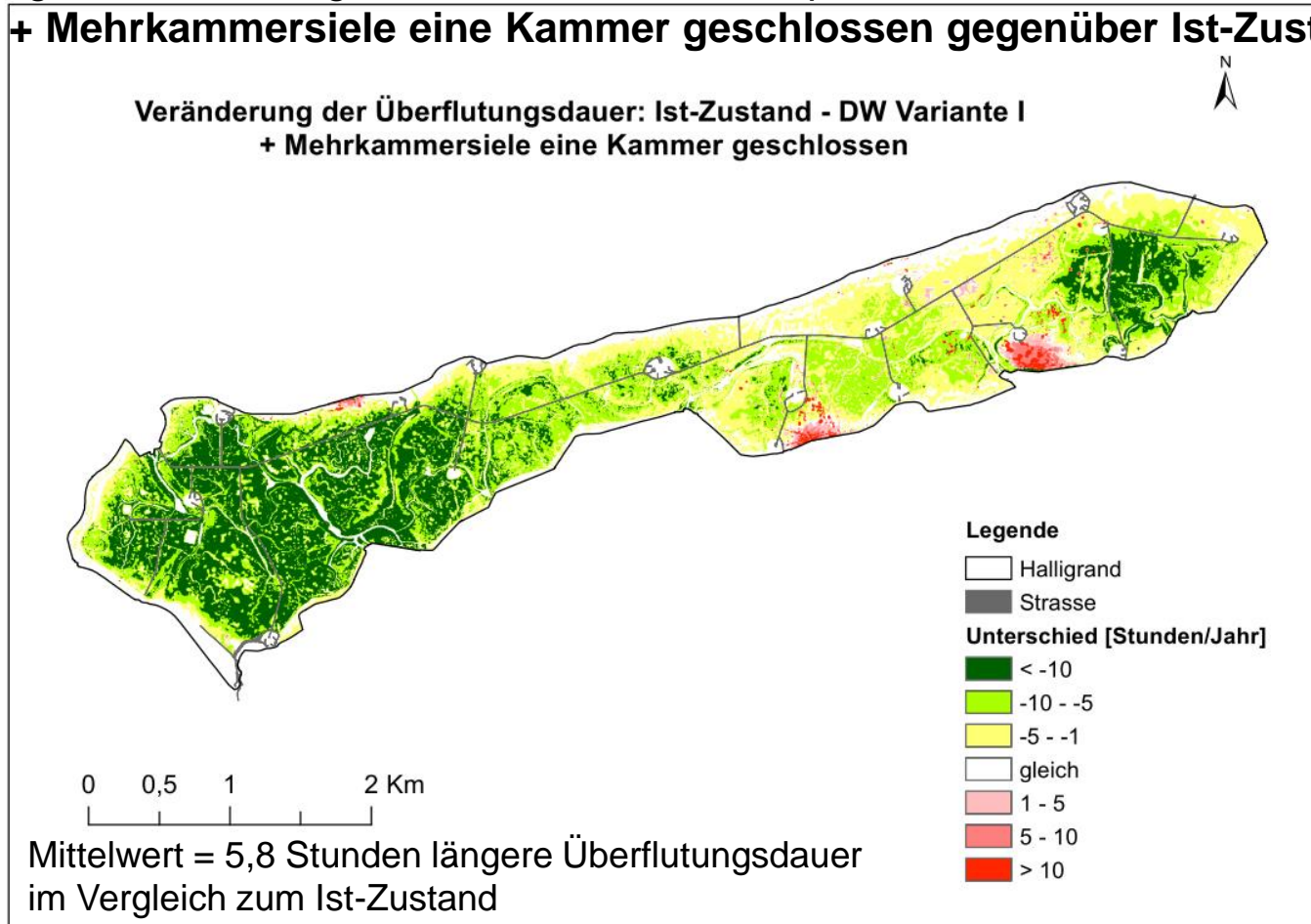
Variante I + Siele 50% geschlossen gegenüber Ist-Zustand



Veränderung der Überflutungsdauer

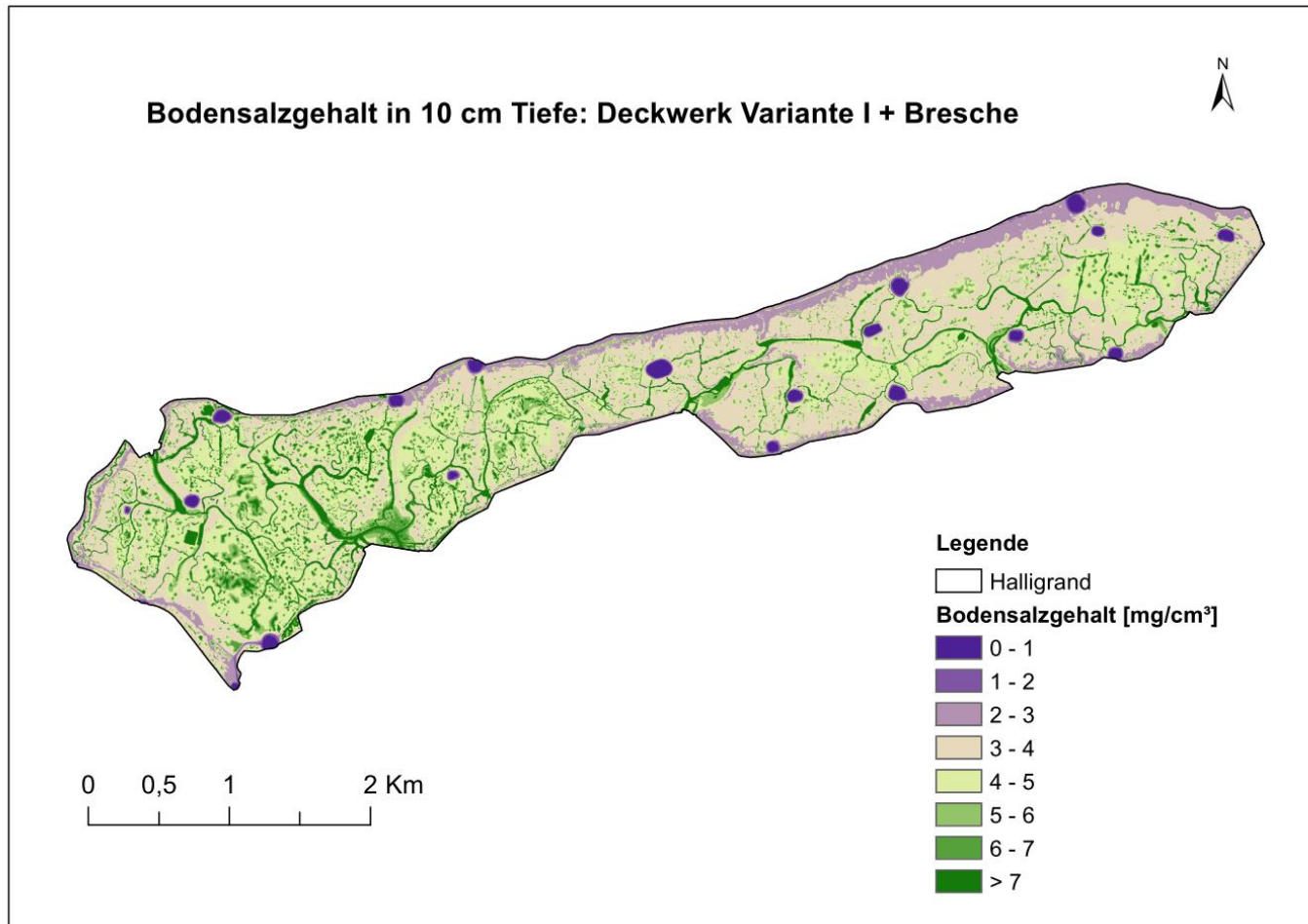
Veränderung der Überflutungsdauer am Ende einer repräsentativen Sturmflutsaison:

Variante I + Mehrkammersiele eine Kammer geschlossen gegenüber Ist-Zustand

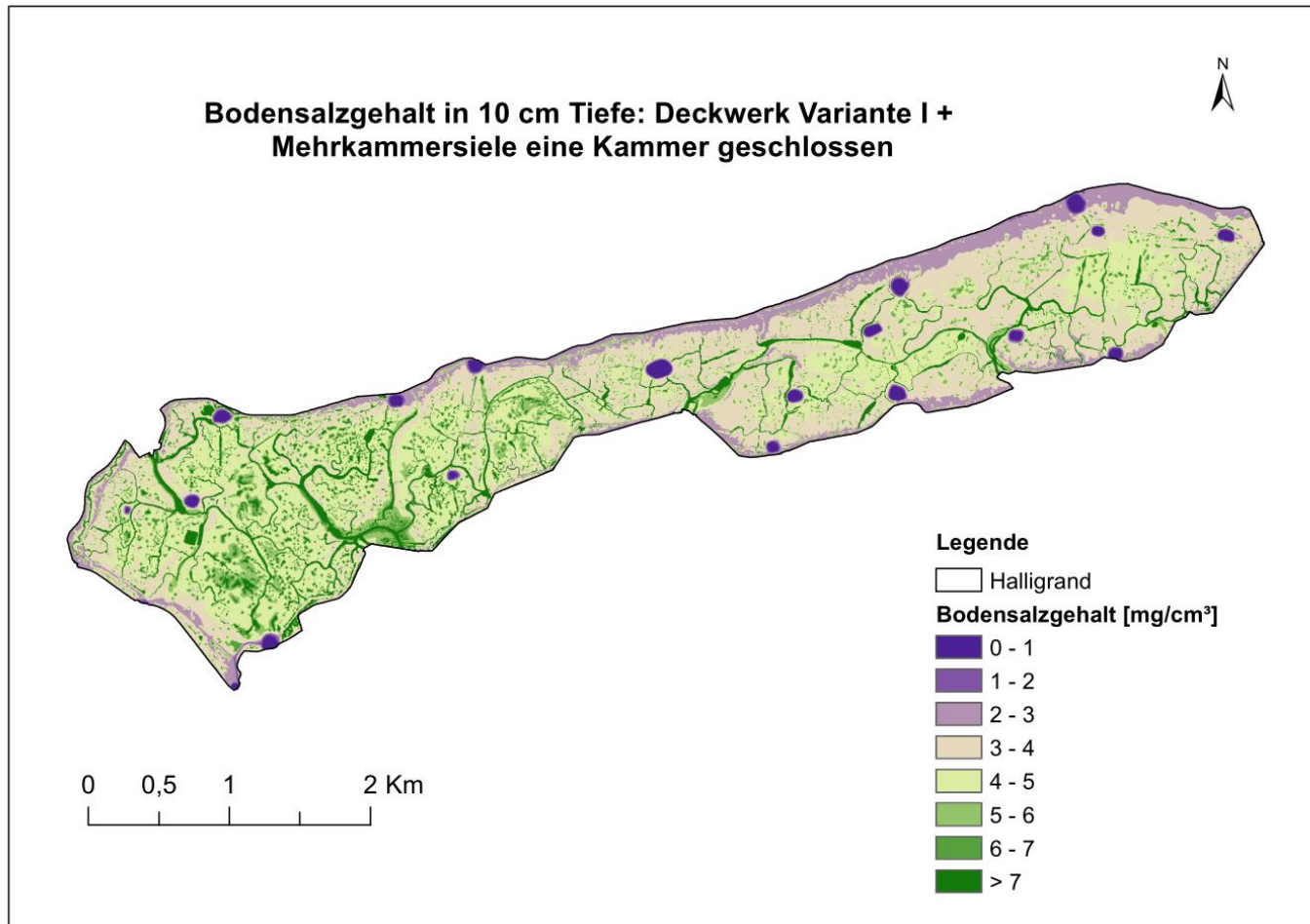


Bodensalzgehalt – Variante I + Bresche

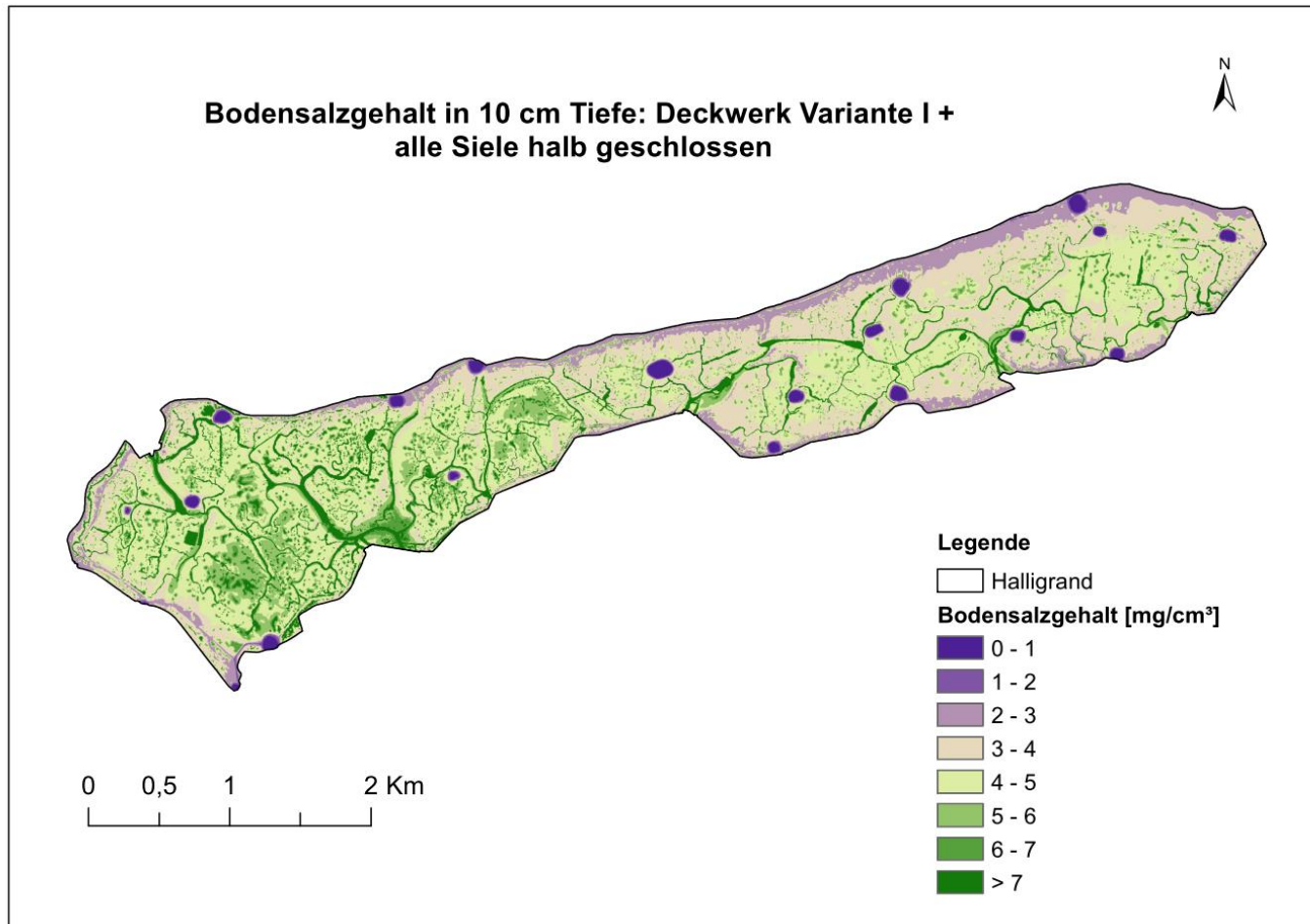
Berechnete Bodensalzgehalt am Anfang der Vegetationsperiode



Bodensalzgehalt – Variante I + Mehrkammersiele eine Kammer geschlossen Berechnete Bodensalzgehalt am Anfang der Vegetationsperiode



Bodensalzgehalt – Variante I + all Siele halb geschlossen Berechnete Bodensalzgehalt am Anfang der Vegetationsperiode



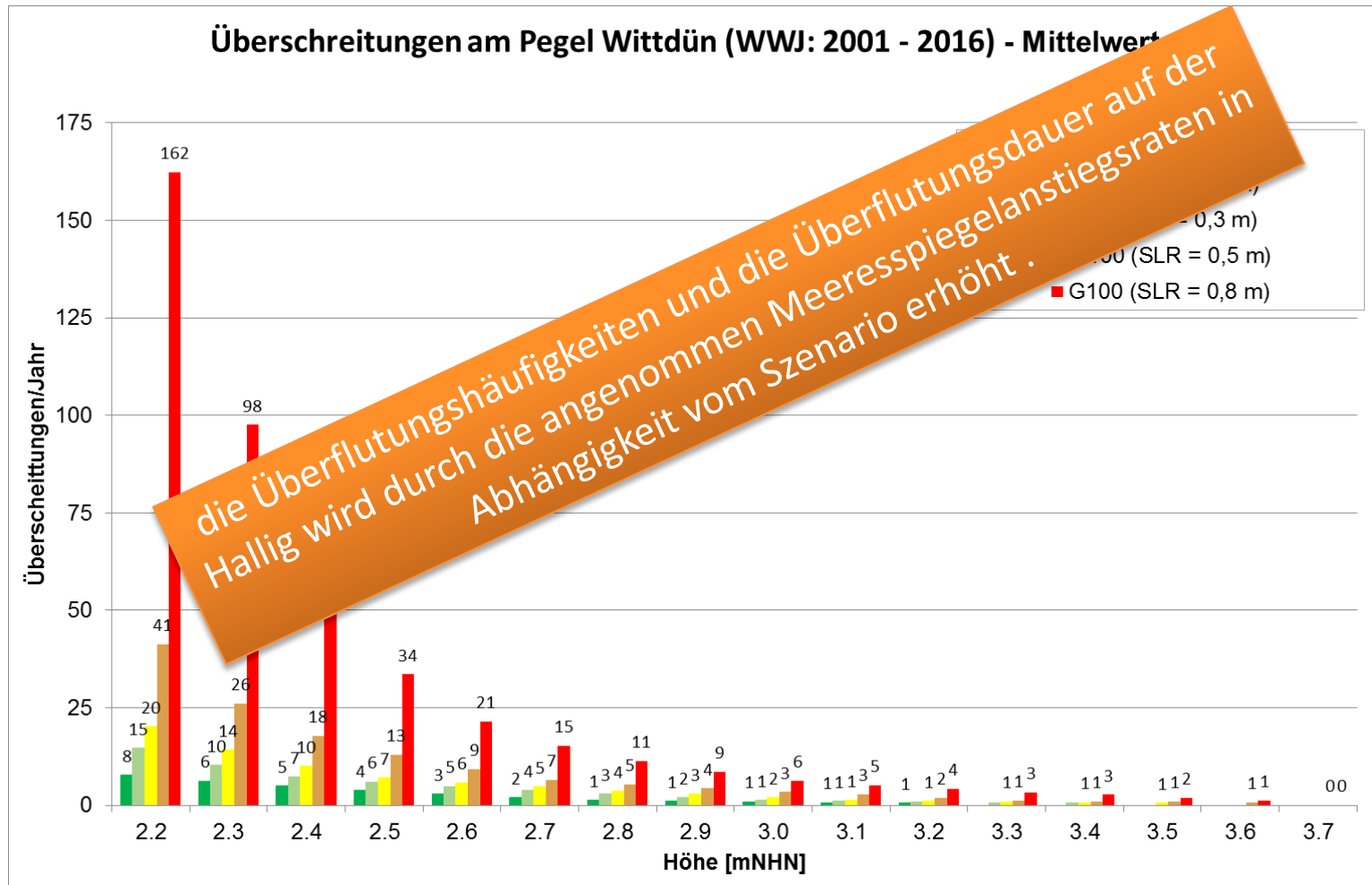
Zusammenfassung

- Maßnahmen
 - Einbau von Breschen
 - eine veränderte Entwässerung der Siele
- Die Anpassungsmaßnahmen führen
 - insgesamt zu einer Verlängerung der Überflutungsdauer bzw. Erhöhung des Bodensalzgehalts
 - an einigen Orten zu einer deutlichen Verlängerung der Überflutungsdauer bzw. Erhöhung des Bodensalzgehalts
 - Kompensieren die verkürzte Überflutungsdauer in unmittelbarer Nähe der verstärkten Abschnitte nicht bzw. lediglich teilweise

Projektionen Meeresspiegelanstieg (SLR) Szenarien

- SLR Szenarien (lt. Strategie für das Wattenmeer 2100)
 - M50 = 4 mm/a → 0,2 m
 - G50 = 6 mm/a → 0,3 m
 - M100 = 6 mm/a → 0,5 m
 - G100 = 10 mm/a → 0,8 m
- Betrachtung als Fixpunkte
 - 2050
 - SLR= 0,2 m
 - SLR= 0,3 m
 - 2100
 - SLR = 0,5 m
 - SLR = 0,8 m

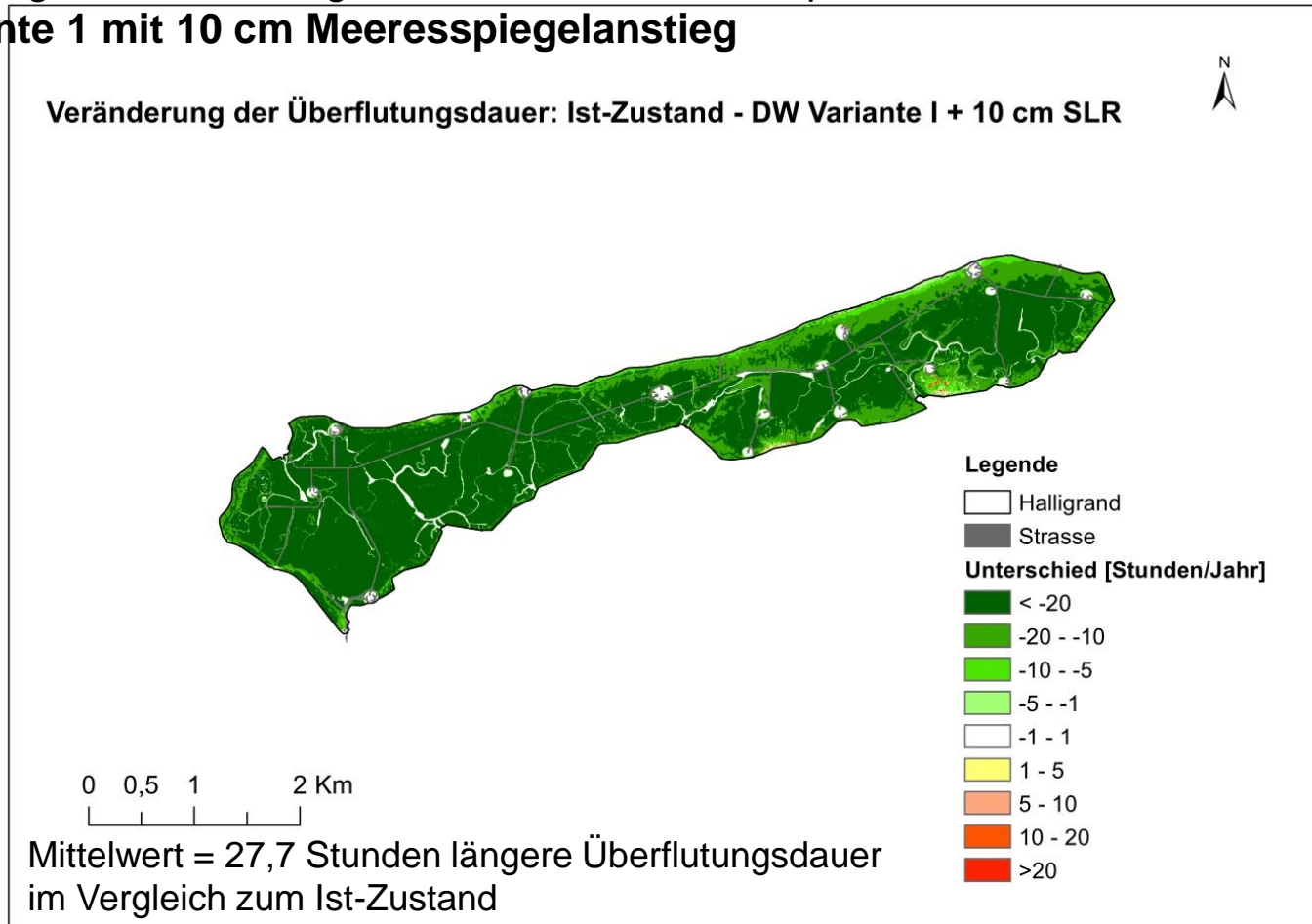
Überschreitungen am Pegel Wittdün



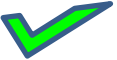



Meeresspiegelanstieg

Veränderung der Überflutungsdauer am Ende einer repräsentativen Sturmflutsaison:

DW Variante 1 mit 10 cm Meeresspiegelanstieg



Zusammenfassung Projektergebnisse

- 
 - Untersuchung des Einflusses einer Erhöhung oder sonstigen baulichen Änderung der Halligkanten-Befestigung / Höhe der Deckwerke auf
 - die Anzahl der Überflutungen
 - die Dauer der Überflutungen
- 
 - Modellierung des **Überflutungsvorgangs** der Hallig (Langeneß) für
 - den Ist-Zustand und
 - für geänderte Randbedingungen (Klimawandel)
- 
 - Untersuchung der Veränderung der **Überflutungsdauer** durch
 - eine veränderte Steuerung der Entwässerungsbauwerke der Hallig nach Landunter
 - Anlage von Geländeschwellen (=veränderte Topographie) zur Verzögerung des Abflusses
 - einen veränderten Meeresspiegel
- 
 - Aufbau eines hydrologischen Prinzipmodells zur Modellierung des Wasserhaushalts in der ungesättigten Bodenzone als Grundlage für die landschaftsökologische Bewertung im Hinblick auf die Aussüßung