

Exkurs: Modellvalidierung EV Aurich

Das Einzugsgebiet des Entwässerungsverbandes Aurich wird über den Ems-Jade-Kanal entwässert, der das Wasser sowohl in Richtung Wilhelmshaven als auch in Richtung Emden abführt. Daher ist das Verbandsgebiet Aurich hydrologisch in zwei Gebiete unterteilt (s. Karte auf Seite 59). Für das Einzugsgebiet des EV Aurich, das in Richtung Emden entwässert, wurden im Rahmen des Projektes Wasserhaushaltssimulationen durchgeführt, um den Abfluss aus diesem Gebiet zu ermitteln und Aussagen über Klimawandeleffekte machen zu können.

Im Jahr 2021 wurde am Standort Woltthuser Brücke eine Messstation zur Abflussmessung im Ems-Jade-Kanal mit Fließrichtung Emden Hafen installiert, die vom NLWKN betrieben wird. Die Station registriert die Wasserstände, den Abfluss und die Fließgeschwindigkeit im Abstand von 5 Minuten. Kurz vor dem Erscheinen dieser Broschüre konnten Abflussmengen von November 2021 bis Januar 2023 (15 Monate) ausgewertet werden. Für die vorhandenen Daten wurden Monatsmittelwerte gebildet. Dieser Messdatensatz lässt einen ersten Vergleich mit den für die Jahre 1998 bis 2019 simulierten Abfluss-

mengen zu. Eine Validierung des Modells ist dadurch allerdings noch nicht möglich.

Die Abbildung 15 zeigt die simulierten Monatsmittelwerte (blaue Säulen) und die gemessenen Monatsmittelwerte (grüne Säulen) im Vergleich. Zusätzlich ist für die simulierten Werte mit den Antennen die gesamte Spannweite der Daten aus den 22 simulierten Jahren angegeben. Bis auf den Februar 2022 befinden sich alle Messwerte innerhalb dieser Spannweiten. Das bedeutet, dass die Modellierung die Messwerte aus den ersten 15 Monaten der Messzeitreihe statistisch gut abbildet. Im Februar 2022 fielen im nach Emden entwässernden Einzugsgebiet des EV Aurich mit mehr als 200 mm außergewöhnlich hohe Niederschläge. Daher stellt die Messung aus dem Februar einen extremen Abflusswert dar, der in vergleichbarer Höhe im simulierten Zeitraum aber bereits in anderen Wintermonaten aufgetreten ist.

Eine Validierung der Abflussmodellierung für den EV Aurich kann in Zukunft anhand einer längeren Zeitreihe der Abflussdaten der Messstation Woltthuser Brücke vorgenommen werden.

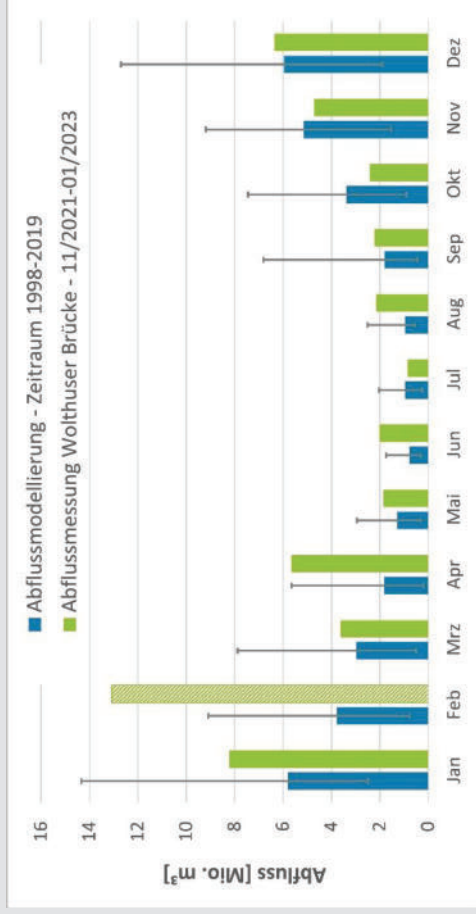


Abb. 15: Vergleich der **Monatsmittelwerte der Modellierung** für das Einzugsgebiet des EV Aurich für den Zeitraum 1998 bis 2019 (blaue Säulen) mit Angabe der Spannweiten der Daten (Antennen) und der **Monatsmittelwerte der Messdaten** für den Zeitraum November 2021 bis Januar 2023 (grüne Säulen) mit dem Extremereignis vom Februar 2022 (Einzelwert, grün schraffierte Säule)

Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs auf die Entwässerungsbedingungen der Verbandsgebiete

Die globalen Klimamodelle berechnen neben den atmosphärischen Veränderungen auch den Einfluss der Klimaänderungen auf die Ozeane. Steigende Temperaturen bewirken, dass sich Wasser ausdehnt. Dadurch wird an vielen Küsten auf der Welt ein steigender Meeresspiegel beobachtet. Auch abschmelzendes Wasser der Inlandeisschilde und Gletscher trägt zum Meeresspiegelanstieg bei. Von 1880 bis 2009 ist der Meeresspiegel im globalen Mittel um 21 cm gestiegen. Dieser Trend wird sich in Zukunft fortsetzen und wahrscheinlich deutlich beschleunigen.

Der globale Meeresspiegelanstieg wirkt sich aufgrund der Meeresströmungen und der Küstenmorphologie regional unterschiedlich aus. Für die Analysen hinsichtlich der künftigen Entwicklung an der ostfriesischen Nordseeküste wurden wie im KLEVER-Projekt die regionalen Modellrechnungen der IPCC-Szenarien RCP4.5 und RCP8.5 ausgewertet. Jedes Szenario wird auch hier von einer Vielzahl von Klimamodellen quantifiziert. Im Rahmen von KLEVER-Risk wurden sowohl die Mittelwerte aller Modelle (Ensemble-Mittelwert) als auch die 95%-Perzentile (Wert, der von 5 % der Modelle überschritten wird) für die Szenarien betrachtet. Würde allein der Mittelwert betrachtet, müsste davon ausgegangen werden, dass etwa die Hälfte der Modelle einen höheren Meeresspiegelanstieg projiziert als der Mittelwert aller Modelle. Da unbekannt ist, welches der Modelle die Zukunft am besten „vorhersagen“ kann, läge das Risiko dann bei 50 %, dass der Meeresspiegelanstieg im Rahmen der Folgenabschätzung und Maßnahmenplanung unterschätzt wird. Bei der Betrachtung des 95%-Perzentils beträgt dieses Risiko nur 5 %.

Die betrachteten Projektionen zeigen für die Deutsche Bucht einen zu erwartenden Meeresspiegelanstieg zwischen 50 und 110 cm bis zum Ende des Jahrhunderts (s. Abb. 16). Mit einbezogen ist bei diesen Werten bereits die Landsenkung, die zu einer relativen Erhöhung des

Meeresspiegels führt. Sie wurde bei den Analysen mit einer Senkungsrate von 1 mm/Jahr berücksichtigt. Weiterführende Informationen zum Meeresspiegelanstieg an der norddeutschen Küste finden sich auch unter: www.meeresspiegel-monitor.de

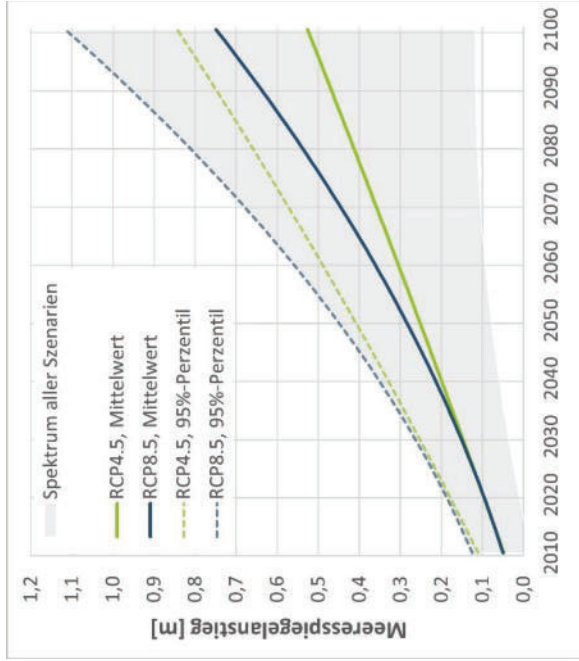


Abb. 16: Meeresspiegelanstieg in der Deutschen Bucht nach IPCC 2013

Der Anstieg des Meeresspiegels wirkt sich auf die Binnenentwässerung sowohl durch die Veränderungen des Tideniedrigwassers als auch des Tidehochwassers aus. Über das Tideniedrigwasser nimmt der Meeresspiegelanstieg Einfluss auf die künftigen Sielmöglichkeiten. Sinkt der Wasserstand bei Ebbe weniger tief ab, wird die Entwässerung im Sielbetrieb eingeschränkt oder sogar gänzlich unmöglich, sodass verstärkt auf den Pumpenbetrieb ausgewichen werden muss. Durch den Anstieg des Tidehochwassers wird künftig allerdings auch der Pumpenbetrieb erschwert. Die Pumpen der Mündungsschöpfwerke sind für eine bestimmte geodätische Förderhöhe (Höhendifferenz

zwischen Binnen- und Außenwasserstand) ausgelegt. Wird bei hohen Außenwasserständen eine kritische geodätische Förderhöhe überschritten, nimmt die Pumpleistung sichtbar ab, teilweise müssen die Pumpen zum Schutz der Technik sogar ganz abgestellt werden. Steigende Außenwasserstände bedeuten damit, dass die Pumpen künftig entsprechend häufiger unter größerer Belastung laufen bzw. abgeschaltet werden müssen und weniger Wasser fördern können.

Um die oben beschriebenen Effekte zu quantifizieren, wurden im Rahmen von KLEVER-Risk für einen zugrunde gelegten Meeresspiegelanstieg von 110 cm bis 2100 (RCP8.5, 95%-Perzentil) zum einen die Veränderung der potenziellen Sielstunden im Winterhalbjahr und zum anderen die Veränderung der Entwässerungsleistung der Siel- und Schöpfwerke ermittelt.

Veränderung der potenziellen Sielstunden im Winterhalbjahr

In Abbildung 18 auf Seite 20 ist exemplarisch für den Pegel Knock die Normaltidekurve über einen Tidezyklus (12,5 Stunden) dargestellt. Unter heutigen Bedingungen (durchgezogene blaue Linie) fällt der Außenwasserstand im Winterhalbjahr (Oktober bis März) für 1,3 Stunden unter den angestrebten Binnenwasserstand von -1,4 m NHN. In diesem Zeitraum besteht bei vorhandenem Entwässerungsbedarf die Möglichkeit, die Sielläufe zu nutzen. In der restlichen Zeit des Tidezyklus müssen zur Entwässerung hingegen die Pumpen eingesetzt werden. Unter der Annahme, dass das Tideniedrigwasser in gleicher Weise wie der mittlere Meeresspiegel ansteigt, würden sich die zur Verfügung stehenden Sielstunden künftig entsprechend verringern. Die blau gestrichelte Linie in Abbildung 18 zeigt die um 110 cm nach oben verschobene Normaltidekurve (entsprechend des 95%-Perzentsils des Meeresspiegelanstiegszenarios RCP8.5 für das Jahr 2100). An der Knock würden dann keine Sielzeiten mehr bestehen.

Die Diagramme in Abbildungen 17 veranschaulichen die Abnahme der potenziellen Sielstunden bis zum Jahr 2100 für die verschiedenen Sielbauwerke im Betrachtungsraum. Die potenziellen Sielstunden wurden bezogen auf einen fixen Binnenwasserstand berechnet, der jeweils in den Abbildungen angegeben ist. Die dunkelblaue Linie beschreibt den Mittelwert der vier gerechneten Szenarien (RCP4.5 und RCP8.5, jeweils 50%- und 95%-Perzentil). Der graue Bereich stellt das Spektrum zwischen dem größten Änderungssignal (RCP8.5, 95%-Perzentil) und dem kleinsten Änderungssignal (RCP4.5, 50%-Perzentil) dar. Sofern für den Zeitraum von 2010 bis heute Aufzeichnungen zu den tatsächlich genutzten Sielstunden vorliegen, sind diese als grüne bzw. blaue Säulen dargestellt.

Die Abhängigkeit der Sielmöglichkeiten vom jeweiligen Binnenwasserstand ist in den Abbildungen deutlich zu erkennen. Je größer das Gefälle zwischen Binnenwasserstand und Tideniedrigwasser ist, desto länger besteht am entsprechenden Bauwerk die Möglichkeit über die Siel zu entwässern. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tab. 3: Abnahme der potenziellen Sielstunden im Winterhalbjahr bei einem Meeresspiegelanstieg von 110 cm bis zum Jahr 2100 (entsprechend RCP8.5, 95%-Perzentil)

Sielbauwerk	heute [Std]	2100 [Std]	Abnahme [%]
Knock	430	0	100
Moormerland / Petkum	1.020	170	83
Sautel	1.800	790	56
Leysiel	700	0	100
Emder Hafen	2.600	1.750	33

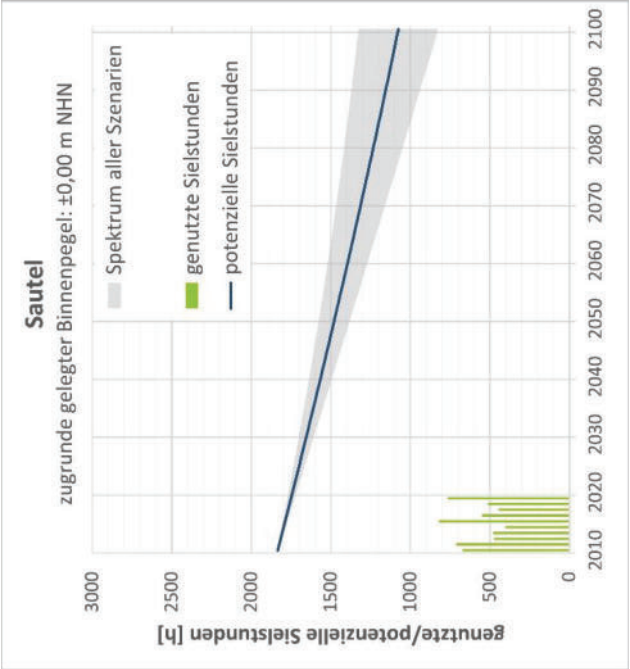
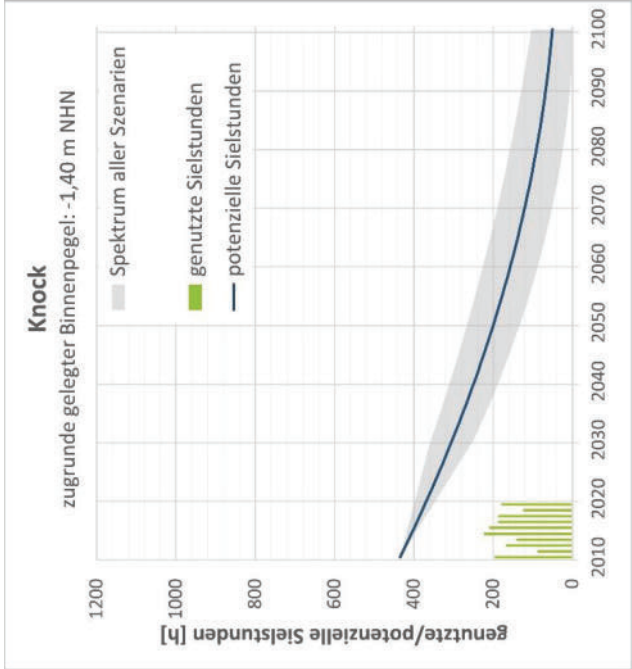
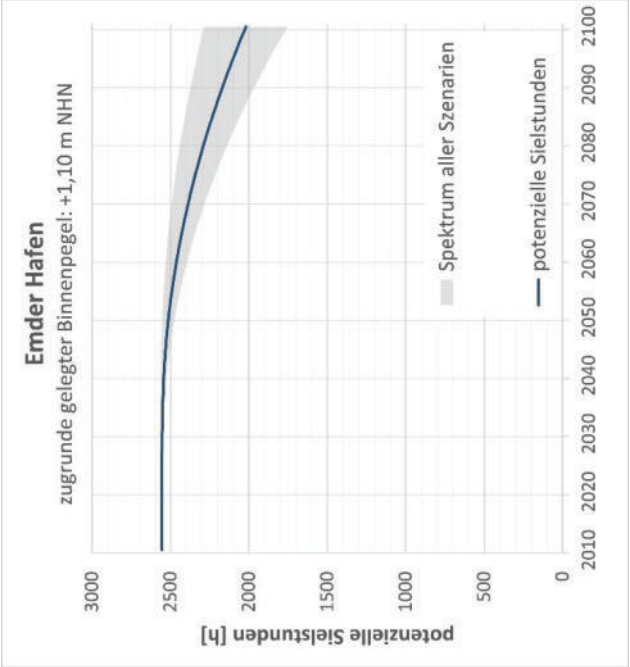
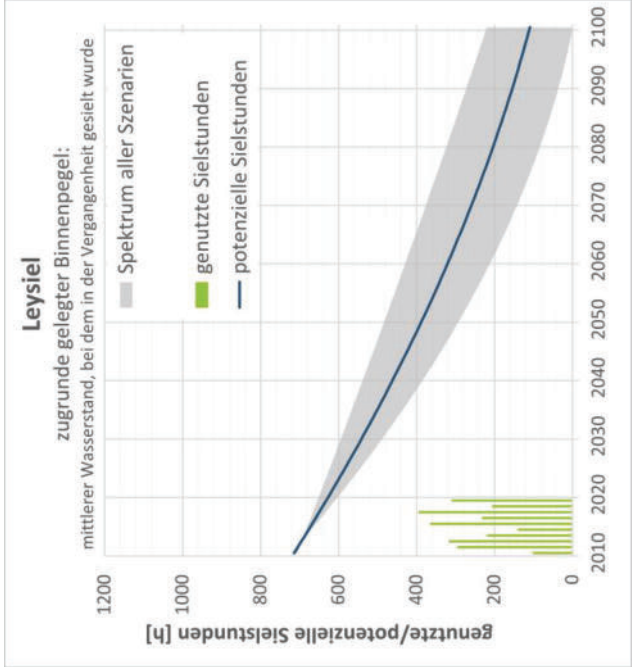
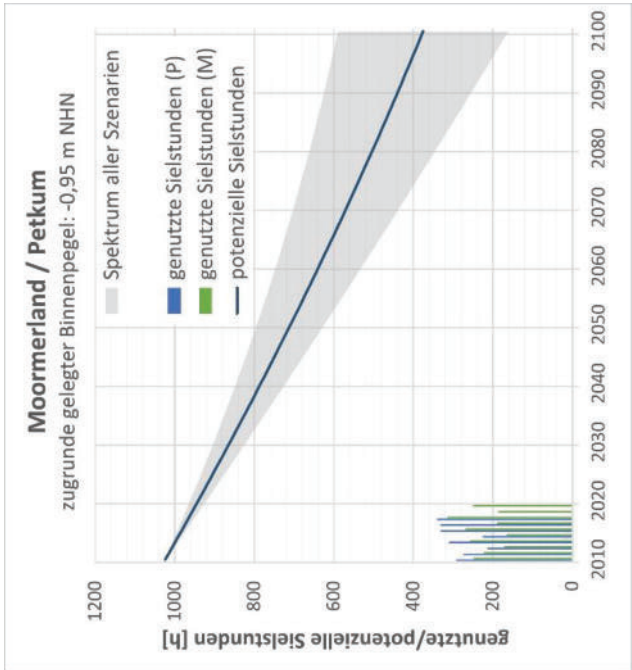


Abb. 17: Änderungseffekte der Meeresspiegelanstiegsszenarien auf die potenziellen Sielstunden im Winterhalbjahr von Oktober bis März (dunkelblaue Linie: Mittelwert der Änderungssignale der berechneten Szenarien; grauer Bereich: Spannweite zwischen dem Szenario mit dem geringsten Änderungssignal (RCP4.5, 50%-Perzentil) und dem größten Änderungssignal (RCP8.5, 95%-Perzentil); grüne bzw. blaue Säulen: genutzte Sielstunden)

Veränderung der Entwässerungsleistung der Siel- und Schöpfwerke

Um die Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs auf die Entwässerungsmöglichkeiten der vier Verbandsgebiete zu beschreiben, wurde die Veränderung der Entwässerungsleistung der Siel- und Schöpfwerke abgeschätzt. Dabei wurde zwischen der Entwässerungsleistung bei Normaltide- und bei Sturmflutbedingungen (Referenz-Kettentide von Januar 2012) unterschieden. Wie auch bei der Untersuchung der potenziellen Sielstunden (s. o.) wurde die vereinfachende Annahme getroffen, dass sich die Tidehoch- und Tideniedrigwasserscheitel der zugrunde gelegten Tidekurven jeweils in gleichem Maße wie der angenommene mittlere Meeresspiegelanstieg (RCP8.5, 95%-Perzentil) bis zum Jahr 2100 um 110 cm nach oben verschieben (s. Abb. 18).

Bei der Ermittlung der unter den jeweiligen Außenwasserstandsverhältnissen realisierbaren Entwässerungsleistungen wurde von einem über mehrere Tidezyklen anhalten-

den Dauerbetrieb der Siel- und Schöpfwerke aufgrund hohen Entwässerungsbedarfes ausgegangen. Unter Berücksichtigung der drei nachfolgend beschriebenen und in Abbildung 18 exemplarisch für die Knock dargestellten Betriebszustände wurden dann die vom jeweiligen Tideverlauf abhängigen durchschnittlichen Entwässerungsleistungen der Siel- und Schöpfwerke berechnet:

- 1) **Entwässerung im Sielbetrieb:** Der erste Zustand beschreibt die Zeiten, in denen der Außenwasserstand niedriger liegt als der Binnenwasserstand am jeweiligen Siel- und Schöpfwerk. In der Berechnung der Entwässerungsleistung wurden diese Zeiträume mit einer vom NLWKN angegebenen mittleren Sielleistung des entsprechenden Bauwerks abgebildet.
- 2) **Entwässerung im Pumpbetrieb:** Der zweite Zustand beschreibt die Zeiten, in denen der Außenwasserstand höher als der Binnenwasserstand ausfällt. In diesen

Zeiträumen entspricht die Entwässerungsleistung der Pumpleistung des jeweiligen Schöpfwerks, die von der geodätischen Förderhöhe (Differenz zwischen Außen- und Binnenwasserstand) abhängig ist. Der Zusammenhang zwischen Pumpleistung und geodätischer Förderhöhe ist in den entsprechenden Pumpenkennlinien beschrieben. Bei der Berechnung der Entwässerungsleistung wurden die über den Pumpzeitraum variierenden geodätischen Förderhöhen entsprechend berücksichtigt.

- 3) **kein Entwässerungsbetrieb möglich:** Der dritte Zustand beschreibt die Zeitpunkte in der Tidekurve, in denen der Außenwasserstand so hoch ansteigt, dass die Pumpen aus technischen Gründen nicht mehr eingesetzt werden können. In diesen Zeiträumen ist keine Entwässerung möglich, die Entwässerungsleistung ist gleich null.

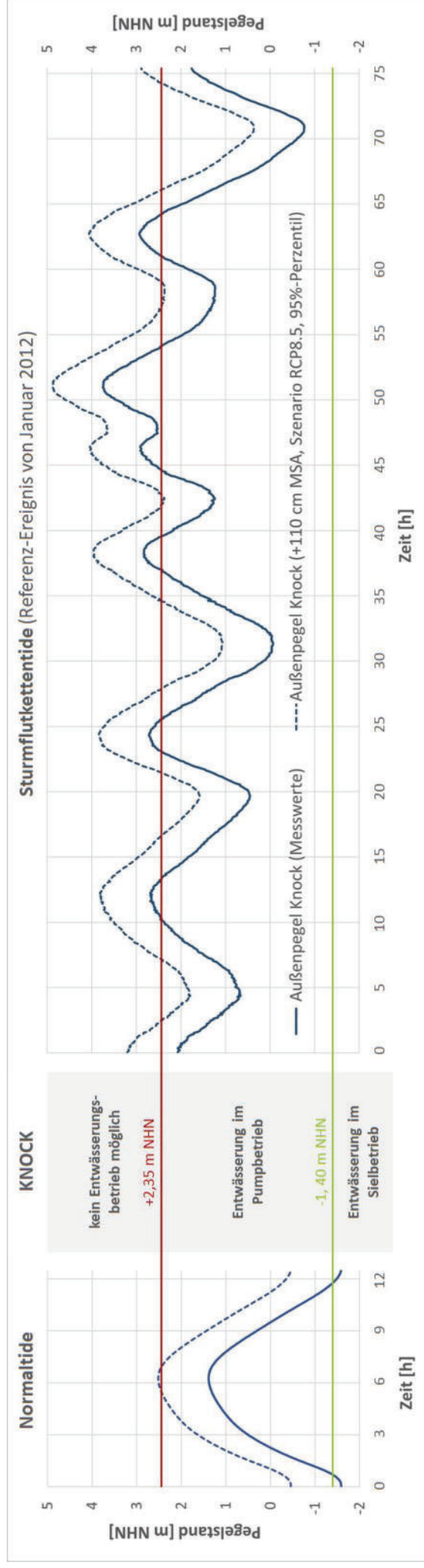


Abb. 18: Entwässerungsmöglichkeiten am Siel- und Schöpfwerk Knock bei Normaltidebedingungen (links) und bei Sturmflutbedingungen (rechts); heute (durchgezogene blaue Linie) und bei einem Meeresspiegelanstieg von 110 cm bis zum Jahr 2100 (blau gestrichelte Linie)

Da die Siel- und Schöpfwerke Leybucht siel und Greetsiel nicht direkt in die Nordsee, sondern in das Speicherbecken Leyhörn entwässern, konnten die zugrunde gelegten Normal- und Kettentidenkurven bei diesen Bauwerken nicht unmittelbar als Eingangsgrößen für die Berechnung verwendet werden. Stattdessen mussten Annahmen zum Wasserstand im Speicherbecken getroffen werden, die aus Messdaten abgeleitet wurden. Für den Fall der Normaltide wurde angenommen, dass der Wasserstand im Becken zwischen den regelmäßigen Sielmöglichkeiten am Sperrwerk Leysiel jeweils moderat ansteigt und dann wieder absinkt. Für den Verlauf der Kettentide reduzieren sich die Sielmöglichkeiten am Leysiel hingegen deutlich. Daher steigt der Wasserstand im Becken wesentlich stärker an und erreicht mit fortschreitendem Meeresspiegelanstieg immer schneller den kritischen Einstaupegel von +1,5 m NHN, der eine Abschaltung der Schöpfwerke Leybucht siel und Greetsiel erforderlich macht (s. hierzu auch Kap. 5.3). Die angenommene Wasserstandsentswicklung im Speicherbecken bei Kettentide wurde aus den Messdaten des Kettentidenereignisses vom Januar 2012 abgeleitet.

In den Diagrammen in Abbildung 19 sind die berechneten Veränderungen der Entwässerungsleistungen der bestehenden Siel- und Schöpfwerke in den vier Verbandsgebieten bei einem Meeresspiegelanstieg von 110 cm bis zum Jahr 2100 (RCP8.5, 95%-Perzentil) dargestellt. In Tabelle 4 sind die Ergebnisse für die Betrachtung unter Normaltidebedingungen und in Tabelle 5 für die Betrachtung unter Sturmflutbedingungen (Referenz-Kettentide) zusammengefasst.

Unter **Normaltidebedingungen** wirkt sich der zugrunde gelegte Meeresspiegelanstieg wenig auf die Entwässerungsleistung der Siel- und Schöpfwerke im Betrachtungsraum aus, da die meisten Pumpen auch bei entsprechend erhöhten Normaltidewasserständen weiterhin in einem guten bis sehr guten Förderleistungsbereich arbeiten könnten. Eine Ausnahme stellt das Siel- und Schöpfwerk

Knock dar, für das bis zum Jahr 2100 ein Leistungsverlust von 25 % ermittelt wurde. Die starke Abnahme liegt darin begründet, dass die dortigen Pumpen bei einem Meeresspiegelanstieg von 110 cm gegen Ende des Jahrhunderts bereits bei einem normalen Tidehochwasser an ihre Betriebsgrenze stoßen und entsprechend gedrosselt bzw. ganz abgeschaltet werden müssten (s. Abb. 18). Bei den anderen Mündungsbauwerken verringert sich die Entwässerungsleistung hingegen kaum bzw. steigt beim Siel- und Schöpfwerk Sautel sogar leicht an. Dies ist damit zu erklären, dass sich die Zeiträume, in denen dort gestielt werden kann, erheblich verkürzen und entsprechend mehr gepumpt werden müsste. Da die Pumpleistung größer ist als die zugrunde gelegte mittlere Sielleistung ergibt sich rechnerisch ein Anstieg der Entwässerungsleistung.

Unter **Sturmflutbedingungen** (Referenz-Kettentide) führt der zugrunde gelegte Meeresspiegelanstieg hingegen bei allen betrachteten Siel- und Schöpfwerken – mit Ausnahme von Sautel – zu einer sehr deutlichen Abnahme der Entwässerungsleistungen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Pumpen über immer längere Zeiträume große Förderhöhen überwinden müssen, in denen sie nur mit geringer Leistung oder gar nicht arbeiten können (s. Darstellung am Beispiel der Knock in Abb. 18). Die besonders starken Leistungsverluste bei den Siel- und Schöpfwerken Leybucht siel und Greetsiel ergeben sich daraus, dass sich das Speicherbecken Leyhörn bei steigenden Sturmfluttidewasserständen zunehmend schneller bis zum maximalen Einstaupegel füllt und die Schöpfwerkspumpen somit für immer längere Zeiträume abgeschaltet werden müssen. Die Sonderstellung des Siel- und Schöpfwerks Sautel ist durch seine Lage im Schutze des Emssperwerkes begründet. Wird eine Sturmflut mit einem Wasserstand höher als +3,5 m NHN erwartet, wird das Sperrwerk geschlossen, was zur Folge hat, dass das Schöpfwerk Sautel auch bei einer Sturmflut durchgehend bei vergleichsweise guten Pumpbedingungen arbeiten kann.

Tab. 4: Veränderung der Entwässerungsleistung der Siel- und Schöpfwerke bezogen auf **Normaltidebedingungen** bei einem Meeresspiegelanstieg von 110 cm bis zum Jahr 2100 (RCP8.5, 95%-Perzentil)

Siel- und Schöpfwerk	heute [m³/s]	2100 [m³/s]	Abnahme [%]
Knock	57,5	43,1	25
Moormerland	41,7	40,1	4
Sautel	34,7	35,7	-
Borssum (ohne Emders Hafen)	20,0	18,2	9
Leybucht siel	45,0	45,0	0
Greetsiel	13,5	13,5	0

Tab. 5: Veränderung der Entwässerungsleistung der Siel- und Schöpfwerke bezogen auf **Sturmflutbedingungen** (Referenz-Kettentide) bei einem Meeresspiegelanstieg von 110 cm bis zum Jahr 2100 (RCP8.5, 95%-Perzentil)

Siel- und Schöpfwerk	heute [m³/s]	2100 [m³/s]	Abnahme [%]
Knock	36,4	14,9	59
Moormerland	34,7	18,8	46
Sautel	34,5	32,1	7
Borssum (ohne Emders Hafen)	17,2	10,3	40
Leybucht siel	41,5	13,4	68
Greetsiel	13,3	4,7	65

3 Auswirkungen von Klimawandel und Meeresspiegelanstieg auf die Entwässerung

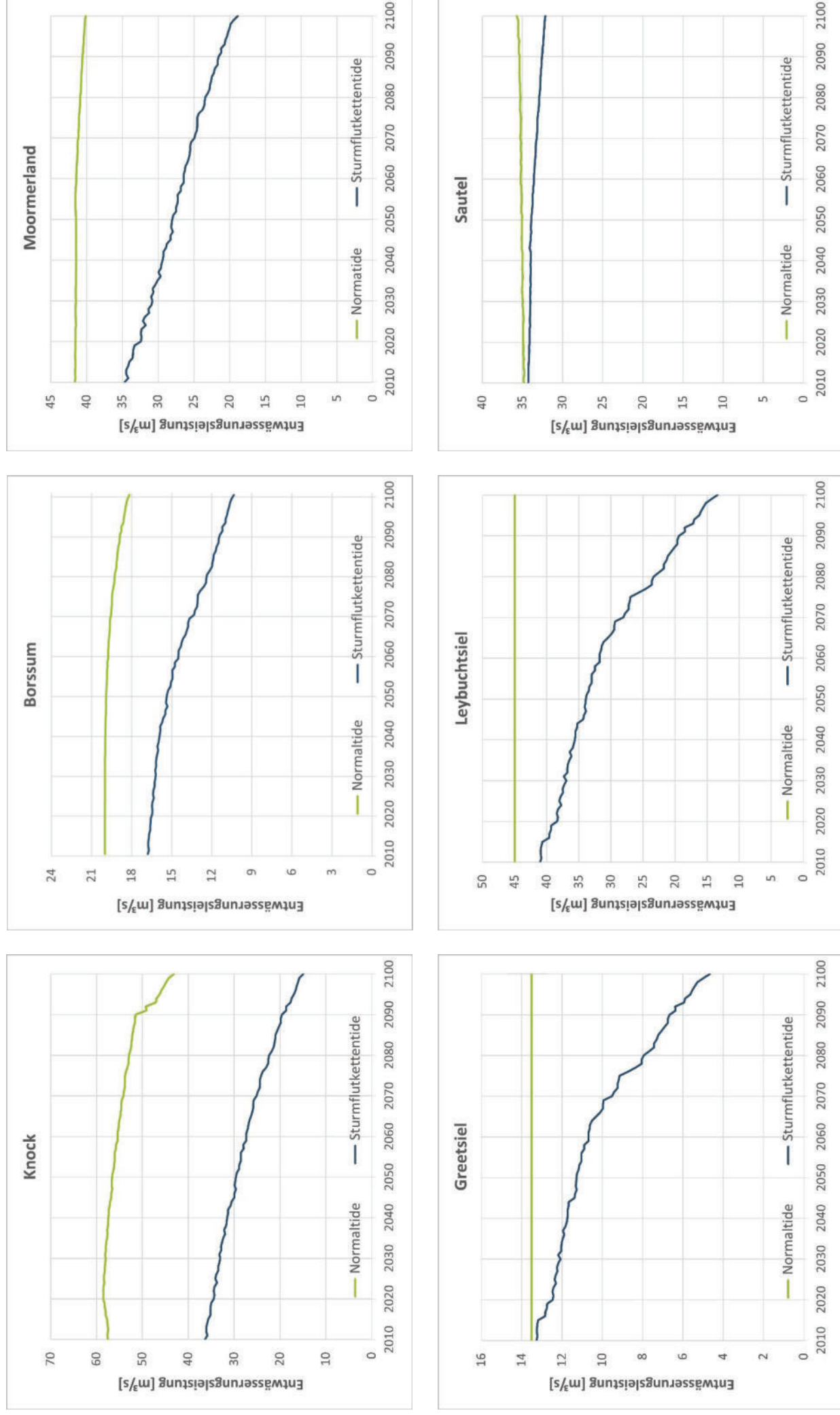


Abb. 19: Veränderungen der Entwässerungsleistungen der Siel- und Schöpfwerke bezogen auf **Normaltidebedingungen** (grüne Linie) und **Sturmflutbedingungen** (Referenz-Kettentide; blaue Linie) bei einem Meeresspiegelanstieg von 110 cm bis zum Jahr 2100 (RCP8.5, 95%-Perzentil)

Klimawandelbedingte Veränderungen der Überlastungshäufigkeiten und -volumina der Entwässerungssysteme der Verbandsgebiete

Wie die Analysen zeigen, beeinflussen verschiedene Klimawandelfolgen die Entwässerungssysteme im Betrachtungsraum. Vermehrte Niederschläge im Winterhalbjahr wirken sich stark auf die Abflussbildung aus. Aufgrund des Meeresspiegelanstiegs verringert sich langfristig (insbesondere bei Kettentiden) die Entwässerungsleistung. Trefen hohe Abflüsse und eine verringerte Entwässerungsleistung zusammen, kommt es zur Überlastung der Entwässerungssysteme, was zu Binnenhochwasser führen kann.

Um die Effekte zu quantifizieren, wurden aufbauend auf den für die Klimaszenarien durchgeführten Abflussimulationen und den Berechnungen zur Entwicklung der Entwässerungsleistungen der Siel- und Schöpfwerke die potenziellen Veränderungen der Überlastungshäufigkeiten und -volumina der Entwässerungssysteme in den vier Verbandsgebieten abgeschätzt. Dabei wurde folgendermaßen vorgegangen:

- 1) Für jeden Zeitschritt (Tag) wurde die für die Klimaszenarien simulierte Abflussbildung im Zeitraum bis zum Jahr 2100 mit der zum jeweiligen Zeitpunkt zur Verfügung stehenden Entwässerungsleistung der Siel- und Schöpfwerke unter Normalidebedingungen (s. Abb. 19) abgeglichen. Lag die Abflussbildung eines Verbandsgebietes über der Entwässerungsleistung der jeweiligen Bauwerke, wurde ein entsprechendes Überlastungsvolumen (Tagesüberschuss) ermittelt.
- 2) Sofern die Abflussbildung auch im nächsten Zeitschritt (Folgetag) die Entwässerungsleistung überstieg, wurde das Überlastungsvolumen kumuliert. Fiel die Abflussbildung hingegen unter die Entwässerungsleistung wurde das Volumen entsprechend reduziert.
- 3) Ein Überlastungsereignis galt dann als beendet, wenn kein (kumuliertes) Überlastungsvolumen mehr vorhanden war.

Abbildung 20 zeigt exemplarisch für den EV Norden die Veränderung der Überlastungshäufigkeiten für die Zeitscheibe 2071-2100 im Vergleich zum Kontrollzeitraum. Die Säulen geben die durchschnittliche Anzahl der Überlastungsereignisse *aller gerechneten Szenarien* an. Die Antennen zeigen das Maximum der Überlastungsereignisse, die innerhalb eines Szenarios aufgetreten sind. Das Maximum der simulierten Überlastungsereignisse pro Szenario liegt sowohl für den Kontrollzeitraum als auch für die Zeitscheibe 2071-2100 bei vier Ereignissen in 30 Jahren. Der Mittelwert über alle betrachteten Szenarien steigt allerdings von 0,83 auf 1,46 Überlastungsereignisse in 30 Jahren an. Das heißt, dass in den Szenarien für das Ende des Jahrhunderts insgesamt mehr Überlastungsereignisse auftreten als im Kontrollzeitraum.

Klassifiziert man die für den EV Norden ermittelten Überlastungsereignisse anhand ihres Volumens, zeigt sich, dass es sich überwiegend um Ereignisse in der Größenordnung 0 bis 2 Mio. m³ handelt (s. Abb. 21). Diese Mengen können noch überwiegend im Gewässersystem des EV Norden aufgenommen werden. Sie führen zwar zu deutlich erhöhten Wasserständen, bei denen sich das Schadenspotenzial allerdings in Grenzen hält. Interessant für Fragestellungen der Klimawandelanpassung sind die Ereignisse, die darüber liegen. Im Kontrollzeitraum sind es 0,23 Ereignisse und in der fernen Zukunft (2071-2100) 0,38 Ereignisse in 30 Jahren. Dies entspricht einer Steigerung um 65 %.

In den Abbildungen 22 und 23 auf Seite 25 sind die für die anderen Verbandsgebiete ermittelten Veränderungen bezüglich der Anzahl der Überlastungsereignisse und der dabei auftretenden Überlastungsvolumina bei **Normalidebedingungen** dargestellt. Auch hier zeigt sich durchgehend, dass es zu häufigeren und größeren Überlastungsereignissen kommen wird. Auffällig ist die vergleichsweise

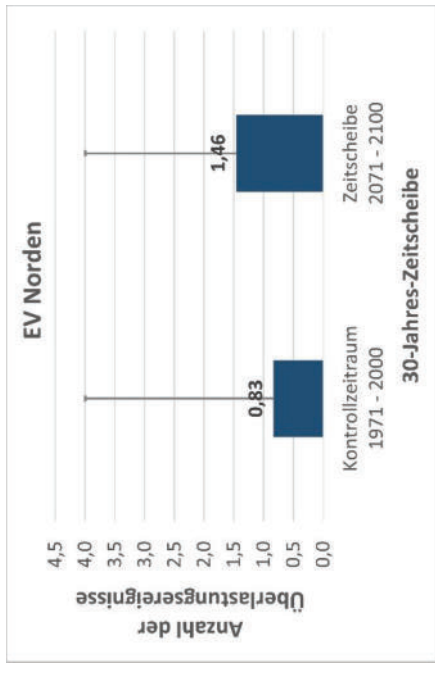


Abb. 20: Klimawandelbedingte Veränderung der **Anzahl der Überlastungsereignisse bei Normalidebedingungen** in der Zeitscheibe 2071-2100 im Vergleich zum Kontrollzeitraum (Säulen: mittlere Anzahl der Überlastungsereignisse *aller gerechneten Szenarien*; Antennen: maximale Anzahl an Überlastungsereignissen, die innerhalb eines Szenarios aufgetreten sind)

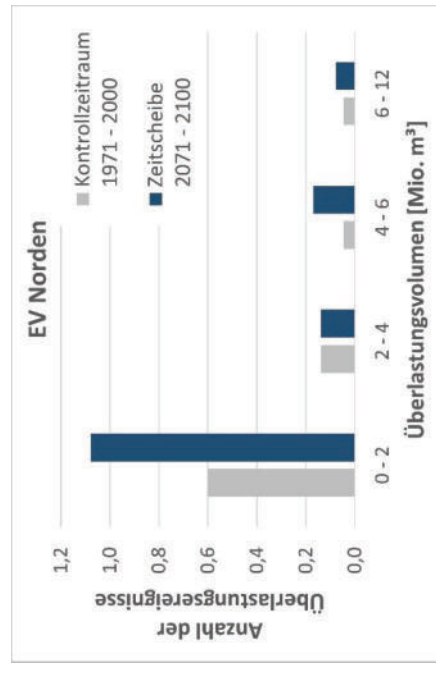


Abb. 21: Klimawandelbedingte Veränderung der **Anzahl der Überlastungsereignisse bei Normalidebedingungen, aufgeteilt nach Überlastungsvolumen**, in der Zeitscheibe 2071-2100 im Vergleich zum Kontrollzeitraum (Säulen: mittlere Anzahl der Überlastungsereignisse *aller gerechneten Szenarien*)

hohe Anzahl an Überlastungsereignissen im Verbandsgebiet des I. EV Emden, die sich durch die tiefe Lage, die vergleichsweise geringe relative Schöpfwerksleistung und den hohen Anteil von Marschböden im Gebiet erklären lässt. Allerdings bewegt sich der überwiegende Teil dieser Überlastungsereignisse im Größenordnungsbereich zwischen 0 und 4 Mio. m³. Solche Überlastungsmengen führen zwar zu deutlich erhöhten Wasserständen, können aber noch relativ schadlos im Gewässersystem des großen Verbandsgebietes zurückgehalten werden. Stärkere Überlastungsereignisse von über 4 Mio. m³, die zu gravierenden Problemen führen, sind entsprechend seltener.

Anhaltspunkte bezüglich der potenziellen Rückhaltevolumina in den Gewässersystemen der betrachteten Verbandsgebiete finden sich in Tabelle 23 in Kapitel 5.7.

Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen auf der einen Seite, dass große Überlastungsereignisse in Zukunft häufiger auftreten werden, aber auf der anderen Seite auch, dass das bestehende Entwässerungssystem unter **Normal-tidebedingungen** einen Großteil der Überlastungsereignisse bewältigen kann.

Treffen hohe winterliche Abflüsse hingegen mit Sturmfluten zusammen, ist von einer deutlich geringeren Entwässerungsleistung der Siel- und Schöpfwerke auszugehen (s. Tab. 5 und Abb. 19), wodurch sich sowohl die Eintrittswahrscheinlichkeiten als auch die Größenordnungen von Überlastungsereignissen erhöhen. Unter der Berücksichtigung von **Sturmflutbedingungen** würden sich daher sowohl die Anzahl der Überlastungsereignisse als auch die jeweiligen Überlastungsvolumina entsprechend erhöhen.

Im Rahmen der Modellierung konnte dies jedoch nicht betrachtet werden, da für die verwendeten Klimaszenarien keine konsistenten Projektionen der Tidewasserstände für die Deutsche Bucht in der dafür erforderlichen hohen zeitlichen Auflösung verfügbar waren.

Aktuell wird in der Klimaforschung anhand der sich verändernden Windverhältnisse untersucht, ob es regional zu häufigeren oder längeren Sturmfluten kommen könnte, die eine zusätzliche Belastung für die Küstenschutz- und Entwässerungssysteme darstellen würden. In dem Zusammenhang werden auch die Wasserstände in der Deutschen Bucht simuliert, was in Zukunft eine gemeinsame Betrachtung von hohen winterlichen Abflüssen und Sturmflutwasserständen als Compound Event (Ereignisbündel) ermöglichen wird.



Foto: EV Oldersum

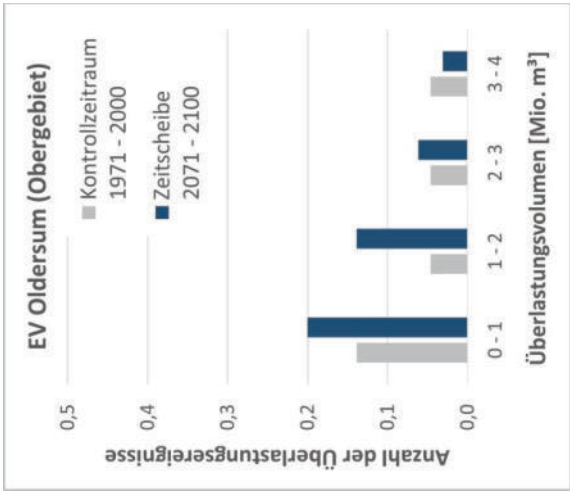
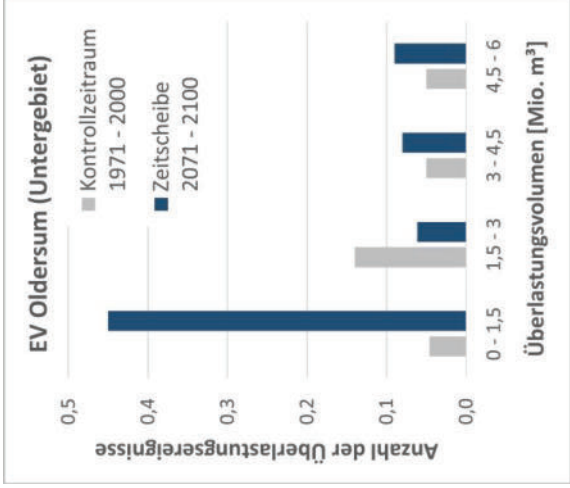
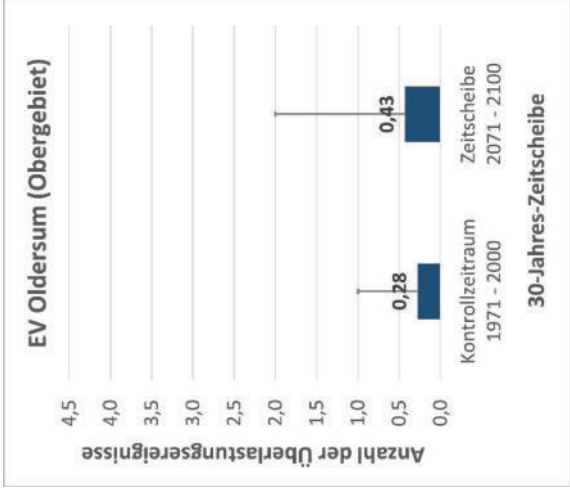
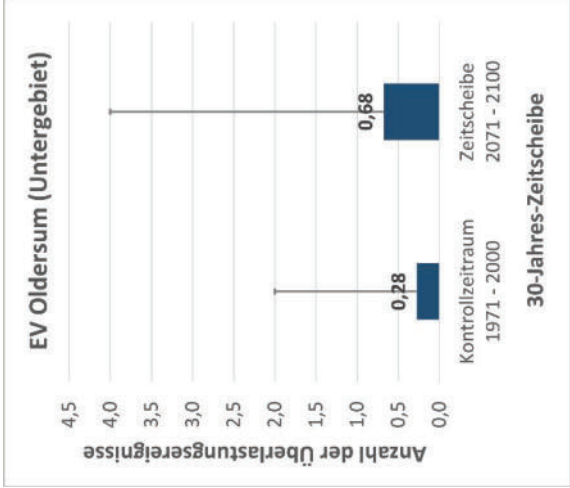
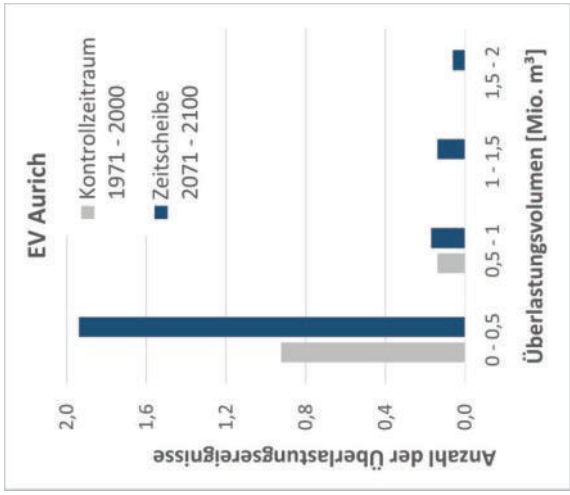
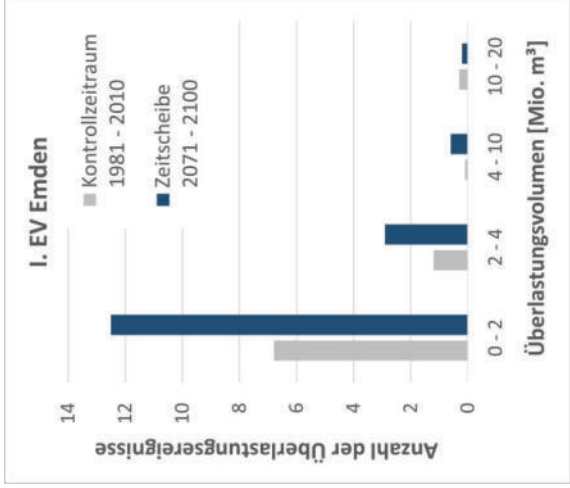
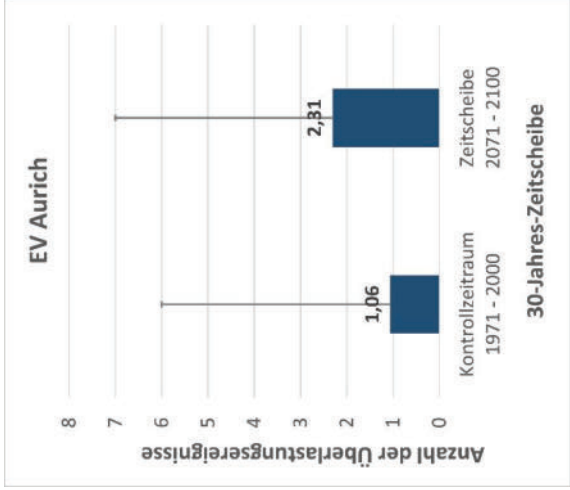
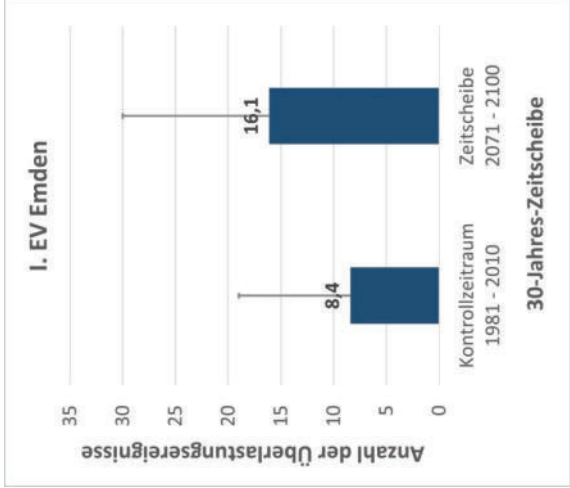


Abb. 22: Klimawandelbedingte Veränderung der **Anzahl der Überlastungsereignisse bei Normal-tidebedingungen** in der Zeitscheibe 2071-2100 im Vergleich zum Kontrollzeitraum (Säulen: mittlere Anzahl der Überlastungsereignisse *aller gerechneten Szenarien*; Antennen: maximale Anzahl an Überlastungsereignissen, die innerhalb eines Szenarios aufgetreten sind)

Abb. 23: Klimawandelbedingte Veränderung der **Anzahl der Überlastungsereignisse bei Normal-tidebedingungen, aufgeteilt nach Überlastungsvolumen**, in der Zeitscheibe 2071-2100 im Vergleich zum Kontrollzeitraum (Säulen: mittlere Anzahl der Überlastungsereignisse *aller gerechneten Szenarien*)

Management von Binnenhochwasserrisiken im Küstenraum

Im Nordseeküstenraum stellen sich seit jeher eine Reihe besonderer Herausforderungen für den Hochwasserschutz und das Wassermanagement. Die Landschaft ist infolge der Sedimentablagerungen durch regelmäßige Überschwemmungen sowie den Einfluss von Sturmfluten entstanden und liegt in großen Teilen nur knapp über dem Meeresspiegel, teilweise auch darunter. Der Bau von Deichen entlang der Nordseeküste, der vor etwa 1000 Jahren begann, brachte für die Menschen zwar einerseits einen deutlich verbesserten Schutz vor Tidehochwassern und Sturmfluten, unterbrach andererseits aber auch den bis dahin existierenden kontinuierlichen Übergang zwischen Land und Meer. Binnendeichs anfallendes Niederschlagswasser konnte fortan nicht mehr auf natürlichem Wege in die Nordsee abfließen, sodass mit der Eindeichung der Küste gleichzeitig eine anthropogen gesteuerte Entwässerung des Deichhinterlandes erforderlich wurde, um neben dem Sturmflutschutz auch den Binnenhochwasserschutz gewährleisten zu können. Seither werden mit Hilfe der historisch gewachsenen und stetig ausgebauten Entwässerungssysteme die Wasserstände in den Binnengewässern künstlich reguliert und überschüssige Niederschlagsmengen durch Siele und Schöpfwerke in die Nordsee abgeführt. Nur so kann die in der Küstenregion entstandene Kulturlandschaft als Siedlungs- und Wirtschaftsraum in der heutigen Form genutzt werden.

Mit dem massiven Ausbau der Entwässerungssysteme im Küstenraum seit den 1950/60er-Jahren sind auch die gesellschaftlichen Erwartungshaltungen an den damit verbundenen Binnenhochwasserschutz kontinuierlich gestie-

gen. Während es bis zur damaligen Zeit noch zur Normalität gehörte, dass Niederungsbereiche in den Wintermonaten großflächig unter Wasser standen, sind derartige Überschwemmungen mit den heutigen Nutzungsansprüchen nicht mehr vereinbar. Die wachsenden Standards in Bezug auf die Binnenentwässerung haben dazu geführt, dass es in den letzten Jahrzehnten auch in tiefliegenden Bereichen der Küstengebiete zu einer zunehmenden Intensivierung der Landwirtschaft und zu einer Ansiedlung von Industrie-, Gewerbe- und Wohnbauflächen gekommen ist. Hierdurch haben sich die Schadenspotenziale in diesen Bereichen – und damit auch die Anforderungen an den Binnenhochwasserschutz – deutlich erhöht.

Binnenhochwassergefahren im Betrachtungsraum

Trotz des erreichten Ausbaus der Entwässerungssysteme im Betrachtungsraum kann kein absoluter Schutz vor Binnenhochwasser garantiert werden. Bei bestimmten Extremwetterereignissen, bei längerfristigem Stromausfall oder bei technischen Defekten an Siele und Schöpfwerken besteht die grundsätzliche Gefahr, dass die Kapazitätsgrenzen der Entwässerungssysteme überschritten werden bzw. deren Funktionen teilweise oder vollständig ausfallen. Dies kann zur Folge haben, dass die Wasserstände in den Binnengewässern deutlich über die festgelegten Sollpegel hinaus ansteigen und es in Teilgebieten zu Hochwasser- und Überschwemmungssituationen kommt, die zu Schäden an Gebäuden, Infrastrukturen und landwirtschaftlich genutzten Flächen führen können. Wie Abbildung 24 veranschaulicht, kann hinsichtlich der poten-

ziellen Entstehungsursachen von Binnenhochwasserrisiken im Betrachtungsraum zwischen verschiedenen wetter- und systembedingten Faktoren unterschieden werden, die sich bei gleichzeitigem Auftreten in ihrer Wirkung jeweils überlagern und verstärken können.

wetterbedingte Entstehungsursachen

Eine Extremwetterkonstellation, bei der die Binnenentwässerung im Betrachtungsraum wiederkehrend an ihre Kapazitätsgrenzen stößt, besteht aus dem Zusammentreffen von

- **ergiebigem Winterniederschlägen**, die auf bereits wassergesättigte Böden fallen und innerhalb kurzer Zeit besonders hohe Abflussmengen hervorrufen, mit
- **langanhaltend starken Westwindlagen**, die zu reduzierten Entwässerungsleistungen der Mündungsbauwerke aufgrund hoher Außenwasserstände (Sturmflutkettenide) sowie zu Rückstauwirkungen in den Vorflutgewässern aufgrund von Windstau führen.

In solchen Situationen trifft ein erhöhter Entwässerungsbedarf auf eine eingeschränkte Entwässerungskapazität, was zur Folge hat, dass die Binnenwasserstände trotz Dauerbetriebs der Schöpfwerkspumpen ansteigen und mitunter kritische Marken erreichen können. So geschehen zuletzt während der niederschlagsreichen Sturmflutserie (Ylenia, Zeynep und Antonia) vom 16.-21. Februar 2022, als die Wassermassen der ergiebigen Niederschläge (>50 mm in 3 Tagen) aufgrund der hohen Außenwasserstände nur eingeschränkt abgeführt werden konnten, sodass es in den Niederungsbereichen vielerorts zu Überschwemmungen