

Thomas Nuber
Wolf Pfeiffer
Frank Paetz

Berücksichtigung des Meeresspiegelanstiegs bei der Planung des Ersatzneubaus Kleine Schleuse Kiel

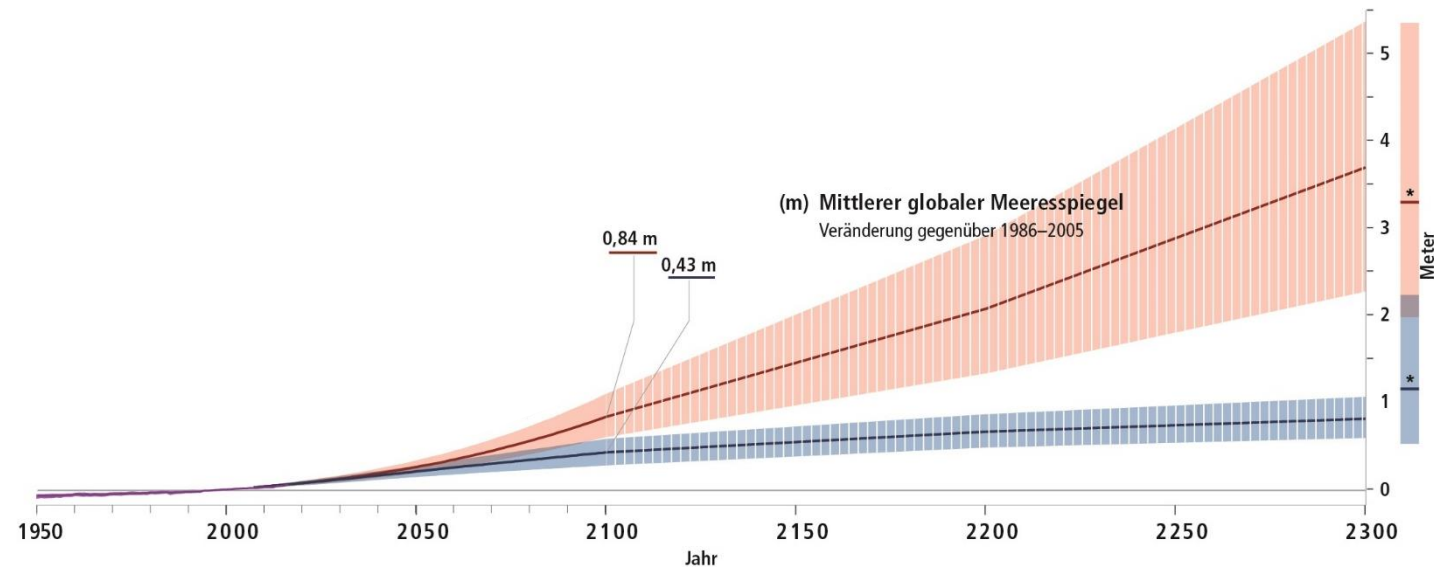
Geotechnik im Zeichen des Klimawandels

Hamburg, 1. September 2022



Meeresspiegelanstieg - Überblick

- Klimawandelbedingte Treiber des Meeresspiegelanstiegs (MSA)
 - Wärmeausdehnung der Meere
 - Masseverlust Gletscher, Grönländischer Eisschild, Antarktischer Eisschild
- IPCC-Projektionen
 - RCP-Szenarien (Representative Concentration Pathways)
 - Berücksichtigung eines unterschiedlichen Strahlungsantriebs (W/m^2) durch erhöhte Treibhausgaskonzentration
 - RCP 2.6 „Klimaschutzszenario“
 - RCP 4.5
 - RCP 6.0
 - RCP 8.5 „Weiter-so-wie-bisher“,
 - Regelmäßige Sachstandsberichte
 - 5. Sachstandsbericht: 2014/2015
 - 6. Sachstandsbericht: 2018
- Regionale Betrachtungen z.B. Grindstedt, 2018
 - Für den Bereich der westlichen Ostsee ist bis 2100 ein MSA bis 1,74 m möglich (95-Perzentil für RCP 8.5)



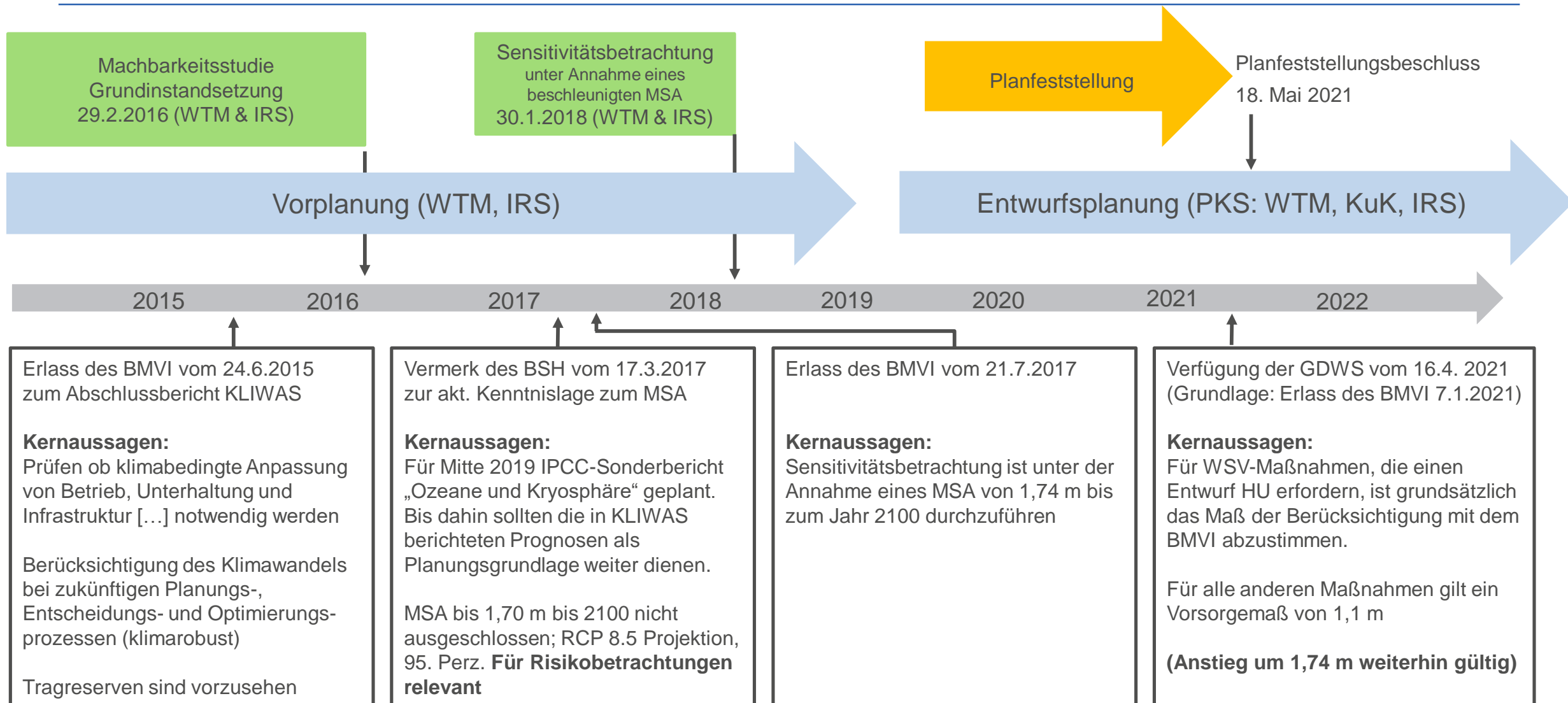
Kleine Schleuse Kiel und NOK (Überblick)

- NOK
 - Verbindet Nord- und Ostsee (Brunsbüttel ↔ Kiel)
 - Meistbefahrene künstliche Wasserstraße der Welt
 - Größter Vorfluter Schleswig-Holsteins, Einzugsgebiet 1.500 km²
 - Inbetriebnahme 1895, Bau der Großen Schleusen 1914
- Kleine Schleuse Kiel
 - Doppelschleuse mit Stemmtorpaaren
 - Nutzlänge 125 m, Breite 22 m,
 - Geplante Grundinstandsetzung
 - BAW-Gutachten (Abt. B) zum Bauwerkszustand 2014
 - ⇒ Schwerwiegende Rissbildung im Mauerwerk
 - ⇒ Außerbetriebnahme
 - ⇒ Machbarkeitsstudie
 - ⇒ Notwendigkeit Ersatzneubau
 - ⇒ Planung eines Ersatzneubaus



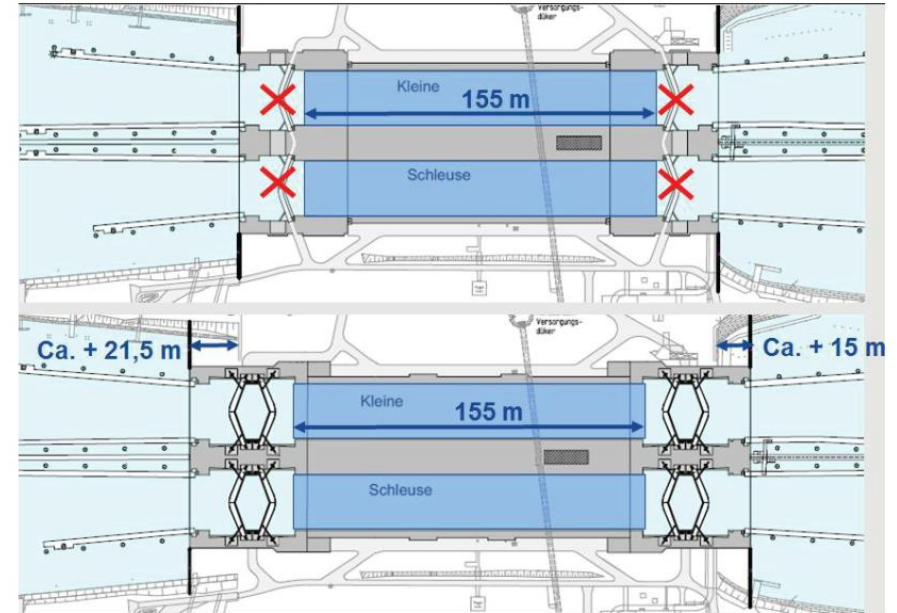
Quelle: WSA Kiel-Holtenau

Planungshistorie Ersatzneubau Schleuse Kiel und Entwicklungen hinsichtlich MSA

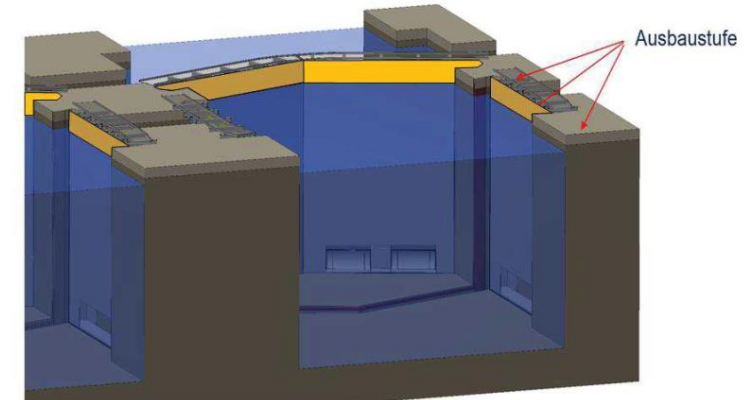


Planungen Ersatzneubau

- Ersatz der bisherigen Schleuse an gleicher Stelle
- Kapazitätserweiterung (Nutzlänge +30 m, Nutzbreite und Nutztiefe +1m) ursprünglich durch inverse Stemmtore
- Lebensdauer 100 a (2030 bis 2130)
- Berücksichtigung des MSA
 - 2 Ausbaustufen
 - 1. Ausbaustufe: Planie auf NHN +4,60 m
 - 2. Ausbaustufe: Planie auf NHN +5,85 m
 - Auslegung Gründung und aufgehende Wände für Bemessungshöhe
 - Torkonstruktion als doppelkehrende Stemmtore => Verlängerung der Schleuse um ca. 36,5 m
 - Im Außen- und Binnenhaupt Anordnung von Notverschlüssen



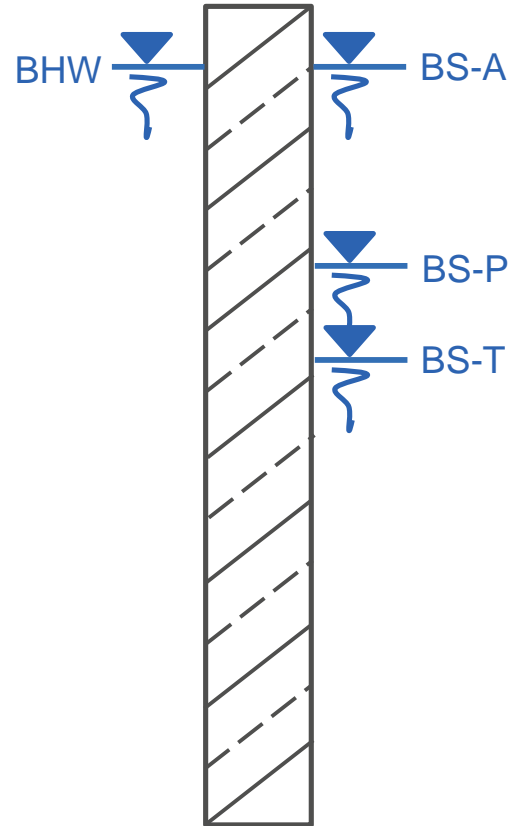
Quelle: WTM Engineers



Bemessungswasserstand und charakteristischer Wasser- und Grundwasserstand

Bemessungswasserstand

- ⇒ Wasserstand, der für die **Höhe** eines Bauwerks (z.B. HW-Schutz) bzw. die **hydraulische Bemessung** des Bauwerks (z.B. Wehr) maßgebend ist
- ⇒ entspricht zumeist einem Wasserstand mit einer Jährlichkeit >> Lebensdauer des Bauwerks (z.B. Jährlichkeit $T = 1.000 \text{ a}$)



Charakteristischer Wasser- und GwStand (EC, EC7, DIN 19702)

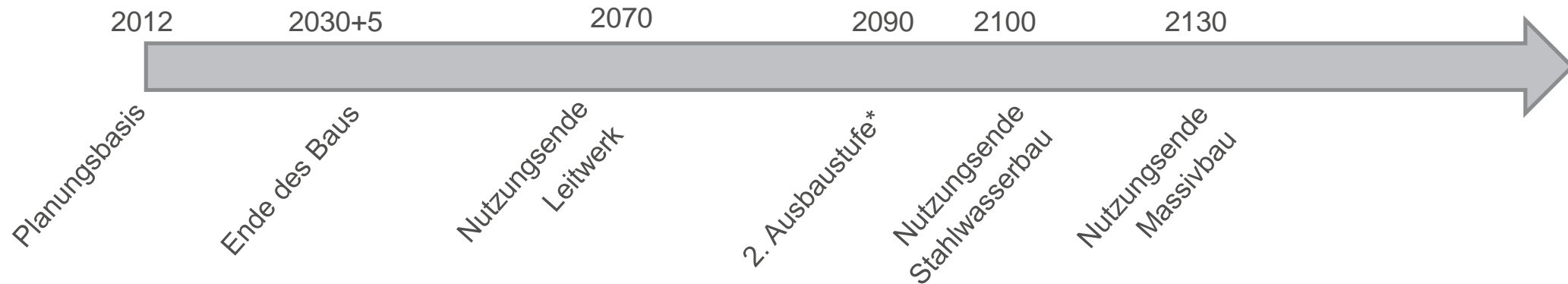
- ⇒ Wasserstände, aus denen sich die resultierende Wasserdrücke als veränderliche Einwirkungen für die Tragfähigkeits- und geotechnischen Standsicherheitsnachweise ergeben
- ⇒ je Bemessungssituationen Angabe von unterem und oberem Wert
 - ⇒ ständige Bemessungssituation BS-P: Wiederkehrintervall i.d.R. $T = 100 \text{ a}$ (DIN EN 1990)
 - ⇒ Vorübergehende Bemessungssituation BS-T: Bauzeitlicher HW-Stand und Wasserstand bei Revision
 - ⇒ Außergewöhnliche BS-A: außergewöhnliches HW-Ereignis (z.B. 1.000 – jährliches HW) oder auch NW-Ereignis
- ⇒ Berücksichtigung möglicher Abhängigkeiten von Wasserständen

Angaben zu Wasserständen für NOK, Kieler Förde und Grundwasser mit verschiedenen Jährlichkeiten erforderlich

Bei Berücksichtigung des MSA sind diese Werte für verschiedene Zeitpunkte erforderlich

Zusammenhang Oberflächenwasserstände und Grundwasserstand erforderlich

Prognoseansatz Grundlagen



T0 (2012)

MW	NHN +0,04 m
HW100	NHN +2,50 m
HW200	NHN +2,60 m
BHW	NHN +3,10 m
HHW (1872)	NHN + 2,97 m
bei MW von NHN - 0,20 m	
=> Höhe über MW	3,17 m

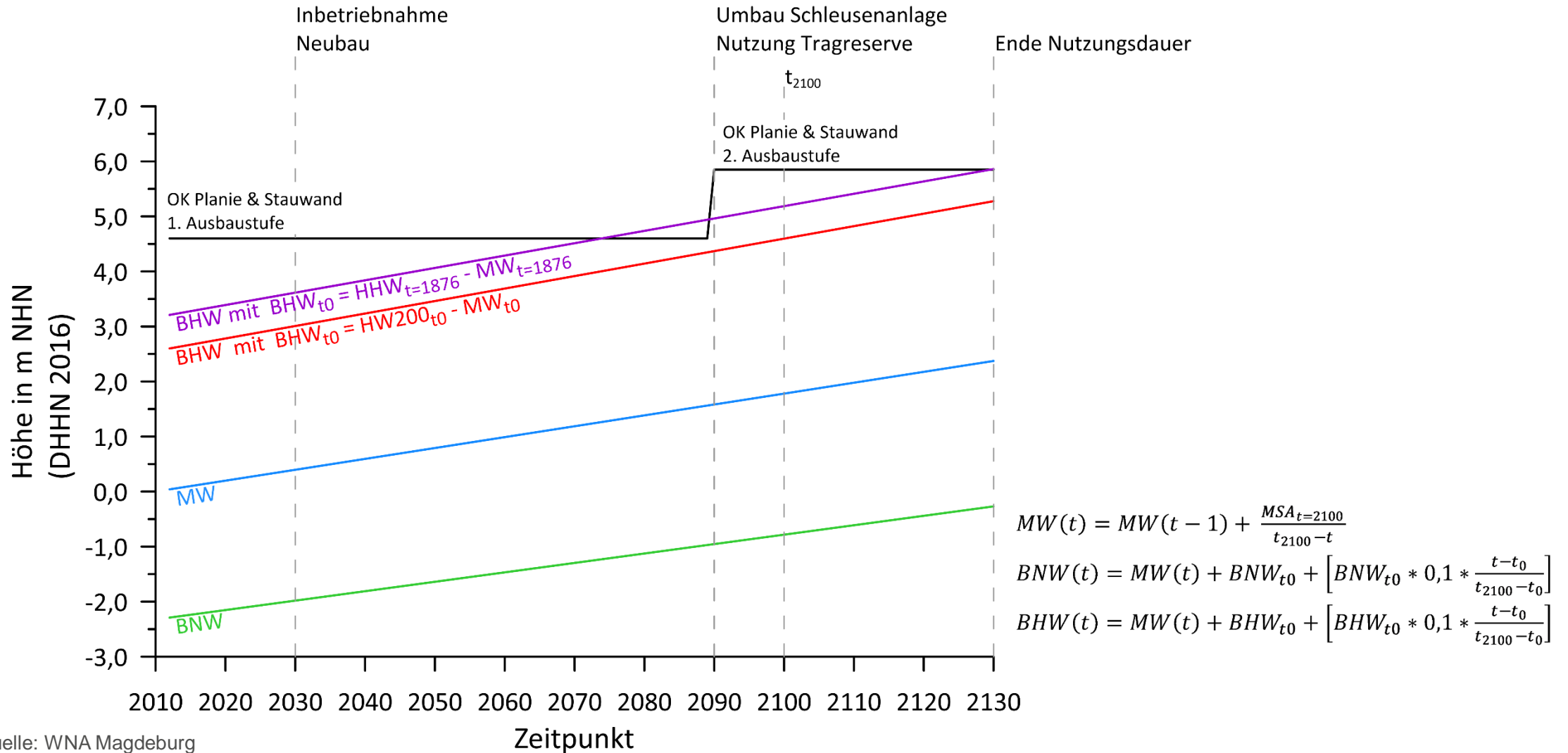
Prognosezeitpunkte

- MW
 - MSA um 1,74 m bis 2100
 - Ermittlung des MWs für Prognosezeitpunkte durch lineare Interpolation bzw. Extrapolation
- HW-Ereignisse, BHW, HHW und BNW
 - keine belastbaren Aussagen zur Entwicklung der Wasserstandsdifferenz bei HW/NW-Ereignissen bzgl. des zukünftigen mittleren Wasserstands vorhanden
 - Ansatz einer konstanten Differenz zwischen der jeweiligen Hydrologischen Kenngröße (z.B. Hochwasserereignis) und dem MW
 - zzgl. eines Zuschlags von 10%

* Zeitpunkt der 2. Ausbaustufe erfolgt in Abhängigkeit des MSA

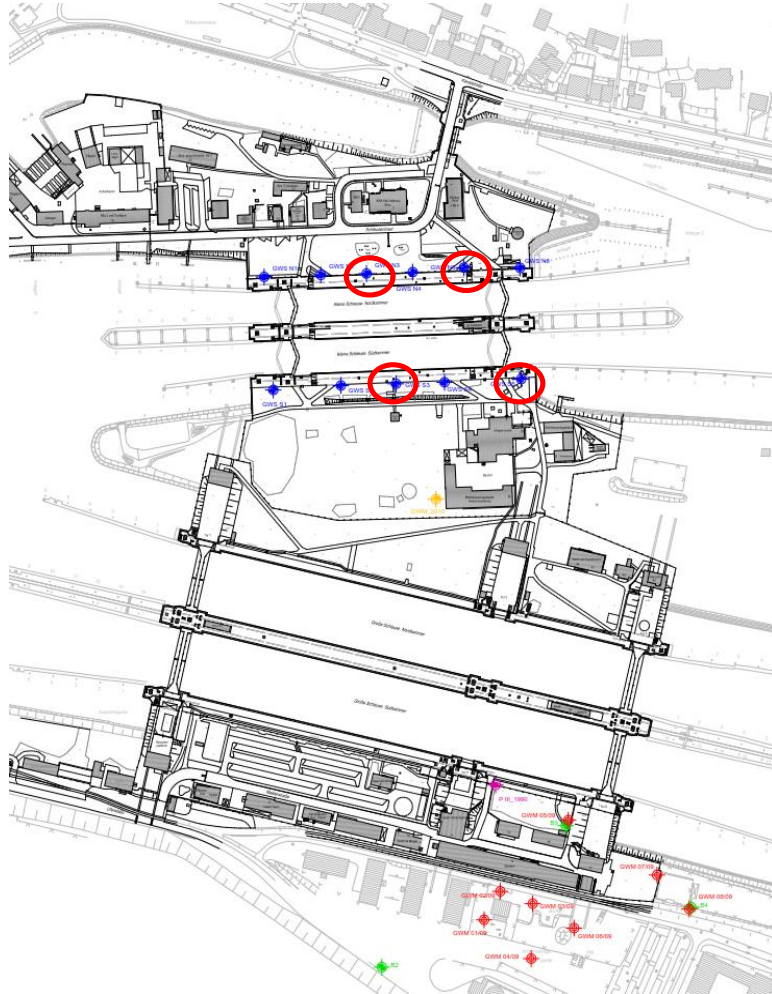
Generalplan Küstenschutz Schleswig-Holstein 2012

Prognoseansatz Ergebnis

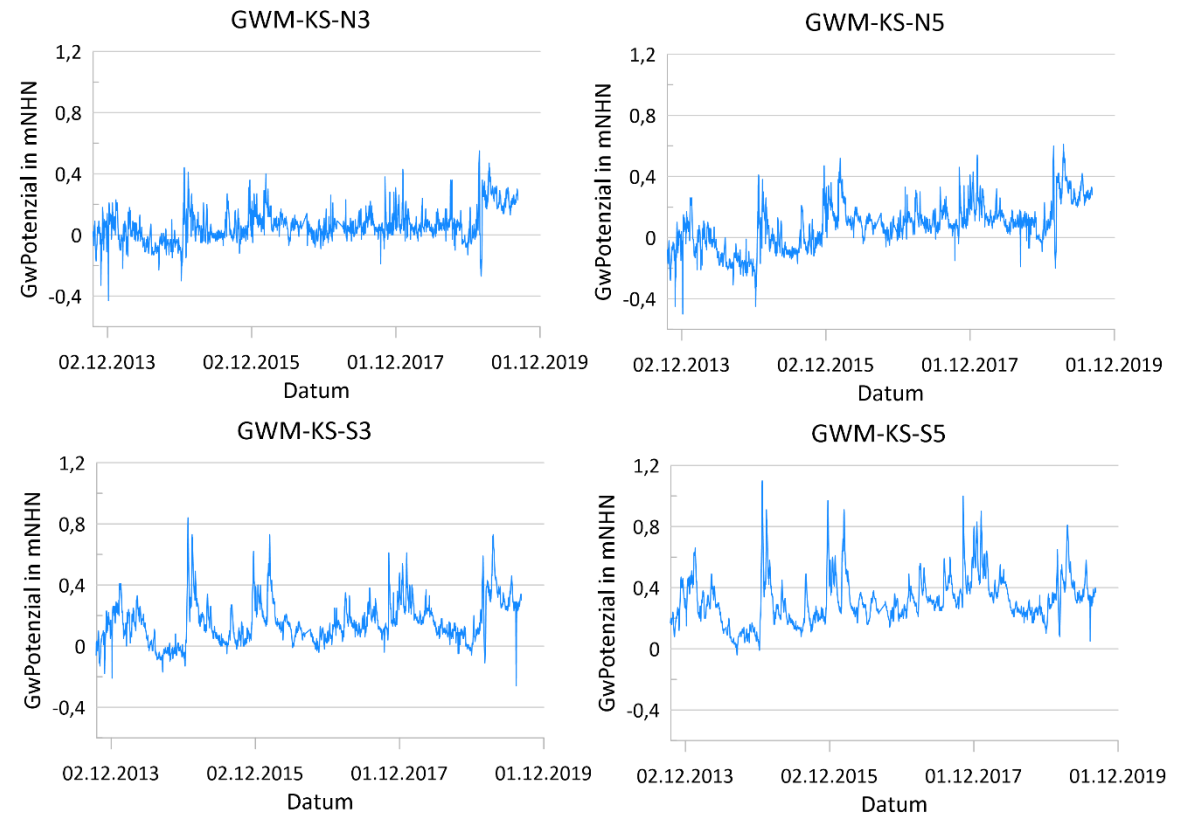


Quelle: WNA Magdeburg

Auswertung der GwStände Messnetz und GwGanglinien

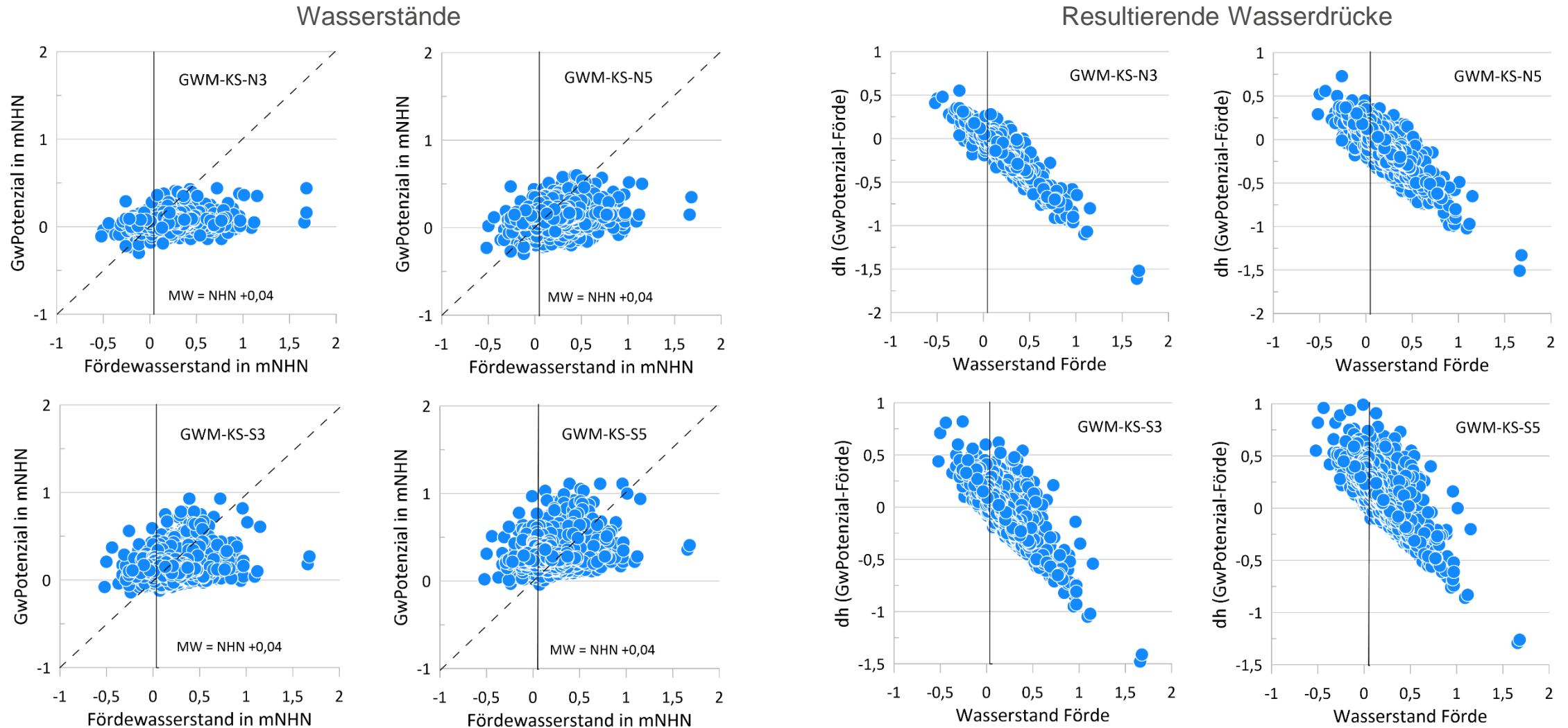


- Keine Angaben zum Mittleren GwStand und zu Jährlichkeiten
- Langjährige Messreihen (seit 2013) für die Grundwassermessstellen
GWM N3
GWM N5
GWM S3
GWM S5



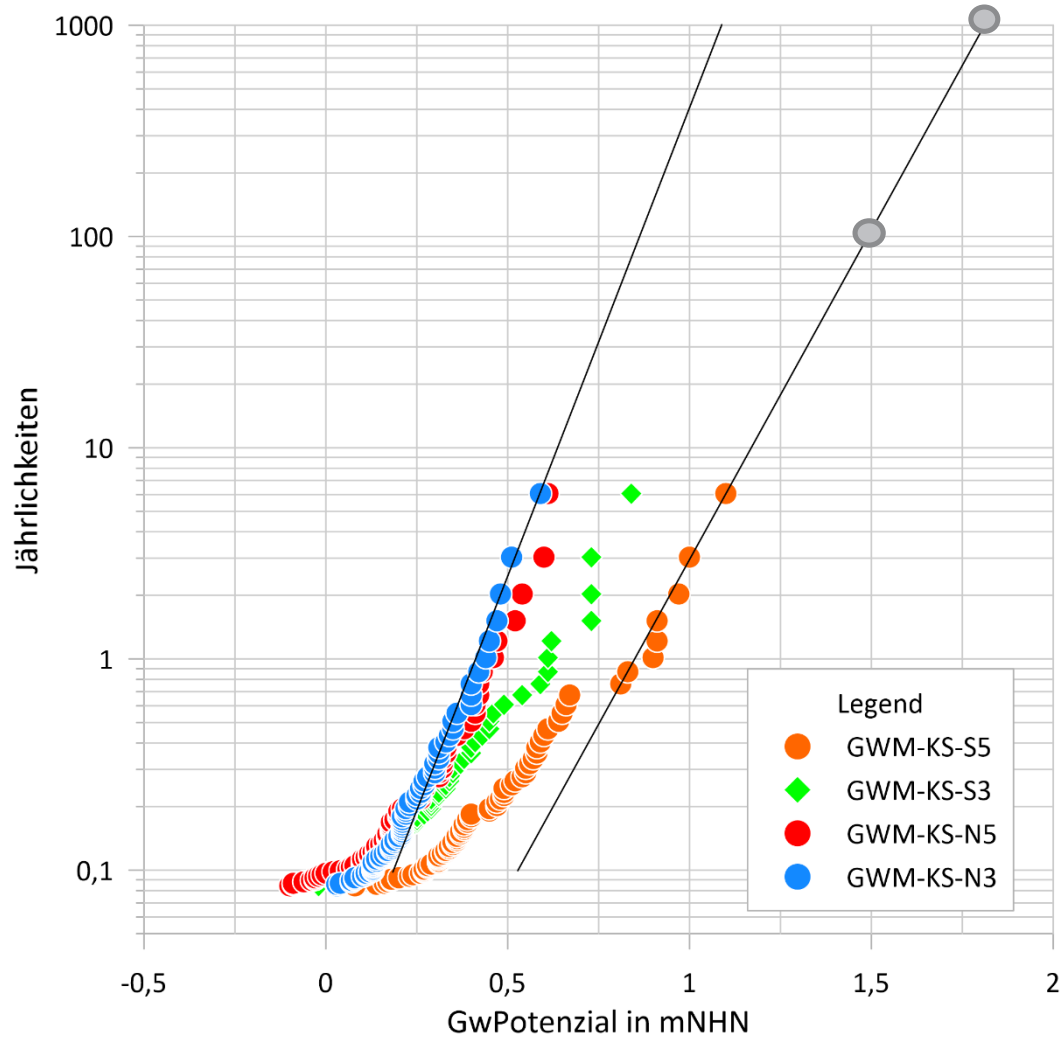
Auswertung der GwStände

Zusammenhang Grundwasser und Fördewasserstand



Auswertung der GwStände

Extremwertstatistik und Prognosewerte



➔

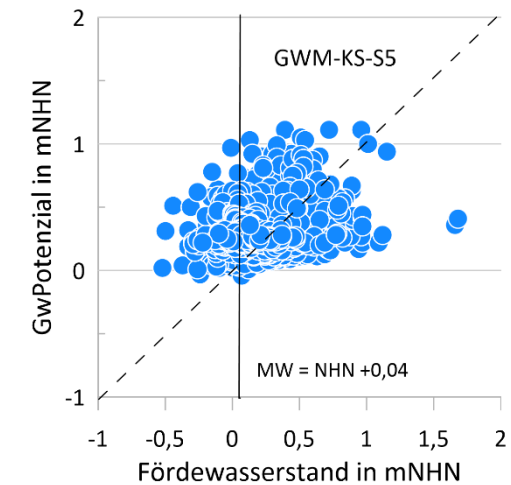
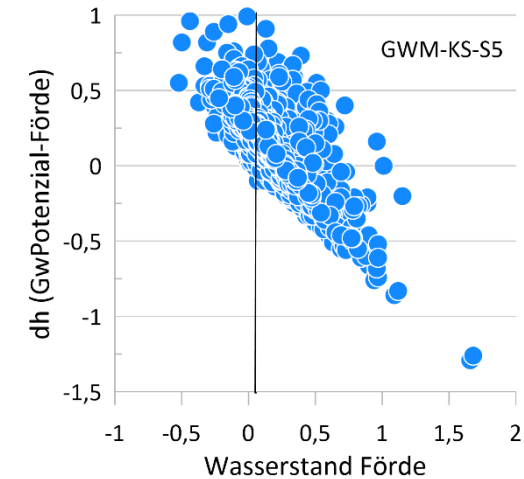
NW-GW	NHN -0,45 m
GW100	NHN +1,50 m
GW1000	NHN +1,80 m

	NW _{GW} [mNHN]	GW ₁₀₀ [mNHN]	GW ₁₀₀₀ [mNHN]
Ist-Zustand	- 0,45	+ 1,50	+ 1,80
2030	- 0,14 / -0,45	+ 2,01	+ 2,34
2035	- 0,05 / -0,45	+ 2,10	+ 2,43
2070	+ 0,65 / -0,45	+ 2,80	+ 3,13
2090	+ 1,10 / -0,45	+ 3,19	+ 3,52
2100	+ 1,25 / -0,45	+ 3,39	+ 3,72
2130	+ 1,83 / -0,45	+ 3,98	+ 4,31

Festlegung der charakteristischen Wasserstände

- Grundlage der Festlegung
 - NOK-Wasserstände (konstant)
 - Prognosewerte für jeden Zeitpunkt
Wasserstände Kieler Förde und Grundwasserstände
 - Berücksichtigung der Zusammenhänge zwischen
Wasserstände Kieler Förde und Grundwasser

Bemessungs-situation	Beschreibung	Wasserstand Kieler Förde	Grundwasser
BS-P	Ständige	NW/HW100	NW-GW/GW100
BS-T	Bauzeit	HW100 (T2035)	GW100 (T2035)
BS-A	Sturmflut	BHW	BHW – 1m
	Extremes NW	BNW	MW + 1m
	Erhöhter GwStand	MHW	GW1000



Festlegung der charakteristischen Wasserstände

- Grundlage der Festlegung
 - NOK-Wasserstände (konstant)
 - Prognosewerte für jeden Zeitpunkt
Wasserstände Kieler Förde und Grundwasserstände
 - Berücksichtigung der Zusammenhänge zwischen
Wasserstände Kieler Förde und Grundwasser

Bemessungs-situation	Beschreibung	Wasserstand Kieler Förde	Grundwasser
BS-P	Ständige	NW/HW100	NW-GW/GW100
BS-T	Bauzeit	HW100 (T2035)	GW100 (T2035)
BS-A	Sturmflut	BHW	BHW – 1m
	Extremes NW	BNW	MW + 1m
	Erhöhter GwStand	MHW	GW1000

Beispieltabelle für BS-P

	Zeitpunkt	Unterer Wert	Oberer Wert (T = 100 a)
Kieler Förde	2012	-1,59 (NW)	+ 2,50 (HW ₁₀₀)
	2030	- 1,39 (NW)	+ 3,11 (HW ₁₀₀)
	2035	-1,30 (NW)	+ 3,20 (HW ₁₀₀)
	2070	- 0,60 (NW)	+ 3,89 (HW ₁₀₀)
	2090	- 0,21(NW)	+ 4,29 (HW ₁₀₀)
	2100	- 0,01 (NW)	+ 4,49 (HW ₁₀₀)
	2130	+ 0,58 (NW)	+ 5,85*
NOK	2012	- 0,70	+ 1,10
	2030		
	2035		
	2070		
	2090		
	2100		
	2130		
GwStand	Ist / 2012	- 0,45 (NW _{GW})	+1,70 (GW ₁₀₀ +0,2m)**
	2030	- 0,14 / - 0,45 (NW _{GW})	+ 2,21 (GW ₁₀₀ +0,2m) **
	2035	- 0,05 / - 0,45 (NW _{GW})	+ 2,30 (GW ₁₀₀ +0,2m)**
	2070	+0,65 / - 0,45 (NW _{GW})	+ 3,00 (GW ₁₀₀ +0,2m)**
	2090	+1,10 / - 0,45(NW _{GW})	+ 3,39 (GW ₁₀₀ +0,2m)**
	2100	+1,24/ - 0,45 (NW _{GW})	+ 3,59 (GW ₁₀₀ +0,2m)**
	2130	+1,83 / - 0,45 (NW _{GW})	+ 4,18 (GW ₁₀₀ +0,2m)**

Fazit

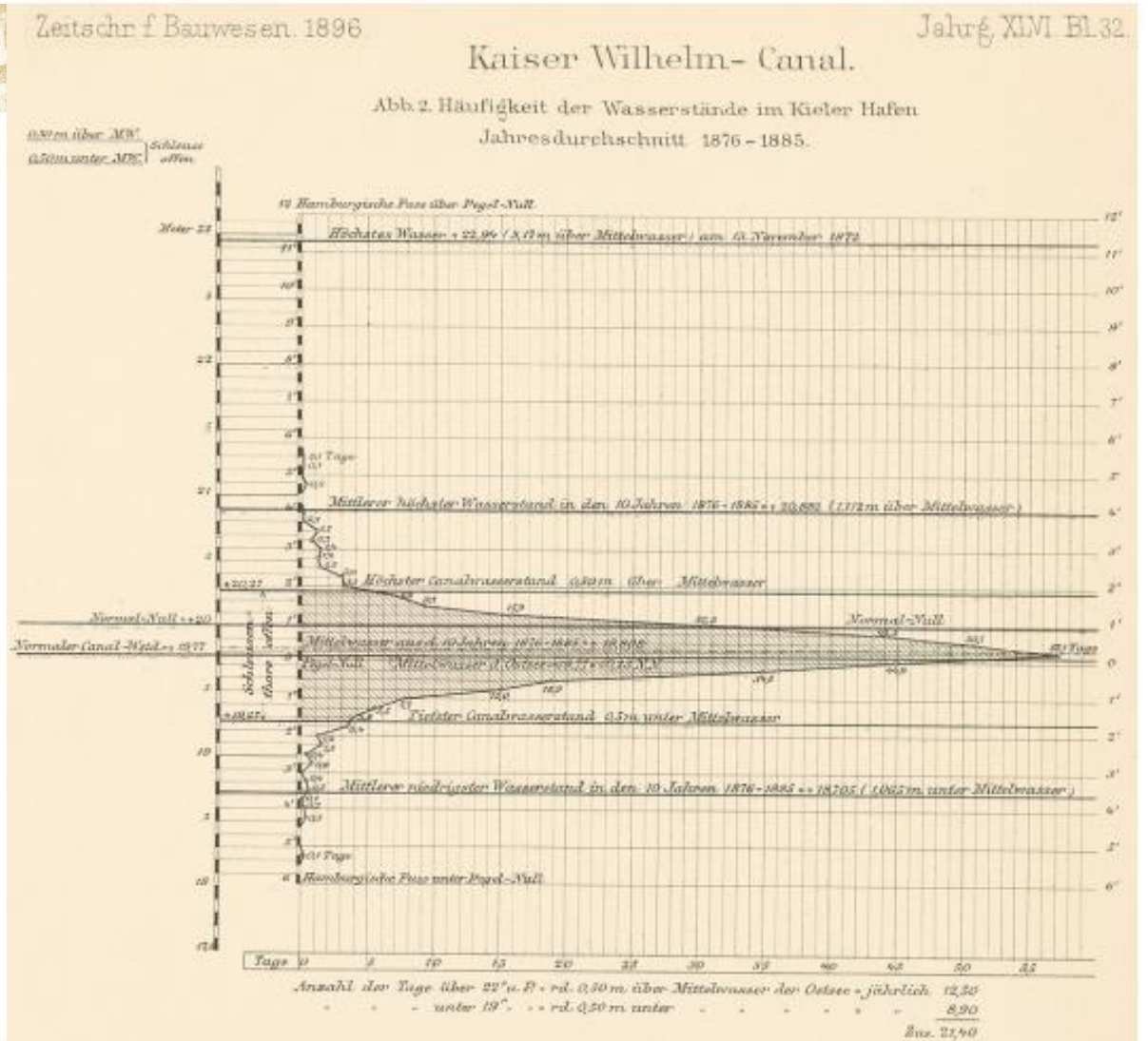
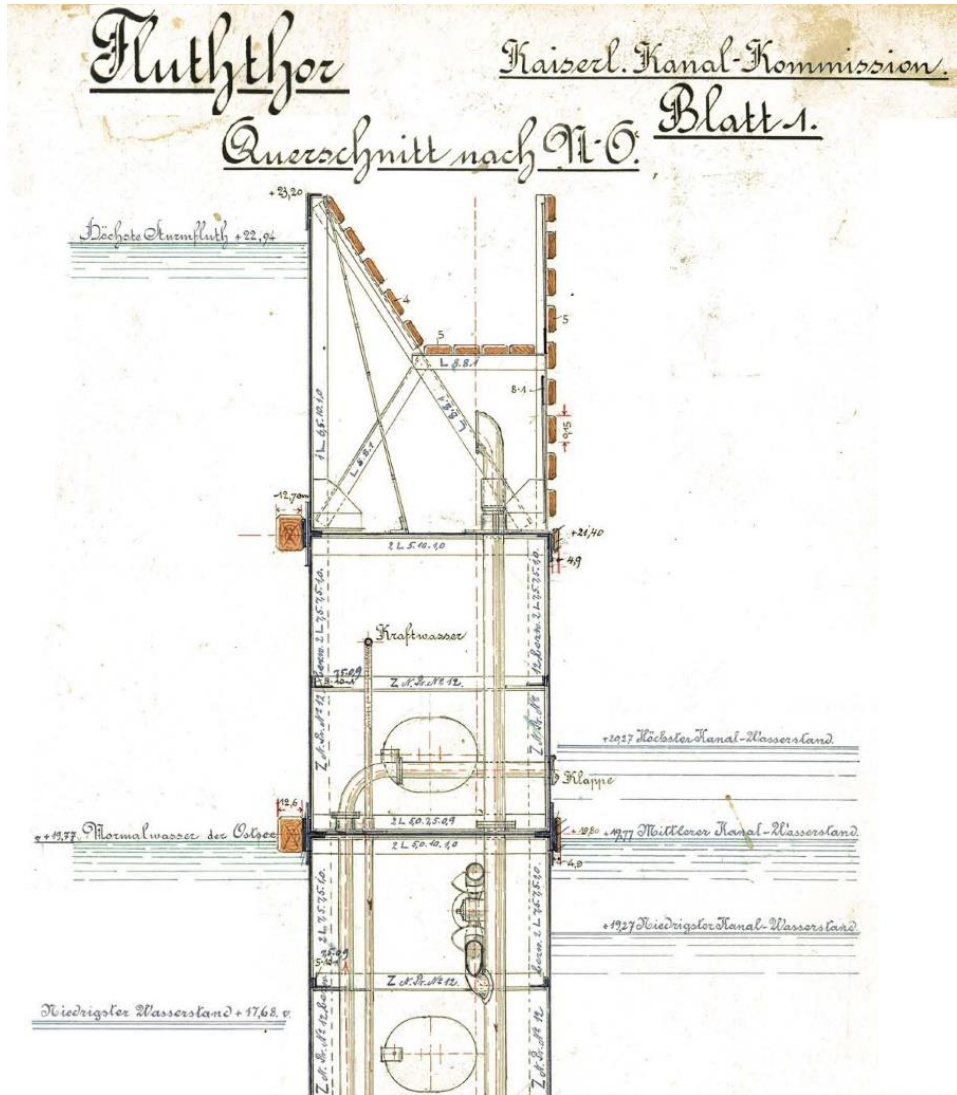
- Meeresspiegelanstieg im Bereich westliche Ostsee kann bis zum Jahr 2100 um 1,74 m (auf NHN +1,78 m) steigen (95-Perzentil, RCP 8.5 Szenario), MSA bis 2300
- MSA ist bei der Festlegung der char. Wasser- und GwStänden für die einzelnen Bemessungssituationen zu berücksichtigen
 - Wasserstände mit unterschiedlichen Jährlichkeiten sind für jeden relevanten Zeitpunkt erforderlich
 - pragmatischer Ansatz um in die Zukunft zu projizieren zielführend
 - HW-Ereignisse sind im Zusammenhang mit dem damaligen MW-Stand zu sehen
 - Statistische Auswertung von Messwerten (erfordert geeignete Datenbasis)
 - Zusammenhänge Gw- und Oberflächenwasserstand maßgeblich (Zeitverzögerung und Dämpfung)
 - DAS-Basisdienst
- Strategie bei der Planung von Bauwerken im Küstenbereich
 - Planung mit Ausbaureserven (Erhebliche Auswirkungen auf Bauwerks-Konzept möglich)
 - Planung von mehrere Ausbaustufen
 - Orientierung der Ausbaustufen primär an den Wasserständen
 - Beobachtung der Wasser- und Grundwasserstände erforderlich
 - Ausbaureserven ermöglichen evtl. Verlängerung der Lebensdauer

In Hamburg sagt man Tschüß

Bundesanstalt für Wasserbau
22559 Hamburg

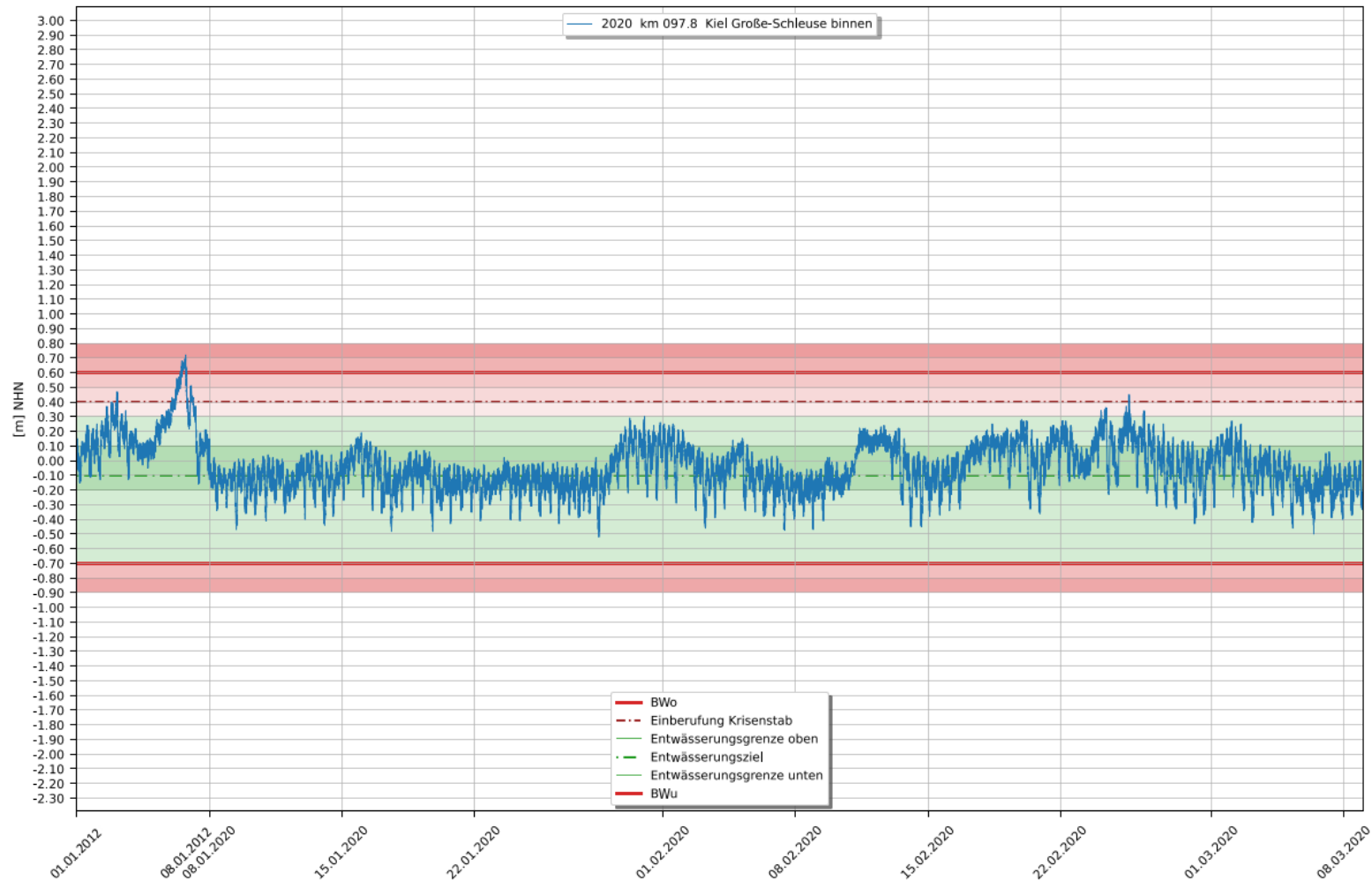
www.baw.de

Historische Ansätze



Wasserstände NOK

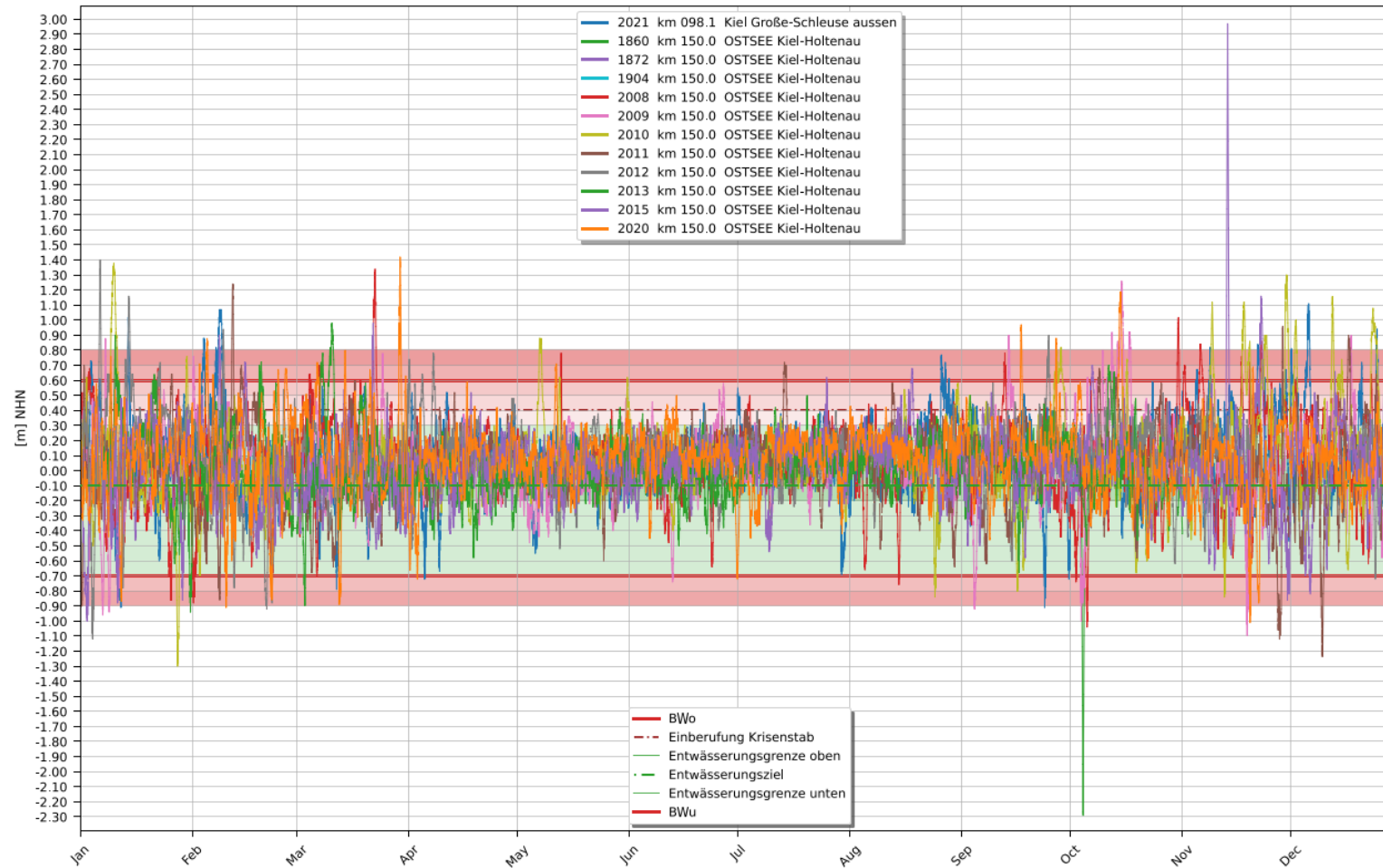
Pegelauswertung NOK - NOK Kiel binnen



Quelle: WNA Magdeburg

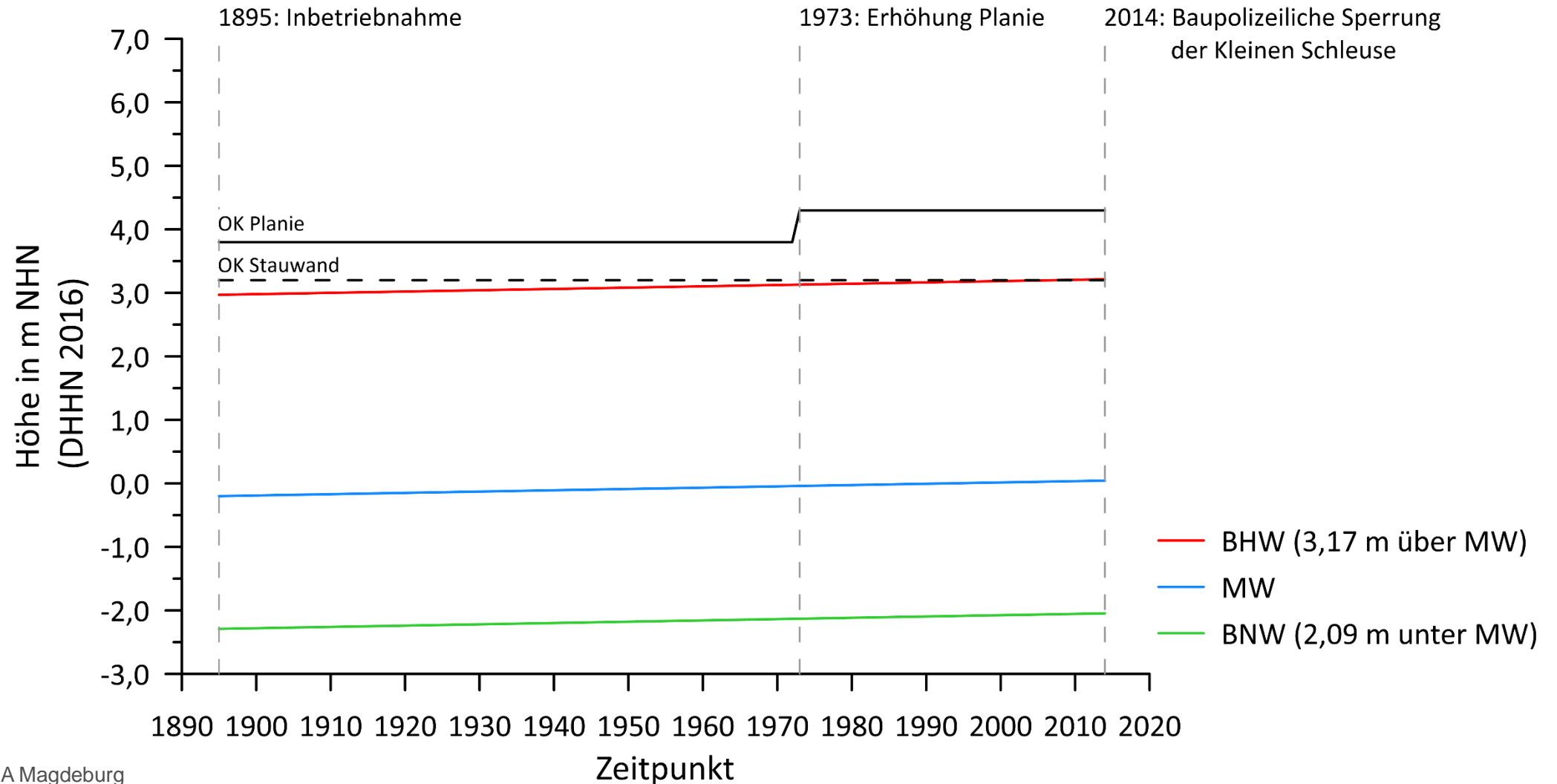
Wasserstände Kieler Förde

Pegelauswertung NOK - Ostsee Kiel



Quelle: WNA Magdeburg

Entwicklung BNW, MW, BHW Kieler Förde und Schleusenplanie zwischen 1895 bis 2014



Quelle: WNA Magdeburg

Hintergrund

Prognoseansätze Anwendungsbeispiel BHW

Zeitpunkt	Generalplan Küsten-schutz L-SH	Jahr	HöhenBezugs-System	Prognose Anstieg Meeresspiegel um	MW	Klimazuschlag	säkulare Meeresspiegelhebung seit 1872	HHW _{HBS} zum Ereigniszeitpunkt	Δh_{HHW} HHW über MW zum Ereigniszeitpunkt	HW ₂₀₀ [LKN-SH 2013]	$\Delta h_{HW_{200}}$ HW ₂₀₀ über MW zum Festlegungszeitpunkt	$\Delta h_{Prognose}$ Zulage progn. HHW / HW ₂₀₀ über progn. MW	BHW Prognosemethode HW ₂₀₀	BHW Prognosemethode HHW auf MW normiert	Stauwand- ^{***} höhe	Freibord	Planiehöhe Haupt
HHW		1872	NN		-0,23			2,94	3,17								
Eröffnung		1895	NN		-0,192							7%	3,20	3,20	0,60	3,80 (~)	
Umbau		1973	NN											3,20	1,10	4,30	
	2001	2001	NHN			0,30	0,20 (~)*	2,97					3,47	3,55	0,75	4,30	
T ₀	2012	2012	NHN		0,04	0,50	- (**)			2,60	2,56		3,10	3,21 (**)	3,55	0,75	4,30
T ₂₁₀₀	(2012)	2100	NHN	1,74	1,78							10%	4,60	5,27	4,60	0,00	4,60
T ₂₁₃₀	(2012)	2130	NHN	0,59	2,37							10%	5,19	5,85	5,85	0,00	5,85

(alle Werte in [m])

* : 0,21

*** : Wellenüberlauf ist in Umbauzeitpunkt und Ausschöpfung Tragreserve zu berücksichtigen

** : Auslegung GPKS L-SH 2001/2012 different

Bestand	
Neubau	
Tragreserve	

Ansätze für T₂₁₀₀ und T₂₁₃₀

$$\Delta h_{HW_{200}} : HW_{200} - MW_{Festlegungszeitpunkt}$$

$$BHW \text{ Prognosemethode } HW_{200} : MW_{Prognosezeitpunkt} + (\Delta h_{HW_{200}} * (100\% + \Delta h_{Prognose}))$$

$$\Delta h_{HHW} : HHW_{NHN} - MW_{Ereigniszeitpunkt}$$

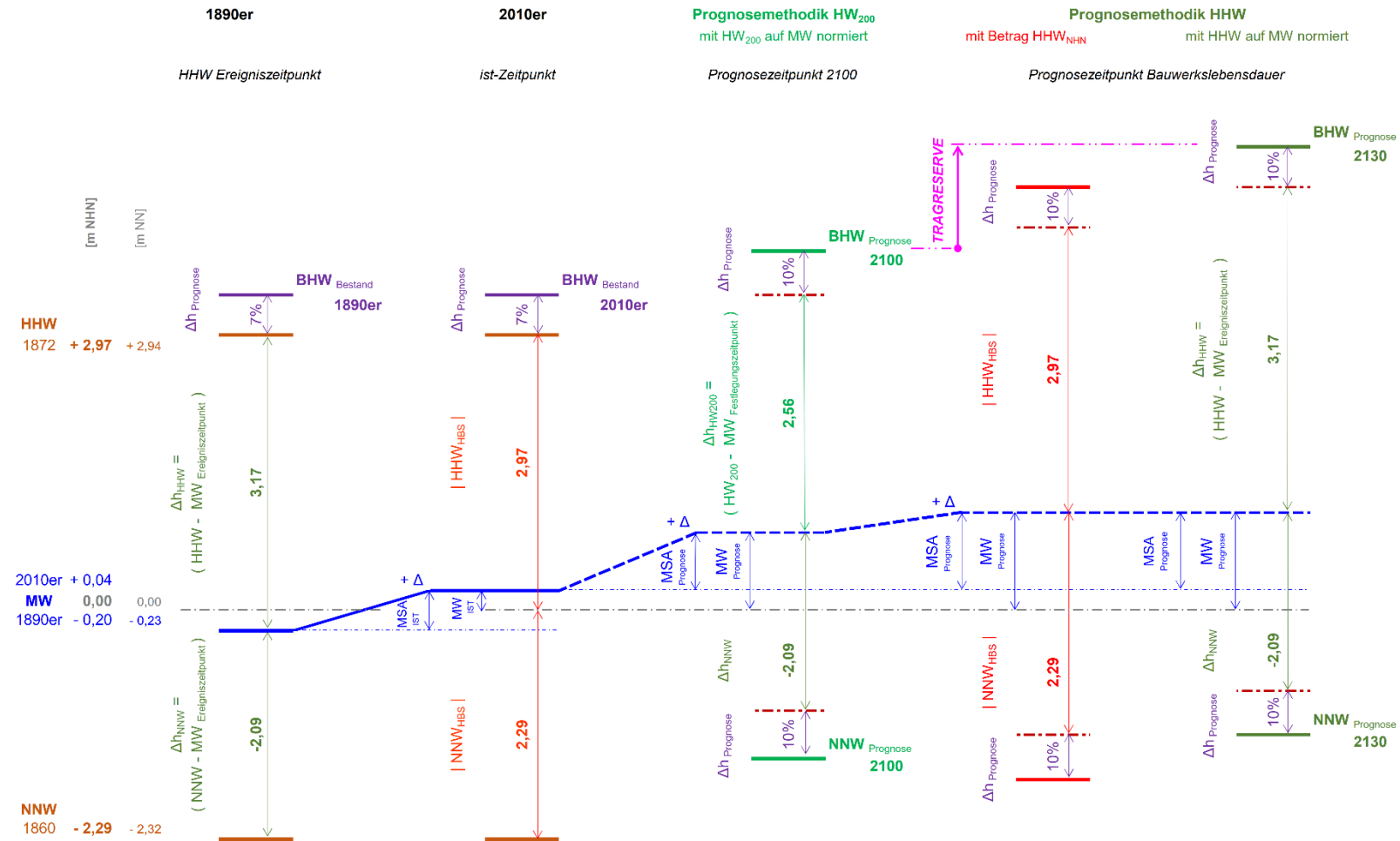
$$BHW \text{ Prognosemethode } HHW \text{ auf MW normiert} : MW_{Prognosezeitpunkt} + (\Delta h_{HHW} * (100\% + \Delta h_{Prognose}))$$

Quelle: WNA Magdeburg

Hintergrund

Prognoseansätze Anwendungsbeispiel BHW

Prognosemethodik Δh -Extremwasserstände normiert auf $MW_{\text{Ereigniszeitpunkt}}$



Quelle: WNA Magdeburg

Auswertung der GwStände

Extremwertstatistik

- Auswertung von Wasserstandsdaten über Extremwertstatistik
 - Zusammenstellung einer Stichprobe aus Messwerten
 - Block-Maxima-Methode
 - Peaks-over-Threshold Methode
 - Anpassung der Stichprobe an Extremwertverteilung
 - (z.B. Gumbel-Verteilung) z.B. über MLE oder
 - Ermittlung der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten bzw.
- Anschließend Prognose mit vorgestellter Methode
- Betrachtung des Zusammenhangs Grundwasser und Förd.

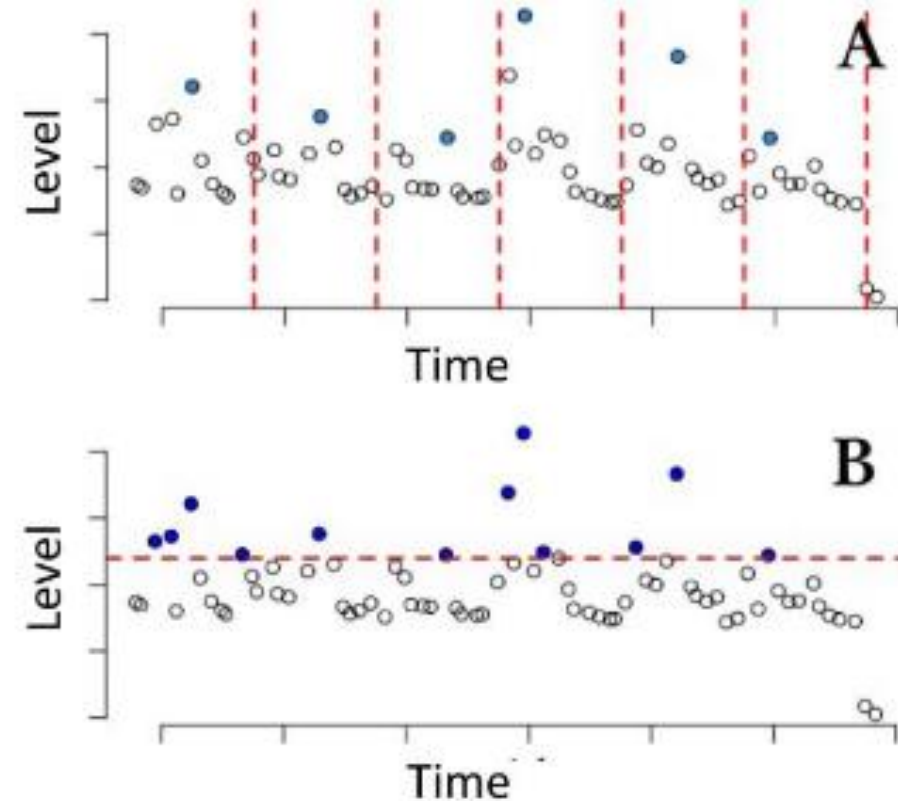
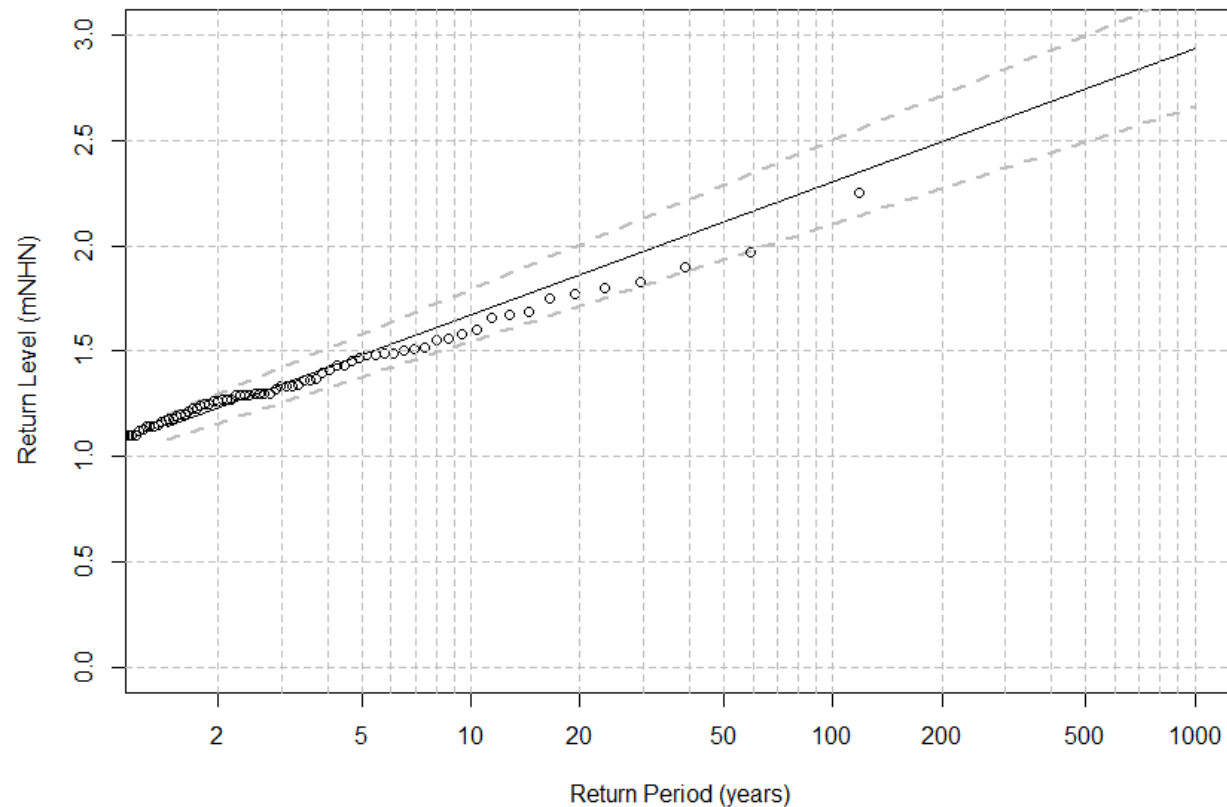


Figure 1. Block Maxima method (A) and Peaks-over-Threshold (B), modified from Haaf (2015).

Auswertung Fördewasserstand nach der Block-Maxima Methode

Wasserstandsdaten Pegel Kiel-Holtenau (1900 - 2019)

Block-Maxima-Methode



Eigene Auswertung

Jährlichkeit 100 a	NHN +2,30 m
Jährlichkeit 200 a	NHN +2,49 m
Jährlichkeit 1000 a	NHN +2,93 m

Generalplan Küstenschutz Schleswig-Holstein 2012

HW100	NHN +2,50 m
HW200	NHN +2,60 m
HHW	NHN +2,97 m (3,17 m ü MW)
BHW = RHW + 0,5	NHN +3,10 m

Es ist sicherzustellen, dass das ermittelte BHW den bisher höchsten örtlich beobachteten Sturmflutwasserstand nicht unterschreitet !!!