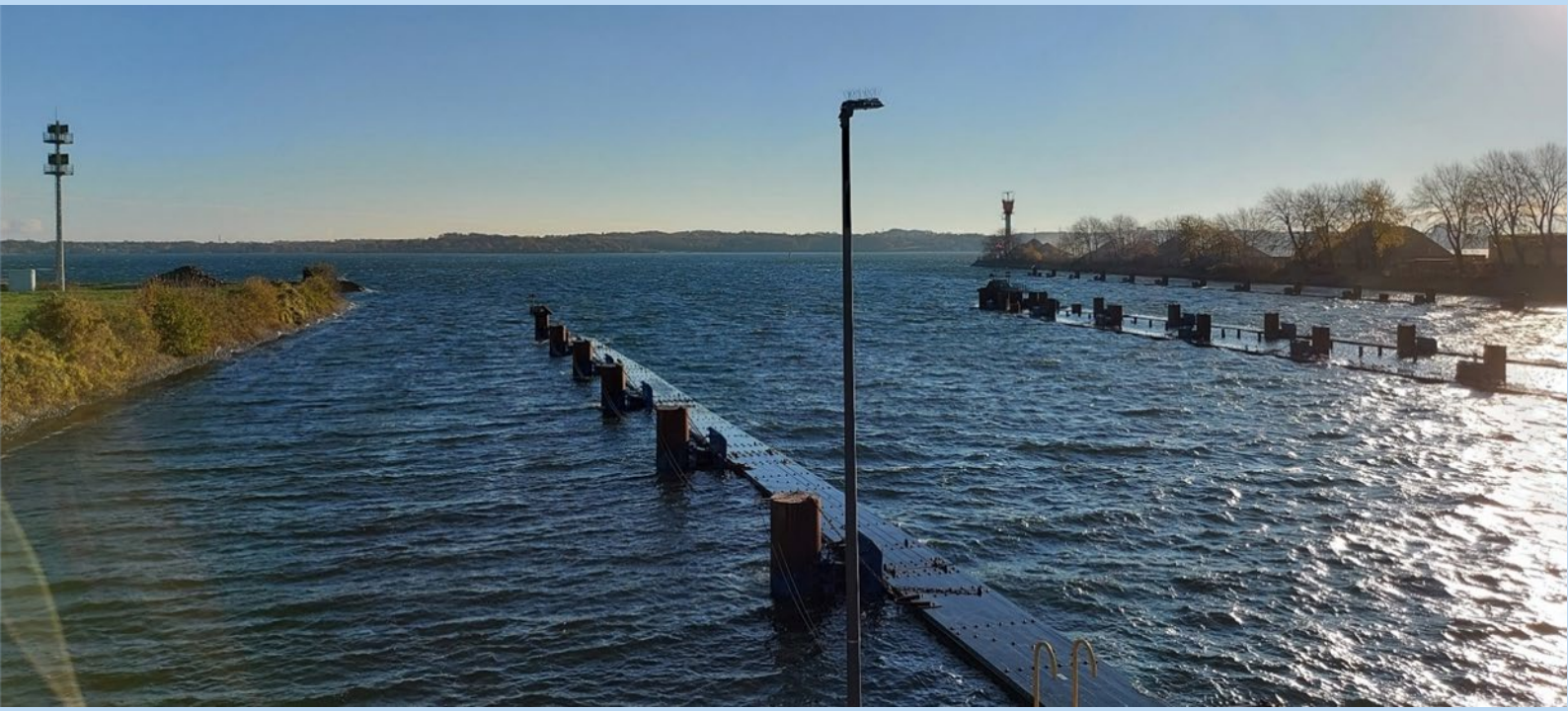
Bericht

NOK Phase 2 „Wasserbewirtschaftung, Gewässerkunde, Ökologie“

Abschlussbericht

BfG-2236



Bericht

NOK Phase 2 „Wasserbewirtschaftung, Gewässerkunde, Ökologie“

Abschlussbericht

Kurztitel	NOK 2 – Wasserbewirtschaftung, Gewässerkunde, Ökologie
Autoren /-innen	Dr. Ebner von Eschenbach, Anna; Dr. Bergfeld-Wiedemann, Tanja; Dr. Becker, Annette; Dr. Fuchs, Elmar; Dr. Hein, Hartmut; Hohenrainer, Jochen; Krahe, Peter; Meißner, Dennis; Dr. Promny, Markus; Neumann, Dominic; Dr. Radny, Dirk; Dr. Scheufen, Tim; von Landwüst, Christian; Dr. Worischka, Susanne **Bundesanstalt für Gewässerkunde**
Auftraggeber	Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt Kiellinie 247 24106 Kiel Telefon 0228 70-900 Telefax 0228 70-909010 E-Mail gdws@wsv.bund.de Internet www.gdws.wsv.bund.de
Projekt-Nummer	M39610204075
BfG-Nummer	BfG-2236
DOI	10.5675/BfG-2236

Impressum

Herausgeber

Bundesanstalt für Gewässerkunde
Am Mainzer Tor
56068 Koblenz

Telefon +49 261 1306-0
Telefax +49 261 1306-5302

E-Mail posteingang@bafg.de
Internet www.bafg.de

Zitiervorschlag

EBNER VON ESCHENBACH, A., BERGFELD-WIEDEMANN, T., BECKER, A., FUCHS, E., HEIN, H., HOHENRAINER, J., P., MEISSNER, D., NEUMANN, D., PROMNY, M., RADNY, D., SCHEUFEN, T., VON LAND-WÜST, C., WORISCHKA, S. (2026): NOK Phase 2 - Wasserbewirtschaftung, Gewässerkunde, Ökologie. Abschlussbericht. Bundesanstalt für Gewässerkunde. Koblenz. 141 Seiten.

Bildnachweis Titelseite Dominic Neumann, Schleuse Kiel-Holtenau, 18.11.2022

Inhaltsverzeichnis

Impressum ... **4**

Inhaltsverzeichnis ... **5**

Zusammenfassung ... **8**

Summary ... **15**

Einleitung ... **21**

1 Wasserbewirtschaftung des NOK unter Berücksichtigung des Klimawandels ... **23**

1.1 Charakteristik des Systems ... **23**

1.1.1 Kanal: kritische Bewirtschaftungssituationen ... 26
1.1.2 Einzugsgebiet: Klima- und Wasserhaushaltsgrößen ... 30

1.2 Modellinstrumentarium ... **34**

1.2.1 Kanal: BEWASYS NOK ... 34
1.2.2 Kanal: SOBEK NOK ... 34
1.2.3 Einzugsgebiet: HydPy NOK ... 34

1.3 Modellkalibrierung / Modellvalidierung / Modellplausibilisierung ... **35**

1.3.1 Modellkalibrierung / Validierung: HydPy L- NOK ... 35
1.3.2 Modellvalidierung: BEWASYS NOK, SOBEK NOK ... 40

1.4 Bewirtschaftung des NOK unter Klimawandel ... **46**

1.4.1 Methodik ... 46
1.4.2 Ergebnis: Zufluss aus dem Einzugsgebiet ... 47
1.4.3 Ergebnis: Kritische Bewirtschaftungssituationen im Kanal in der Zukunft ... 51
1.4.4 Pumpbetrieb als Beispiel für eine Anpassungsmaßnahme ... 53

1.5 Resilienzmanagement ... **59**
1.6 Literatur ... **60**

2 Soll-Konzept „Gewässerkundliche Parameter“ ... **62**

2.1 Meer + Salz ... **62**

2.1.1 Hintergrund ... 62
2.1.2 Klimatische Entwicklung der Salzgehalte in der Kieler Förde und in der Elbemündung ... 63
2.1.3 Entwicklung der Salinität im NOK 1895 bis 2023 ... 65
2.1.4 Zukünftige Entwicklung zur Salinität in Kieler Förde und Elbmündung ... 68
2.1.5 Literatur ... 69

2.2 Gewässergüte + Salz ... **70**

2.2.1 Hintergrund ... 70
2.2.2 Darstellung des Ist-Zustands der Gewässergüte ... 70
2.2.3 Zukünftige Entwicklung der Gewässergüte ... 76
2.2.4 Literatur ... 76

2.3 Kanal + Salz ... 77

2.3.1 Hintergrund ... 77
2.3.2 Vorgehen ... 77
2.3.3 Ergebnisse zur Abbildung der Salzverteilung im NOK im Modell ... 78
2.3.4 Einflüsse auf die Salzverteilung im NOK ... 79
2.3.5 Quantifizierung des Einflusses der Verbreiterung und Vertiefung auf die Salzverteilung ... 81
2.3.6 Quantifizierung des Einflusses des Meeresspiegelanstieges auf die Salzverteilung ... 81
2.3.7 Literatur ... 82

2.4 Boden-Vegetation + Salz ... 83

2.4.1 Hintergrund ... 83
2.4.2 Methodik ... 84
2.4.3 Beispiele der Interaktion zwischen NOK und Grundwasser ... 85
2.4.4 Salinare Beeinflussung des Bodens durch den NOK ... 87
2.4.5 Salinare Beeinflussung der uferbegleitenden Vegetation durch den NOK ... 87
2.4.6 Synopse ... 87
2.4.7 Empfehlung ... 90
2.4.8 Literatur ... 90

2.5 Makrozoobenthos + Salz ... 90

2.5.1 Hintergrund und Methodik ... 90
2.5.2 Istzustand ... 92
2.5.3 Zukünftige Entwicklung ... 92
2.5.4 Literatur ... 93

2.6 Fische + Salz ... 94

2.6.1 Einleitung und Methoden ... 94
2.6.2 Ist-Zustands-Beschreibung ... 94
2.6.3 Zukünftige Entwicklung ... 98
2.6.4 Synopse ... 99
2.6.5 Literatur ... 100

2.7 Avifauna + Salz ... 103

2.7.1 Einleitung und Methoden für den Ist-Zustand ... 103
2.7.2 Untersuchungsgebiet ... 104
2.7.3 Verbreitung der Brutvögel ... 105
2.7.4 Zukünftige Entwicklung ... 108
2.7.5 Literatur ... 108

2.8 Eis + Salz ... 110

2.8.1 Datengrundlagen und Vorgehensweise ... 110
2.8.2 Rückblick: Auswertung historischer Eisdaten ... 111
2.8.3 Zukünftige Entwicklung. Analyse von Klimaprojektionen ... 113
2.8.4 Fazit 115
2.8.5 Literatur ... 115

3 Operationelle Kurzfrist-Wasserstandsvorhersage ... 117

4 Ausblick ... 122

Abbildungsverzeichnis ... 123

Tabellenverzeichnis **127**

Anhang **129**

Zusammenfassung

Die Arbeiten zum Nord-Ostsee-Kanal begannen in der BfG, beauftragt durch die GDWS, vor mehr als zehn Jahren mit einer konzeptionellen Vorstudie zur Einzugsgebietscharakteristik und zu den Steuerungsgrundlagen des Kanals. Es schloss sich bis 2020 die erste Projektphase (NOK Phase 1) an, in der der Schwerpunkt der Arbeiten auf den modellgestützten Untersuchungen zur Wasserbewirtschaftung unter Klimawandel und Vorhersage für die Steuerung des erforderlichen Betriebswasserstands für die Seeschifffahrt und die Anlagen der WSV am NOK (z.B. Fährstellen) stand. Abgeschlossen wurde die erste Projektphase mit dem Abschlussbericht BfG-2009 von Juli 2020.

Es folgte im fast nahtlosen Anschluss die zweite Phase (NOK Phase 2), die sich weiterhin, nun vertiefend, mit den Schwerpunkten Wasserbewirtschaftung unter Klimawandel und der Vorhersage befasste, aber erweitert wurde um Fragen zu messdaten- und modellgestützten Untersuchungen zur Salzintrusion und Verteilung der Salinität im Kanal in der Gegenwart (mit Annahme unterschiedlicher Szenarien) und in der Zukunft (mit Berücksichtigung von klimawandelbedingten Änderungen) sowie den Auswirkungen einer veränderten Salzverteilung auf die Eisbildung, die Gewässergüte, Vegetation / Boden (einschließlich Grundwasser), Makrozoobenthos, Avifauna und Fischwanderung. Diese Phase wird mit dem vorliegenden Bericht BfG-2236 abgeschlossen; die Arbeitsschwerpunkte sind nachfolgend zusammengefasst. Parallel zum detaillierten Abschlussbericht wird unter gleicher Berichtsnummer eine gestraffte Synthese erstellt (BfG-2236-Synthese, 2026)

Wasserbewirtschaftung

Ziel des Arbeitspaketes zur Wasserbewirtschaftung sind vertiefende und weiterführende Untersuchungen der Bewirtschaftung des NOK unter veränderten klimatischen Verhältnissen. Ursprünglich geplant waren auch Untersuchungen zu den Auswirkungen von betrieblichen und baulichen Veränderungen auf die Wasserbewirtschaftung wie z.B. der Verbreiterung des NOK im Bereich der Oststrecke; diese erfolgten in Phase 2 ressourcenbedingt beschränkt nur im Hinblick auf die Salzverteilung im Kanal (siehe daher Kapitel 2.3).

In einem ersten Schritt wurden in diesem Themenschwerpunkt – in Fortschreibung der Erkenntnisse aus dem Bericht BfG-2009 (BfG, 2020) – kritische Bewirtschaftungssituationen im Kanal ab November 2012 bis Oktober 2024 anhand von Beobachtungsdaten ausgewertet. Es wurden in diesem Zeitraum acht weitere Ereignisse mit einer Überschreitung des Wasserstandes von 5,40 m PNP identifiziert: Dezember 2014 und Januar 2015, Oktober 2017, Januar 2018, Anfang Februar 2022, Mitte Februar 2022, Januar und Februar 2024. Es handelt sich ausnahmslos um Winterereignisse, die zumeist aus einer zeitgleichen Kombination einer reduzierten Entwässerungsmöglichkeit in Brunsbüttel und Kiel-Holtenau (bedingt durch höhere Außenwasserstände) mit einem erhöhten Zufluss zum Kanal aus dem Einzugsgebiet resultieren.

Es wurde ergänzend – im Sinne eines fachlichen Fundaments – eine Analyse von Klima- und Wasserhaushaltsgrößen durchgeführt: Die Analyse der räumlichen Verteilung der vieljährig gemittelten Größen Niederschlag, Lufttemperatur und Sonnenscheindauer zeigt einen schwach ausgeprägten klimatischen Gradienten, der – aufgrund der topographischen Struktur des Gebietes – einen West-Ost-Verlauf aufweist.

Die vieljährige mittlere Niederschlagshöhe im Gebiet liegt bei ca. 910 mm und verteilt sich zu ca. 500 mm auf die reale Verdunstung und 410 mm auf den Abfluss. Bemerkenswert ist, dass die reale Verdunstung im Gebiet aufgrund der verstärkenden Wirkung von einer hohen Wasserverfügbarkeit und hoher Anteile an landwirtschaftlichen Flächen fast in der gleichen Größenordnung.

Für die Betrachtungen der Wasserverfügbarkeit im Einzugsgebiet auf zeitlich und räumlich feinerer Skala stand zu Beginn der Projektphase ein Modellinstrumentarium zur Verfügung, welches aufgrund einer nicht zufriedenstellenden Abbildung der Interaktion von Grund- und Oberflächenwasser und der für die Vorhersage zu groben Zeitschrittweite weiterentwickelt wurde. Es liegt nun (in Hinblick auf die Abbildung von hydrologischen Tieflandprozessen) ein verbessertes, einsatzbereites, validiertes und kalibriertes Wasserhaushaltsmodell HydPy-L-NOK (im Stunden- und Tageszeitschritt) für das Einzugsgebiet vor. Die bestehenden (Kanal)-Modelle BEWASYS NOK und SOBEK NOK für die Simulation von Kanalwasserständen und Entwässerungswassermengen wurden gepflegt, fortgeschrieben, für einen verlängerten Simulationszeitraum noch einmal geprüft und sind (nach wie vor) praxistauglich und einsatzbereit.

Der mit dem weiterentwickelten Modell HydPy-L-NOK simulierte mittlere Jahreszufluss aus dem Einzugsgebiet zum Kanal über den Zeitraum der Wasserhaushaltsjahre von 2012 bis 2023 beträgt ca. 17 m³/s, mit einer Spannweite von 11 m³/s (Minimum der Jahreswerte) bis 23 m³/s (Maximum der Jahreswerte).

Mit dem weiterentwickelten Wasserhaushaltsmodell wurde anschließend auch der Zufluss zum NOK – unter Annahme der einzig verfügbaren Klimaprojektion RCP85_EUR-11_MPI-ESM-LR_rcp85_r1i1p1_REMO2009-HBM für die Binnenhydrologie und die Wasserstände für Nord- und Ostsee – als Randbedingung für das Kanalmodell BEWASYS NOK – simuliert. Dabei wurden jeweils für die Referenz (1972-1999), für die nahe Zukunft (2032-2059) und für die ferne Zukunft (2072-2099) die Anzahl der Tage pro Jahr, in denen der kritische Wasserstand im NOK von über 5,40 m PNP überschritten wurde, ermittelt und vergleichend zu den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse aus der NOK Phase 1 diskutiert: Im Vergleich zur Referenz von 0,1 Tagen steigt die Anzahl der kritischen Ereignisse in der nahen Zukunft auf im Mittel 1,7 Tage und in der fernen Zukunft im Mittel auf 31 Tage. Im Vergleich zu den Ergebnissen der Sensitivitätsuntersuchungen in NOK Phase 1 erhöht sich die mittlere Anzahl an kritischen Ereignissen (für 30 cm Anstieg) von 0,5 Tage auf 1,7 Tage in der nahen Zukunft und von 15 Tage auf 31 Tage in der fernen Zukunft (für 80 bzw. 85 cm Anstieg). Diese Unterschiede sind erklärbar, da bei der Sensitivitätsanalyse mittlere Änderungssignale für die Binnenhydrologie verwendet wurden, die den meteorlogischen Beobachtungsdaten aufgeprägt wurden und die gemessenen Wasserstandsdaten der Unterelbe und Ostsee um verschiedene Beträge erhöht wurden. Ein physikalischer Zusammenhang zwischen dem veränderten Binnenzufluss zum NOK und den Außenwasserstandserhöhungen existierte nicht. Die Klimafolgenuntersuchungen stützen sich – und das ist der große Mehrwert im Gegensatz zur Sensitivitätsuntersuchung in Phase 1 – auf physikalisch konsistente Annahmen zur zukünftigen Wasserverfügbarkeit im Einzugsgebiet und zum Meeresspiegelanstieg von Nord- und Ostsee. Es liegt jedoch nur eine einzige Klimaprojektion vor, die diese drei Aspekte abdeckt. Bei der Interpretation der Ergebnisse muss daher beachtet werden, dass eine Klimaprojektion nur eine einzige Realisation einer möglichen Zukunft ist, und damit naturgemäß größere Unsicherheiten bei den Ergebnissen mit sich bringt, als bei Einbeziehung eines Ensembles von Projektionen möglicher Zukünfte.

Es wurde ein Pumpwerk mit unterschiedlichen drei unterschiedlichen Kapazitäten von 25 m³/s, 50 m³/s und 100 m³/s zur Unterstützung der Entwässerung des NOK im Freigefälle wurde als Anpassungsoption simuliert, um der sich bei steigendem Meeresspiegel abzeichnenden Verringerung der

Entwässerungsfenster und der damit einhergehenden Zunahme der kritischen Kanalwasserstände entgegenzuwirken. Der Anstieg der Überschreitungstage von 5,40 m PNP (kritisches Ereignis in der Kanalbewirtschaftung) von nahezu null in der Referenz auf ca. 31 Tage in der fernen Zukunft halbiert sich durch einen Pumpeneinsatz von 25 m³/s auf ca. 15 Tage, reduziert sich um ca. 84 % bei 50 m³/s auf 5,3 Tage und geht bei 100 m³/s auf 0,1 Tage pro Jahr (und somit fast auf das Niveau der Referenz) zurück.

Mit allen drei Varianten der Pumpkapazität wird in der nahen Zukunft an durchschnittlich 6 Tagen pro Jahr gepumpt. In der fernen Zukunft beträgt die mittlere Anzahl der Tage mit Pumpeneinsatz 57 (bei einer Kapazität von 50 m³/s oder 100 m³/s). Bei einer Pumpleistung von 25 m³/s verteilt sich die Pumpwassermenge teilweise auf weitere Tage, so dass hier an durchschnittlich 59 Tagen pro Jahr gepumpt wird.

Die aufzubringende Hubarbeit für den Pumpeneinsatz hängt neben der Pumpkapazität maßgeblich vom Standort bzw. der zu überwindenden Höhendifferenz zwischen den Binnen- und Außenwasserständen ab. In der nahen Zukunft variierte die Hubarbeit in der Standortvariante Brunsbüttel zwischen 10 869 kWh pro Jahr (Pumpkapazität 25 m³/s) und 25 743 kWh pro Jahr (Pumpkapazität 100 m³/s), In der Standortvariante Kiel-Holtenau liegt die Hubarbeit zwischen 3 431 kWh pro Jahr (Pumpkapazität 25 m³/s) und 7 891 kWh pro Jahr (Pumpkapazität 100 m³/s). In der fernen Zukunft ist die Hubarbeit deutlich höher als in der nahen Zukunft. In der Standortvariante Brunsbüttel liegt diese zwischen 226 511 kWh pro Jahr (Pumpkapazität 25 m³/s) und 479 601 kWh pro Jahr (Pumpkapazität 100 m³/s), in der Standortvariante Kiel-Holtenau zwischen 96 283 kWh pro Jahr (Pumpkapazität 25 m³/s) und 204 571 kWh pro Jahr (Pumpkapazität 100 m³/s).

Zusätzlich zu den Untersuchungen zur Wasserbewirtschaftung des NOK unter Klimawandel mit der Idee eines Pumpwerks als Anpassungsoption erfolgten Untersuchungen zum Resilienzmanagement. Hier wurde ein für den Verkehrsträger „Straße“ entwickeltes Resilienzmanagementkonzept erfolgreich auf den Verkehrsträger „Wasserstraße“ mit vereinzelten Konzeptanpassungen übertragen. Das Konzept wurde anhand zweier Ereignisse am Nord-Ostsee-Kanal (NOK) erprobt und deren netzbezogene negative Wirkungen, d.h. die Einschränkungen der Funktionalitäten (insb. Schifffahrt im Längsverkehr) monetarisiert. Für Fallstudie 1 „Hochwasser“ ergaben sich tägliche Kosten in Höhe von bis zu 340.000 EUR; für Fallstudie 2 „Schiffsanprall“ betragen die täglichen Kosten bis zu 269.000 EUR.

Durch resilienzfördernde Maßnahmen können die negativen Wirkungen bzw. die damit verbundenen funktionalen Einschränkungen erheblich reduziert werden.

Soll-Konzept „Gewässerkundliche Parameter“

Meer + Salz

Der Salzgehalt im Nord-Ostsee-Kanal (NOK) wird seit 1895 gemessen und durch Salzwassereinträge bei Schleusungsvorgängen sowie Süßwasserzuflüsse aus dem Einzugsgebiet bestimmt. Die Bewirtschaftung des Kanals hat sich von einem ursprünglich (bei Inbetriebnahme des Kanals) offenen System mit einer Entwässerung über Brunsbüttel zu einem geschlossenen System mit Entwässerung über beide Schleusenstandorte Brunsbüttel und Kiel-Holtenau entwickelt. Dies führte zu einer Veränderung des Salzgehaltsprofils von einem linearen Gradienten zu einem sattelförmigen Verlauf mit einem Minimum zwischen NOK-km 20 und 40. Hochauflösende Dauermessungen seit 2021 zeigen deutliche saisonale Schwankungen und eine starke Abhängigkeit von Bewirtschaftungsmaßnahmen und klimatischen Faktoren. Für die Zukunft wird aufgrund des Meeresspiegelanstiegs und veränderter Abflussverhältnisse eine Zunahme des Salzgehalts in der Elbmündung um etwa 2 PSU erwartet.

Aufgrund der sehr großen Unsicherheiten in den Abschätzungen, den gegeneinander wirkenden Prozessen und der Tatsache, dass sich die Oberflächensalinität in der Kieler Förde in der Vergangenheit kaum verändert hat, ist es gegeben, für praktische Abschätzungen zunächst keine Änderung der Salzgehalte in der Ostsee und Tideelbe anzunehmen.

Gewässergüte + Salz

Die Untersuchungen zeigen, dass der Salzgehalt bzw. die Salzverteilung die Größen der Gewässergüte nur begrenzt prägen. Die Wassertemperatur hingegen ist ein prägender Faktor für den Sauerstoff- und Nährstoffhaushalt und das Planktonwachstum. Kühleres Wasser gelangt aus der Kieler Förde in den NOK, es erwärmt sich – durch den Wettereinfluss und den südlichen Zustrom aus dem Eidereinzugsgebiet – entlang des NOK mit seiner Hauptfließrichtung Richtung Westen. Dabei lag nach unseren 18 Beprobungsterminen 2021-2023 an den sechs Probestellen (km 2, km 7,3, km 43, km 62,5, km 80, km 92) keine Temperaturschichtung vor.

Die Erhöhung der Nährstoffgehalte an Stickstoff und Phosphor entlang des NOK ist nicht vom Salzgehalt abhängig, sondern von der Hauptfließrichtung im Kanal und dem Eintrag aus dem Einzugsgebiet. Da eine zukünftige Bewirtschaftung der landwirtschaftlichen Flächen nur schwer abzuschätzen ist, wird davon ausgegangen, dass sich die Nährstoffgehalte im NOK nicht verändern.

Die Phyto- und Zooplanktonentwicklung ist ebenfalls unabhängig vom Salzgehalt. Der Chlorophyll a (Chla)-Gehalt als Maß für die vorhandene Algenbiomasse in einem Gewässer nahm von Ost bis zur Kanalmitte (km 63 und 43) zu, weiter westlich wurden niedrigere Algengehalte gemessen. Die Probestelle km 43 entspricht einem guten eutrophen Zustand (Mischke et al. 2022). Die Frühjahrsblüte war von Kieselalgen dominiert, im Spätsommer waren Cyanobakterien dominant. Ein Zusammenhang des untersuchten Zooplanktons zur gemessenen Phytoplanktonentwicklung ist nicht abzuleiten, was darauf hindeutet, dass Phytoplankton nicht die bevorzugte Nahrungsquelle war. Das größte Frischgewicht wurde im September 2022 und 2023 im östlichen Teil gefunden, zu den anderen Probeterminen wurden relativ geringe Zooplanktondichten gemessen. Die Gruppe der Copepoden (Kopffüßer) dominierte die Zooplanktonzusammensetzung durchgängig im westlichen Teil und zeitweise im östlichen.

Der Sauerstoffgehalt schwankte an den 18 Beprobungsterminen und den sechs Probestellen (km 2, km 7,3, km 43, km 62,5, km 80, km 92) tiefengemittelt zwischen 6,0 und 15,5 mg O_2/L, die entsprechende Sauerstoffsättigung schwankte zwischen 71,6 und 137,8 % O_2. In der Regel lagen die niedrigsten Sauerstoffgehalte am westlichen Ende vor, aber zeigten im Messzeitraum keine kritischen Werte. Kontinuierliche Sondenmessungen der BfG in der Schleusenanlage Kiel-Holtenau 2024 bei km 97 zeigten aber kritische Sauerstoffgehalte auf der Binnen- und insbesondere auf der Förderseite. Hier zeigte sich die Sauerstoffbelastung der Kieler Förde bei Wassertemperaturen über 16 °C und unabhängig vom Salzgehalt. Entsprechend wird ein verstärkter Einstrom von Ostseewasser in den NOK kleinräumig den Sauerstoffhaushalt belasten. Die messtechnische Begleitung insbesondere von Wassertemperatur und Sauerstoff, aber auch von Chlorophyll a an den Standorten Kiel-Holtenau und Breiholz erfolgt in der nächsten Projektphase Zukunft NOK mit Multiparametersonden, um mögliche Veränderungen mit diesmal kontinuierlichen Messungen zu erfassen.

Kanal + Salz

Die ca. 20.000 Schleusungsvorgänge pro Jahr stellen die Quelle für die vorhandene Salzkonzentration im NOK dar. Die Verteilung des Salzgehaltes im NOK wird von 3D-Phänomenen beeinflusst. Um die Auswirkungen der geplanten und bereits begonnenen Maßnahmen zum Ausbau der Oststrecke sowie einer möglichen Kanalvertiefung auf den Salzgehalt zu untersuchen, wurden 3D hydrodynamische numerische Modelle von drei baulichen Situationen (Referenz, nach Ausbau der Oststrecke, nach zusätzlicher Kanalvertiefung) erstellt. Die Modelle wurde an vorhandenen Messdaten kalibriert

und erlauben erstmals eine vereinfachte modelltechnische Abbildung der Vorgänge, die den Salzhaushalt des NOK beeinflussen.

Es wurde gezeigt, dass die Zuflüsse von Süßwasser entlang des Kanals sowie die Verteilung der Entwässerung auf die Standorte Brunsbüttel und Kiel Holtenau erheblichen Einfluss auf die Salzverteilung im Längsschnitt haben. Ebenfalls konnte gezeigt werden, dass der Wind, insbesondere die Windrichtung bei Sturm einen spürbaren Einfluss auf die Intrusion von Salz sowie Salzverteilung im Kanal haben.
Sowohl infolge der Verbreiterung (Ausbau der Oststrecke) als auch infolge der geplanten Kanalvertiefung von 11 auf 12 m kommt es zu Änderungen der Salzverteilung im NOK (um ca. 0,5 PSU bzw. bis zu ca. 2 PSU).

Ebenfalls wurden Simulationen durchgeführt, in denen von Meeresspiegellagen ausgegangen wird, die um 1 m über dem heutigen Niveau erhöht sind. Die Salzgehalte entlang des NOK sind in allen Szenarien mit Meeresspiegelanstieg erhöht, wobei lokal bis zu ca. 5 PSU Differenz auftreten.

Boden-Vegetation + Salz

Zur Klärung des aktuellen Einflusses des NOK auf die umliegenden Kompartimente wurde eine grundlegende Informationssammlung zu aktuellen Salzgehalten im oberflächennahen Grundwasser, im Boden und in der Vegetation des Kanalumfeldes durchgeführt. In der Gesamtschau zeigte sich, dass im Hügelland (etwa NOK-km 65 bis km 98) und der Geest (etwa NOK-km 20 bis km 65) temporär, in der Marsch (NOK-km 0 bis km 20) lokal auch dauerhaft influente Verhältnisse bestehen, also ein Stoffeintrag in das oberflächennahe Grundwasser erfolgen kann. Indikatoren für eine erhöhte Bodensalinität im Kanalumfeld und/oder Halophyten wurden landesweit nicht kartiert. Generell ist der hydraulische Gradient zwischen dem NOK und seiner Umgebung in seiner Höhe durch Änderungen des Wasserspiegels im NOK und andererseits durch die mittel- bis langfristigen landseitigen Grundwasserstände geprägt. Sinken die Grundwasserstände z.B. durch verlängerte trockene Phasen aufgrund des Klimawandels, erhöht sich der Gradient zwischen Grundwasser und NOK, und ein Risiko zum Austrag aus dem NOK in das landseitige Grundwasser wird höher, mit nachfolgenden Effekten auf kanalnahe Böden und die darauf wachsende Vegetation. Insbesondere im mittleren (Geest) und westlichen (Marsch) Streckenverlauf des NOK wäre zur Erhöhung der Aussagekraft in Bezug zur räumlichen und zeitlichen Verteilung eines (temporären) Salztransports vom NOK in Richtung Grundwasser die Errichtung weiterer kanalbegleitender, oberflächennah im Teufenbereich des Wasserkörpers des NOK verfilterter, temporärer Grundwassermessstellen von Vorteil.

Makrozoobenthos + Salz

Für den NOK liegt hinsichtlich des MZB keine Datenbasis aus standardisierten faunistischen Erfassungen vor, sondern aus einmaligen, lokal begrenzten Probenahmen in größeren Zeitabständen. Dennoch lassen sich aus diesen Erfassungen sowohl räumliche als auch zeitliche Muster ableiten. Der im NOK vorliegende Salinitätsgradient von minimal 2–6 PSU (oligohaline Bedingungen, Westteil bis ca. Mitte) bis maximal 9–15 PSU (mesohaline Bedingungen, Schleuse Ostteil Kiel-Holtenau) bewirkt eine teilweise unterschiedliche Besiedlung, da die Arten trotz ihrer hohen Toleranz verschiedene Präferenzen in Bezug auf den Salzgehalt haben.
Im Längsverlauf ändert sich die relative Artenzusammensetzung des MZB: von Brunsbüttel bis etwa Kkm 40 dominieren Brackwasserarten mit einer Präferenz für geringe Salzgehalte oder brackwassertolerante Süßwasserarten. Der Anteil von Neozoen an der Gesamtartenzahl ist in diesem Bereich mit ca. 50 % sehr hoch. Nach Westen zu steigt ab ca. Kkm 50 der relative Anteil von Arten mit Präferenz für etwas höhere Salzgehalte allmählich an, bis die Gemeinschaft der der Ostsee in der Kieler Bucht sehr ähnlich wird. Gleichzeitig nimmt der relative Anteil der gebietsfremden Arten bis auf ca. 10 % ab.

Trotz dieser relativen Unterschiede sind etliche Arten über die ganze Länge des Kanals zu finden. Die Artenzahl nimmt von Ost nach West relativ gleichmäßig ab.
Es lassen sich keine Hinweise auf Veränderungen in der MZB-Besiedlung in der Zukunft wie der gänzliche Wegfall von Arten oder deutliche Verschiebungen in den grundsätzlichen Dominanzmustern ableiten. Die kurzfristigen Schwankungen im Jahres- und Tagesverlauf sind mit ca. 6 PSU in der gleichen Größenordnung oder sogar insgesamt höher als der unter Klimawandel-Bedingungen projizierte Anstieg bis zu 2 PSU und müssen bereits jetzt von den Organismen toleriert werden.

Fische + Salz

Im NOK wurden bisher fast 100 Fisch- und Neunaugenarten nachgewiesen, viele davon allerdings nur als sporadische Zuwanderer aus Kanalzuflüssen, Kieler Förde und Tideelbe. Die regelmäßig vorkommenden Arten sind Süßwasserfische mit hoher Brackwassertoleranz (z. B. Zander) und Brackwasserarten sowie regelmäßig zwischen Süß- und Meerwasser wandernde Arten, die ein sehr breites Spektrum an Salzgehalten tolerieren (z. B. einige Grundelarten, Flunder, Aal). Marine Arten (z. B. Dorsch) sind selten. Eine Ausnahme ist der Ostseehering, der im zeitigen Frühjahr in großen Schwärmen durch die Schleusen Kiel-Holtenau in den NOK vordringt, um in Bereichen mit Salzgehalten von mehr als 5 PSU die Steinschüttungen der Kanalböschungen zur Eiablage aufzusuchen.
Bei zukünftig zunehmenden Salzgehalten werden die Lebensbedingungen für Süßwasserfische in größeren Kanalabschnitten mehr als bisher eingeschränkt. Dies gilt insbesondere für die Reproduktion, bei der diese Arten auf besonders geringe Salzgehalte angewiesen sind. Dem Rückgang dieser Arten kann entgegengewirkt werden, indem die Zugänglichkeit von Kanalzuflüssen erhalten oder verbessert wird; z. B. durch Herstellung einer fischpassierbaren Verbindung zwischen Oberer Eider und Flemhuder See/NOK. Für Brackwasser- und zwischen Süßwasser und Meer wandernde Arten sind nur geringe Verschiebungen von Verbreitungsschwerpunkten zu erwarten, je nach bevorzugten Salzgehalten innerhalb des Brackwassers. Gleiches gilt für Reproduktionsgebiete des Herings, die sich etwas verschieben können, aber voraussichtlich in ihrer bisherigen Ausdehnung erhalten bleiben. Einige Meeresfischarten können zukünftig ein wenig häufiger im Kanal auftreten, werden aber auch zukünftig meist keine für sie optimalen (ausreichend hohen) Salzgehalte antreffen.

Avifauna + Salz

Es befinden sich sechs Vogelschutzgebiete (NSG Ahrensee und nordöstlicher Westensee, Staatsforsten Barlohe, Haaler Au-Niederung, NSG Kudensee, Binnendünen- und Moorlandschaft im Sorgetal, Eider-Treene-Sorge-Niederung) direkt an oder in der Nähe des NOK. Da an Wasser gebundene Zugvogelarten größere Landmassen bei ihren Zugbewegungen meiden, spielt der NOK als Zugroute für solche eine wichtige Rolle.

Zur Erfassung des Ist-Zustandes der Avifauna am NOK wurden 25 Rasterviertel ausgewählt, welche fast den kompletten Verlauf des NOK von km 2,3 bis km 98,6 und dessen nähere Umgebung einschließen. Im Untersuchungsgebiet wurden 161 Brutvogelarten nachgewiesen. Damit brüten etwa 75% der 216 als regelmäßige Brutvögel eingestuften Arten am NOK und in der näheren Umgebung.

Veränderungen des Salzgehaltes im NOK lassen nach aktuellem Kenntnisstand keine direkten oder indirekten Auswirkungen auf die Avifauna der Region erwarten. Wassergebundene Vogelarten sind durch Salzdrüsen an unterschiedliche Salzgehalte in Gewässern angepasst. Im Hinblick auf die anderen Arbeitspakete sind für die Avifauna erhebliche Veränderungen des Lebensraumes oder der Nahrungsverfügbarkeit ebenfalls unwahrscheinlich. Selbst potenzielle Verschiebungen innerhalb der Fischgemeinschaft zugunsten salztoleranter Arten wären für die typischerweise generalistischen Fischfresser von geringer Bedeutung. Insgesamt wird der Einfluss des Salzgehalts im Vergleich zu

anderen Umweltfaktoren wie Lebensraumverlust oder Schifffahrtsaktivitäten als vernachlässigbar eingestuft.

Eis + Salz

Die überwiegende Zahl der Winter zeichnet sich am NOK nicht durch eine durchgängige Frost- bzw. Eisperiode aus, sondern typischerweise wechseln sich Frost- und Tauwetterperioden über den Winter ab, so dass zwischen dem ersten und letzten Auftreten von Eis zumeist ein oder mehrere eisfreie Perioden liegen. Die Eisbildung am NOK beginnt ab Mitte Dezember, überwiegend jedoch erst im Lauf des Januars, und dauert zumeist bis Mitte März an. Basierend auf den für Jahre bzw. Wintersaisons aggregiert vorliegenden Eisdaten lässt sich derzeit kein unmittelbarer Zusammenhang zum Salzgehalt erkennen (weder an einem Abschnitt / einer Station über die Zeit noch im Längsverlauf des Kanals). Auch wenn höhere Salzgehalte grundsätzlich zu einer verminderten / verzögerten Eisbildung führen, so scheint dieser Effekt, genau wie weitere Einflüsse (Wind, Strömung, Wasserstandschwankungen), auf der betrachteten räumlichen (Kanalabschnitte) und zeitlichen (Jahre) Skala am NOK von untergeordneter Bedeutung zu sein. Die Winterkältesummen, welche die winterlichen Temperaturverhältnisse aggregiert widerspiegeln, bilden den dominierenden Einflussfaktor. In der Rückschau auf die vergangenen Jahrzehnte ist eine erkennbare Abnahme der Eintrittshäufigkeit und Intensität von Eiswintern am NOK nachweisbar. Die betrachteten Klimaprojektionen zeigen - in Abhängigkeit vom betrachteten Emissionsszenario - eine mehr oder weniger ausgeprägte Fortsetzung der rückläufigen Eisbeeinträchtigung für den NOK, woraus sich schließen lässt, dass auch schifffahrtsbehindernde Eiserscheinungen im Zuge des Klimawandels zukünftig eher seltener als bisher zu erwarten sein werden. Dennoch ist, wenn möglicherweise auch seltener, weiterhin mit markanten Eiswintern am NOK zu rechnen.

Operationelle Kurzfrist-Wasserstandsvorhersage

Im engen fachlichen Austausch mit den Arbeiten zur Wasserbewirtschaftung wurde das operationelle Vorhersagesystem (Fokus: Vorhersagezeitraum von einigen Tagen) und seine Nutzbarkeit verbessert. Dies betrifft in erster Linie die Einbindung der neu erstellten und/oder erweiterten Modellinstrumentarien für die operationelle Kurzfristvorhersage (HydPy-L-NOK), aber auch die Einbindung und Verarbeitung neuer Eingangsdaten, wie z. B. von Ensemble-Vorhersagen des Deutschen Wetterdienstes. Zudem wurde in einer Pilotstudie untersucht, ob und wie sich das Vorhersagesystem in Richtung eines Entscheidungsunterstützungswerkzeugs erweitern lässt, welches (im Gegensatz zum komplexen Vorhersagesystem) flexibel vor Ort eingesetzt werden kann, um die Entwässerungsplanung zu unterstützen.

Summary

Water management

The aim of the work package is to conduct in-depth and further investigations into the management of the NOK under changed climatic conditions. In a first step, critical management situations in the canal from November 2012 to October 2024 were evaluated on the basis of observation data, continuing the findings from the BfG-2009 report (BfG, 2020). Eight further events with a water level exceeding 5.40 m PNP were identified during this period. These events mostly show a simultaneous combination of reduced drainage in Brunsbüttel and Kiel-Holtenau (i.e., higher external water levels) with increased inflow to the canal from the catchment area (with peak discharges of more than 100 m³/s, except for the event in February 2024). An increase in the frequency of critical events in management can be observed. The causes for this are manifold and are being discussed. In addition, an analysis of climate and water balance variables was carried out as a technical basis: Analysis of the spatial distribution of the multi-year average values for precipitation, air temperature, and sunshine duration shows a weakly pronounced climatic gradient, which—due to the topographical structure of the area—runs from west to east. The long-term average precipitation in the area is approximately 910 mm, of which approximately 500 mm is distributed to actual evaporation and 410 mm to runoff. It is noteworthy that, due to the amplifying effect of high water availability and a high proportion of agricultural land, actual evaporation in the area is almost on a par with average potential evaporation at 536 mm/year.

At the start of the project phase, a set of models was available for analyzing water availability in the catchment area on a finer temporal and spatial scale. However, these models were further developed due to their unsatisfactory representation of the interaction between groundwater and surface water and their overly coarse time steps for forecasting purposes. Two models, HydPy-L-NOK and HydPy-W-NOK (with hourly and daily time steps), were developed to remedy the shortcomings. The existing models BEWASYS NOK and SOBEK NOK for simulating canal water levels and drainage water volumes were tested for an extended simulation period and remain practical and ready for use.

The average annual inflow from the catchment area to the canal simulated using the advanced HydPy-L-NOK model for the water balance years from 2012 to 2023 is approximately 17 m³/s, with a range from 11 m³/s (minimum annual value) to 23 m³/s (maximum annual value).

The advanced water balance model was then used to simulate the inflow to the NOK – assuming the only available consistent climate projection RCP85_EUR-11_MPI-ESM-LR_rcp85_r1i1p1_REMO2009-HBM for inland hydrology and the external water levels for the North Sea and Baltic Sea – as a boundary condition for the BEWASYS NOK canal model. For each case, the number of days per year on which the critical water level in the NOK exceeded 5.40 m PNP was determined for the reference period (1972-1999), the near future (2032-2059), and the distant future (2072-2099), the number of days per year on which the critical water level in the NOK was exceeded by more than 5.40 m PNP was determined and discussed in comparison with the results of the sensitivity analysis from NOK phase 1: Compared to the reference of 0.1 days, the number of critical events rises to an average of 1.7 days in the near future and to an average of 31 days in the distant future. Compared to the results of the sensitivity analyses in NOK1, the average number of critical events (for a 30 cm rise) increases from 0.5 days to 1.7 days in the near future and from 15 days to 31 days in the distant future (for an 80 cm and 85 cm rise, respectively).

These differences can be explained by the fact that the sensitivity analysis used average change signals for inland hydrology, which were superimposed onto the meteorological observation data, and the measured water level data for the Lower Elbe and the Baltic Sea were increased by various amounts. There was no physical correlation between the altered inland inflow to the NOK and the rises in external water levels. The climate impact assessments are based – and this is the major added value compared to the sensitivity analysis in Phase 1 – on physically consistent assumptions regarding future water availability in the catchment area and sea-level rise in the North Sea and Baltic Sea. However, there is only a single climate projection available that covers these three aspects. When interpreting the results, it must therefore be borne in mind that a climate projection is only a single realisation of a possible future, and thus naturally entails greater uncertainties in the results than would be the case if an ensemble of projections of possible futures were included.

A pumping station with three different capacities of 25 m³/s, 50 m³/s and 100 m³/s to support the drainage of the NOK via gravity flow was simulated as an adaptation option to counteract the looming reduction in drainage windows and the associated increase in critical canal water levels resulting from rising sea levels. The increase in the number of days exceeding 5.40 m PNP (a critical event in canal management) from almost zero in the reference scenario to approximately 31 days in the distant future is halved to approximately 15 days by using a pump capacity of 25 m³/s, is reduced by approx. 84% to 5.3 days at 50 m³/s and falls to 0.1 days per year at 100 m³/s (and thus almost to the reference level).

With all three pump capacity variants, pumping will take place on an average of 6 days per year in the near future. In the distant future, the average number of days on which pumping takes place is 57 (at a capacity of 50 m³/s or 100 m³/s). At a pumping capacity of 25 m³/s, the volume of water pumped is spread over additional days, resulting in pumping taking place on an average of 59 days per year.

The pumping work required for the pump operation depends not only on the pump capacity but also, to a significant extent, on the location and the difference in water levels between the reservoir and the external water body. In the near future, the pumping energy required for the Brunsbüttel site variant would vary between 10,869 kWh per year (pumping capacity 25 m³/s) and 25,743 kWh per year (pumping capacity 100 m³/s), In the Kiel-Holtenau site variant, the pumping work ranges from 3,431 kWh per year (pumping capacity 25 m³/s) to 7,891 kWh per year (pumping capacity 100 m³/s). In the distant future, the pumping work is significantly higher than in the near future. In the Brunsbüttel site variant, this ranges from 226,511 kWh per year (pump capacity 25 m³/s) to 479,601 kWh per year (pump capacity 100 m³/s); in the Kiel-Holtenau site variant, it ranges from 96,283 kWh per year (pump capacity 25 m³/s) and 204,571 kWh per year (pump capacity 100 m³/s).

In addition to studies on water management of the NOK under climate change with the idea of a pumping station as an adaptation option, studies on resilience management were also conducted. Here, a resilience management concept developed for the “road” mode of transport was successfully transferred to the “waterway” mode of transport with a few conceptual adjustments. The concept was tested on the basis of two events on the Kiel Canal (NOK) and their network-related effects, i.e., the restrictions on functionality (especially shipping in longitudinal traffic), were monetized. Case study 1, “Flooding,” resulted in daily costs of up to EUR 340,000; case study 2, “Ship collision,” resulted in daily costs of up to EUR 269,000. Resilience-enhancing measures can significantly reduce these effects.

Sea + Salt

The salinity of the Kiel Canal (NOK) has been monitored since 1895 and is determined by saltwater inputs during sluice operations as well as freshwater inflows from the catchment area. The canal's management has been developed from an open system with drainage solely through Brunsbüttel to a closed system with drainage through both sluices. This produced a change in the salinity profile from a

linear gradient to a saddle-shaped profile with a minimum between NOK-km 20 and 40. High-resolution continuous measurements since 2021 show significant seasonal fluctuations and a strong dependence on management practices and climatic factors. Due to sea-level rise and altered flow patterns, an increase in salinity of approximately 2 PSU is expected in the Elbe estuary in the future. For the Kieler Förde, due to large uncertainties in the estimates, processes working in opposition and the historically stable surface salinity, no change in salinity is initially assumed for practical purposes.

Water quality + Salt

According to our research, salinity has only limited influence on the examined water quality parameters. Water temperature is a defining factor for oxygen and nutrient balance and plankton growth. Cooler water enters the NOK from the Kieler Förde; it warms up during the primarily westward flow along the NOK due to weather influences and the inflow of the Eider River. No temperature stratification was observed.

The increase in nitrogen and phosphorus nutrient levels along the NOK is not dependent on salinity, but on the main flow direction in the canal and the input from the catchment area. Since future management of the surrounding agricultural areas is difficult to predict, it is assumed that the nutrient levels in the NOK will remain unchanged.

Phyto- and zooplankton development also isn’t affected by salinity. Chlorophyll a (Chla)-content, which is used as a measure of the algal biomass in a body of water, increased from east to the middle of the canal (km 63 and 43). Concentrations measured further west were lower. The sample point at km 43 corresponds to a good eutrophic condition (Mischke et al. 2022). The spring bloom was dominated by diatoms, while in late summer cyanobacteria were dominant. No correlation between the studied zooplankton and the measured change in phytoplankton could be found, meaning phytoplankton was not the preferred source of nutrition. The highest fresh weight was found during September 2022 and 2023 in the eastern part of the canal. At other sampling times only small densities of Zooplankton could be observed. The copepod group dominated the zooplankton make up consistently in the western part und at times in the eastern part.

The oxygen content fluctuated at the 18 sampling times averaged over depth between 6,0 and 15,5 mg O2/L, the corresponding oxygen saturation varied between 71,6 and 137,8 % O2. The lowest oxygen contents didn’t show critical values and were usually found towards the western end of the canal. However continuous probe measurements from 2024 done by BfG in the Kiel-Holtenau sluice showed critical oxygen contents on the inland side. Here the oxygen pollution of the Kieler Förde was shown at temperatures above 16°C and independent of salinity. Accordingly, an increased influx of Baltic Sea water into the NOK will influence the oxygen balance at a small scale. The metrological accompaniment during the following contract, especially regarding water temperature and oxygen as well as chlorophyll a, will be carried out in Kiel-Holtenau and Breiholz using multiparameter probes in order to detect possible changes with continuous measurements.

Canal + Salt

The approximately 20.000 lockages per year are the source of the existing salinity in the NOK. The distribution of the salinity in the NOK is influenced by 3D-phenomena. To investigate the effects of the planned and already initiated measures to expand the eastern part of the route, as well as the possible deepening of the canal, on salinity levels in the canal, 3-D hydrodynamic, numerical models of three construction situations (reference, after expansion of the eastern part, after additional deepening of the canal) were developed. The models were calibrated using existing measured data and for the first time allow for a simplified model-based depiction of the processes influencing the salt budget inside the NOK.

It was shown that the inflow of fresh water along the canal as well as the spreading of the drainage to Bunsbüttel and Kiel Holtenau have a considerable impact on the longitudinal salt distribution. It was also demonstrated that wind and especially the wind direction during storms have a noticeable impact on the intrusion and distribution of salt.
Both the widening (expansion of eastern part of the route) and the planned deepening from 11 to 12 m will lead to changes in the salt distribution in the NOK (by approximately 0,5 PSU up to approximately 2 PSU).
Simulations assuming sea levels raised 1 m above current levels were also carried out. This results in periods during which it is no longer possible to maintain the water levels in the canal within the management lamella. Salinity increases in all scenarios with raised sea levels reaching local increases of up to 5 PSU.

Soil-vegetation + Salt

To clarify the current influence of the Kiel Canal on the surrounding compartments, a basic information collection was carried out on current salt concentrations in the shallow groundwater, in the soil and in the vegetation of the canal's surroundings. Overall, it became apparent that influencing conditions exist temporarily in the hilly region (approximately NOK-km 65 to km 98) and the geest (approximately NOK-km 20 to km 65), and locally permanently in the marshland (NOK km 0 to km 20), meaning substances can enter the shallow groundwater. Indicators of increased soil salinity in the canal environment and/or halophytes were not mapped nationwide. In general, the hydraulic gradient between the NOK and its surroundings is characterized in its height by changes in the water level in the NOK and the medium- to long-term groundwater levels on the land side. If groundwater levels drop, for example due to prolonged dry periods caused by climate change, the gradient between groundwater and the NOK will rise, resulting in increased risk of intrusion of canal water into the aquifer, which in turn will result in lasting effects on soil and vegetation. In particular, in the central (Geest) and western (Marsh) sections of the NOK, the construction of further temporary groundwater monitoring wells alongside the canal, filtered near the surface in the depth range of the NOK water body, would be advantageous in order to increase explanatory power regarding the spatial and temporal distribution of a (temporary) salt transport from the NOK towards the groundwater.

Macrozoobenthos + Salt

With regard to the MZB, the NOK does not have a database based on standardised faunistic surveys, but rather on one-off, locally limited sampling at longer intervals. Nevertheless, both spatial and temporal patterns can be derived from these surveys. The salinity gradient in the NOK, ranging from a minimum of 2–6 PSU (oligohaline conditions, western section to approx. the middle) to a maximum of 9–15 PSU (mesohaline conditions, eastern section of the Kiel-Holtenau lock) causes partially different colonisation, as the species have different preferences in terms of salinity despite their high tolerance. The relative species composition of the MZB changes along its length: from Brunsbüttel to approximately Kkm 40, brackish water species with a preference for low salinity or brackish water-tolerant freshwater species dominate. The proportion of neozoans in the total number of species is very high in this area, at approximately 50%. The native fauna here is mainly represented by the native fauna here is mainly represented by sediment-dwelling bristle worms and chironomid larvae, but also by bryozoans colonising hard substrates and the amphipod species Towards the west, from around K-km 50, the relative proportion of species with a preference for slightly higher salinity levels gradually increases until the community becomes very similar to that of the Baltic Sea in Kiel Bay.

There are no indications of changes in MZB colonisation in the future, such as the complete disappearance of species or significant shifts in the basic patterns of dominance. The short-term fluctuations over the course of the year and day, at around 6 PSU, are of the same magnitude or even higher

overall than the long-term increase of up to 2 PSU predicted under climate change conditions and must already be tolerated by the organisms.

Fish + Salt

Almost 100 species of fish and lampreys have been detected in the Kiel Canal so far, many of them only as sporadic immigrants from canal tributaries, Kieler Förde and tidal river Elbe. The regularly occurring species are freshwater fish with high brackish water tolerance (e. g. pikeperch) and brackish water species, as well as species that regularly migrate between fresh and seawater and tolerate a very wide range of salinity levels (e.g. some goby species, flounder, eel). Marine species (e. g. cod) are rare. An exception is the Baltic herring, which in early spring enters the Kiel Canal in large shoals through the Kiel-Holtenau locks to spawn in the riprap of the canal banks in areas with salinity levels above 5 PSU.
With increasing salinity levels in the future, living conditions for freshwater fish will be restricted in larger sections of the canal than before. This applies particularly to reproduction, for which these species depend on especially low salinity levels. The decline of these species can be countered by maintaining or improving the accessibility of canal tributaries; for example, by creating a fish-passable connection between the Upper Eider River and Lake Flemhude/NOK. For brackish water species and those migratory between freshwater and the sea, only minor shifts in distribution centers are expected, depending on preferred salinities within brackish water. The same applies to herring spawning grounds, which may shift slightly but are expected to remain largely unchanged. Some marine fish species may become slightly more common in the canal in the future, but will generally still not find optimal (sufficiently high) salinity levels.

Avifauna + Salt

Changes in salinity levels in the Kiel Canal are, according to current knowledge, not expected to have any direct or indirect effects on the region’s avifauna. Water-associated bird species are adapted to varying salinity levels in aquatic environments through salt glands. With regard to other project work packages, significant changes in habitat or food availability for the avifauna are likewise considered unlikely. Even potential shifts within the fish community in favor of salt-tolerant species would be of little importance to the typically generalist fish-eating birds. Overall, the influence of salinity is assessed as negligible compared to other environmental factors such as habitat loss or shipping activities.

Ice + Salz

The vast majority of winters on the NOK are not characterised by a continuous period of frost or ice; instead, periods of frost and thaw typically alternate throughout the winter, so that there are usually one or more ice-free periods between the first and last occurrence of ice. Ice formation on the NOK begins in mid-December, but mostly in the course of January, and usually lasts until mid-March. Based on the aggregated ice data available for years or winter seasons, no direct correlation to salinity can currently be recognised (neither at a section/station over time nor along the length of the canal). Even if higher salinity generally leads to reduced/delayed ice formation, this effect, just like other influences (wind, current, water level fluctuations), appears to be of secondary importance on the spatial (canal sections) and temporal (years) scale considered on the NOK. The winter temperature conditions are the dominant influencing factor. A first assessment of the future occurrence of river ice along the NOK, which is based on a set of climate projections following the emission scenario 8.5, shows that ice formations affecting navigation might occur less often. Nevertheless, even in the future one still has to be prepared for single significant ice winters along the NOK.

Operational short-term Forecasting

The operational forecasting system (focus on lead-times of several days) and its usability were improved in close technical dialogue with the work on water management. This primarily concerns the integration of the newly created and/or expanded modelling tools for operational short-term forecasting (HydPy-L-NOK, HydPy-W-NOK), but also the integration and processing of new input data, such as ensemble forecasts from the German Weather Service.

Einleitung

Die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) wurde von der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS) im Herbst 2021 mit Untersuchungen zum Nord-Ostsee-Kanal zu den Themenschwerpunkten Wasserbewirtschaftung / Vorhersage, Gewässerkunde und Ökologie beauftragt. Diese Arbeiten erfolgen in der Phase 2 des Projektes und somit im Anschluss an die 1. Projektphase, die sich thematisch mit der Wasserbewirtschaftung und der Vorhersage des Kanals befassten. In der Phase 1 wurde ein anwendungsreifes und einsatzbereites Modellinstrumentarium (Wasserhaushaltsmodell für das Einzugsgebiet, Bewirtschaftungs- und Steuermodell sowie ein 1D-Hydraulikmodell für den NOK) entwickelt. Das Vorhersagesystem ist in den Testwirkbetrieb überführt worden. Der Themenschwerpunkt Wasserbewirtschaftung wurde mit dem Bericht BfG-2009 „Wasserbewirtschaftung des Kanals unter Klimawandel“ (BfG, 2020) im Sommer 2020 zum Abschluss gebracht. Es folgten 12 weitere Monate zur inhaltlichen Konzeptionierung der Projektphase 2, die dann zweistufig beauftragt werden konnte: Inhaltlich klarer festlegbar waren die fortführenden vertiefenden Arbeiten in den Bereichen Wasserbewirtschaftung und Vorhersage, die bereits im Herbst 2021 beginnen konnten. Ein Jahr später – im Herbst 2022 – wurde der Aufgabenschwerpunkt „gewässerkundliches Sollkonzept“ beauftragt, das sich mit Analysen zur Salzverteilung im Kanal anhand von Beobachtungsdaten, der Beauftragung zum Aufbau eines 3D-HN Modells für die Modellierung der Salzverteilung sowie mit Fragen zu den Auswirkungen der Salzverteilung auf Gewässergüte, Vegetation / Boden auf Makrozoobenthos, Fische und Avifauna beschäftigte. Dieses Arbeitspaket musste – auch weil damit ein neues Aufgabenfeld inhaltlich erschlossen wurde – stärker zwischen Auftragnehmer und Auftraggeber iteriert werden.

Folgende Arbeitspakete wurden final durch die GDWS bei der BfG beauftragt:

AP 1 Literaturanalyse[1]

AP 2 Wassermengenbewirtschaftung des NOK unter Berücksichtigung des Klimawandels und betrieblich/baulicher Veränderungen

- AP 2-1: Modellberechnung mit verbesserten Rahmenbedingungen für die nahe und ferne Zukunft einschließlich praxisrelevanter Szenarien
- AP 2-2: Ableitung von Anpassungsstrategien und Anpassungsmaßnahmen im Hinblick auf die Funktionalitäten des NOK (als Bestandteil des workflows / Ablaufschemas der WSV „WSV-Klimaanpassung“)
- AP 2-3: Hydrologische Gesamtschau zu den Einzugsgebieten des NOK und der Eider mit dem Fokus der Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus der Wasserhaushaltsmodellierung auf andere Wasserstraßen in Tieflandgebieten.
- AP 2-4: Bearbeitung der „Fallstudie Wasserbewirtschaftung NOK“ für das Projekt „Resilienzmanagement“ des BMV-Forschungsnetzwerkes 2.0.

AP 3 Soll-Konzept „Gewässerkundliche Parameter“; Systemverständnis „Gewässerkundliche Zusammenhänge“; Veränderung gewässerkundlicher Parameter insbesondere Salzgehalt, Temperatur und deren Auswirkungen auf Gewässergüte, Boden, Flora und Fauna

- AP3-1: Meer + Salz

[1] Die Ergebnisse und Erkenntnisse aus der Literaturanalyse werden nicht separat in einem Kapitel diskutiert, sondern bilden die Grundlage für die themenspezifischen Arbeitspakete.

AP3-2: Kanal + Salz

AP3-3: Eis + Salz

AP3-4: Gewässergüte + Salz

AP3-5: Boden-Vegetation + Salz

AP3-6: Fauna + Salz

AP3-7: Fazit

AP 4 Pflege, Weiterentwicklung und Erweiterung des operationellen Vorhersagesystems

AP 4-1 Kopplung Wasserhaushaltsmodell mit Delft-Fews-Vorhersagesystem

AP 4-2 Pflege und Weiterentwicklung

AP 5 Gesamtfazit

In diesem Abschlussbericht BfG-2236 sind Arbeitsergebnisse der BfG beschrieben, diskutiert und zusammenfassend dargestellt. Dieser Abschlussbericht integriert die bereits veröffentlichten Arbeiten des Zwischenberichtes, der von der Bundesanstalt für Gewässerkunde vor Vertreterinnen und Vertretern der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, der Wasserstraßen- und Schifffahrtsämter, der Bundesanstalt für Wasserbau, der Landesbehörden Schleswig-Holsteins sowie des Deich- und Hauptsielverbandes Dithmarschen am 25. Januar 2024 vorgestellt und diskutiert wurde. Die Abschlussveranstaltung zur 2. Projektphase hat am 19. Mai 2026 stattgefunden.

Parallel zum detaillierten Abschlussbericht wird unter gleicher Berichtsnummer eine gestraffte Synthese erstellt (BfG-2236-Synthese, 2026)

1 Wasserbewirtschaftung des NOK unter Berücksichtigung des Klimawandels

Teilprojektverantwortlichkeit: Dr. Anna Ebner von Eschenbach, Jochen Hohenrainer, Claudius Fleischer, Katharina Richter, Dennis Meißner, Peter Krahe

Das Aufgabenpaket (AP2) Wassermengenbewirtschaftung des NOK unter Berücksichtigung des Klimawandels und betrieblich / baulicher Veränderungen ist in vier Unterarbeitspakete untergliedert:

Kapitel 1.1 Erläuterungen zur Charakteristik des Systems

Kapitel 1.2 Erläuterungen zum Modellinstrumentarium

Kapitel 1.3 Bewirtschaftung des NOK unter Klimawandel und Anpassungsoptionen

Kapitel 1.4 Resilienzmanagement

1.1 Charakteristik des Systems

In diesem Abschnitt wird das wasserwirtschaftliche System des NOK – also der Kanal im Zusammenwirken mit seinem Einzugsgebiet – beschrieben, um dem Leser darauf aufbauend das Verständnis für die sich anschließenden Untersuchungsschwerpunkte zu erleichtern. Es handelt sich um aktualisierte gekürzte Textpassagen aus dem Bericht BfG-2009 (BfG, 2020).

Der Nord-Ostsee-Kanal (NOK) ist die meistbefahrene künstliche Seeschifffahrtsstraße der Welt und verbindet mit einer Länge von rd. 100 km die Nordsee (über die tidebeeinflusste Unterelbe) mit der Ostsee (über die Kieler Förde). Den Längsschnitt des Kanals mit den Betriebspegeln und den Probenahmestellen der Gewässergüte zeigt Abbildung 1-1. Der NOK durchquert im Westen die bis zu drei Meter tiefer liegende Marsch, durchschneidet den bis zu 25 m hohen Geestrücken, folgt der Eiderniederung und erreicht das östliche holsteinische Hügelland, um dann bei Kiel-Holtenau in die Kieler Förde zu münden.

Die Bewirtschaftung des NOK erfolgt auf einem Wasserstand, der möglichst konstant auf mittlerem Meeresspiegelniveau von +4,90 m PNP (WSA NOK (2026)) vorgehalten wird. Diese Steuerung ist notwendig, um einen möglichst reibungslosen Ablauf des Schiffverkehrs, den Betrieb der Wasserstraße einschließlich des Querverkehrs durch die Fähren und die Standsicherheit der Böschungen und Bauwerke zu gewährleisten. Der untere (4,80 m PNP) und obere Wasserstand (5,20 m PNP) sind als planfestgestellt angegeben. Im Sommerhalbjahr wird eine Vorentlastung auf 4,90 m PNP vorgenommen, im Winterhalbjahr eine Vorentlastung auf 4,80 m PNP. Um negative statische Auswirkungen auf Bauwerke und Anlagen auszuschließen, ist ein Wasserstand von unter 4,80m PNP zu vermeiden.

Ab einem Wasserstand von 5,25 m PNP erfolgt die Einstellung des regionalen Fährverkehrs. Zum einen ist der Arbeitsbereich der Fähranleger durch zu hohe Wasserstände begrenzt, zum anderen werden durch Wellenschlag die Dammstrecken, die Ufersicherung und die Betriebswege gefährdet.
Ab 5,40 m PNP werden Beschränkungen für die Schifffahrt geprüft. Zudem wird ab diesem Wasserstand eine Hochwassermeldung an die GDWS herausgegeben.

Die Regulierung des (Kanal-)Wasserstandes erfolgt im Regelfall (d.h. Wasserstände liegen innerhalb der Lamelle von unterem und oberem Wasserstand) durch Entwässerungsschütze der kleinen Schleusen in Brunsbüttel und/oder über das Entwässerungssiel in Kiel-Holtenau. Ab Wasserständen über 5,25 m PNP kann in Brunsbüttel zusätzlich über die Umläufe der großen Schleuse entwässert werden. Einzige Randbedingung ist, dass die Außenwasserstände niedriger sind als die Kanalwasserstände, denn eine Entwässerung ist nur im Freigefälle möglich.

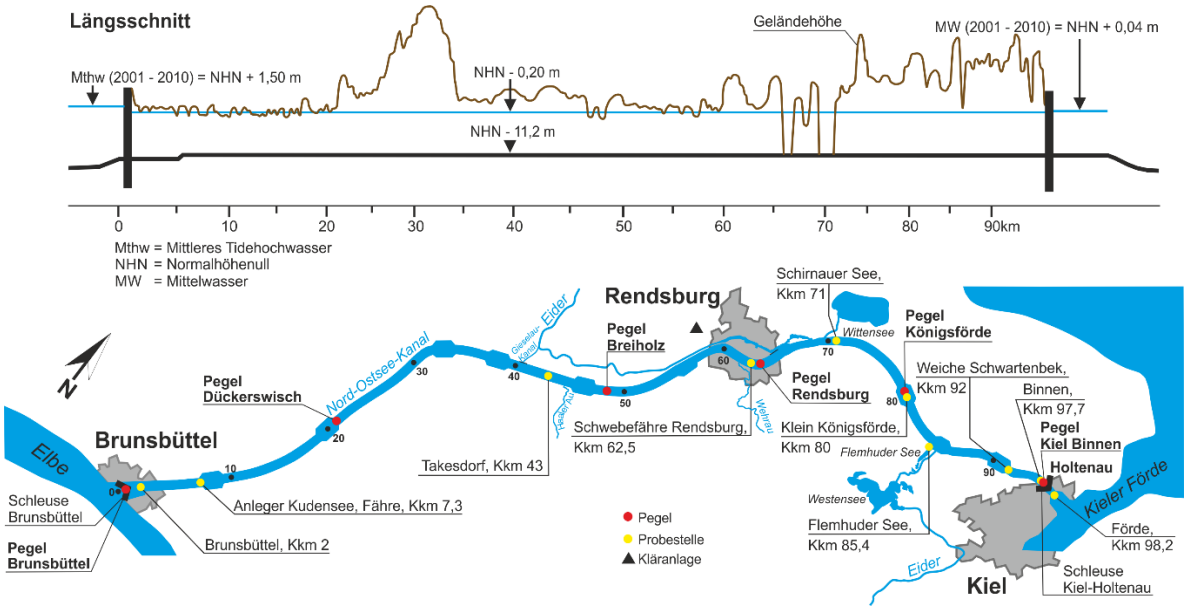


Abbildung 1-1: Längsschnitt NOK (BfG, verändert nach WSV). Probestelle für Gewässergüte (siehe hierzu Kapitel 2.2)

Neben seiner Hauptfunktion als Bundeswasserstraße dient der NOK der Entwässerung des umgebenden Gebietes. Er wird von zahlreichen natürlichen Zuflüssen aus einem Einzugsgebiet von 1 530 km² gespeist, wobei das tieferliegende Gebiet mit einer Fläche von 250 km² mit Hilfe von Schöpfwerken entwässert wird. Die Schöpfwerke befinden sich (wie Abbildung 1-2 zeigt) in den Marschen sowie den Niederungen und Moorgebieten und gewährleisten überwiegend auch die Vorflut von weiten Bereichen der Hohen Geest.

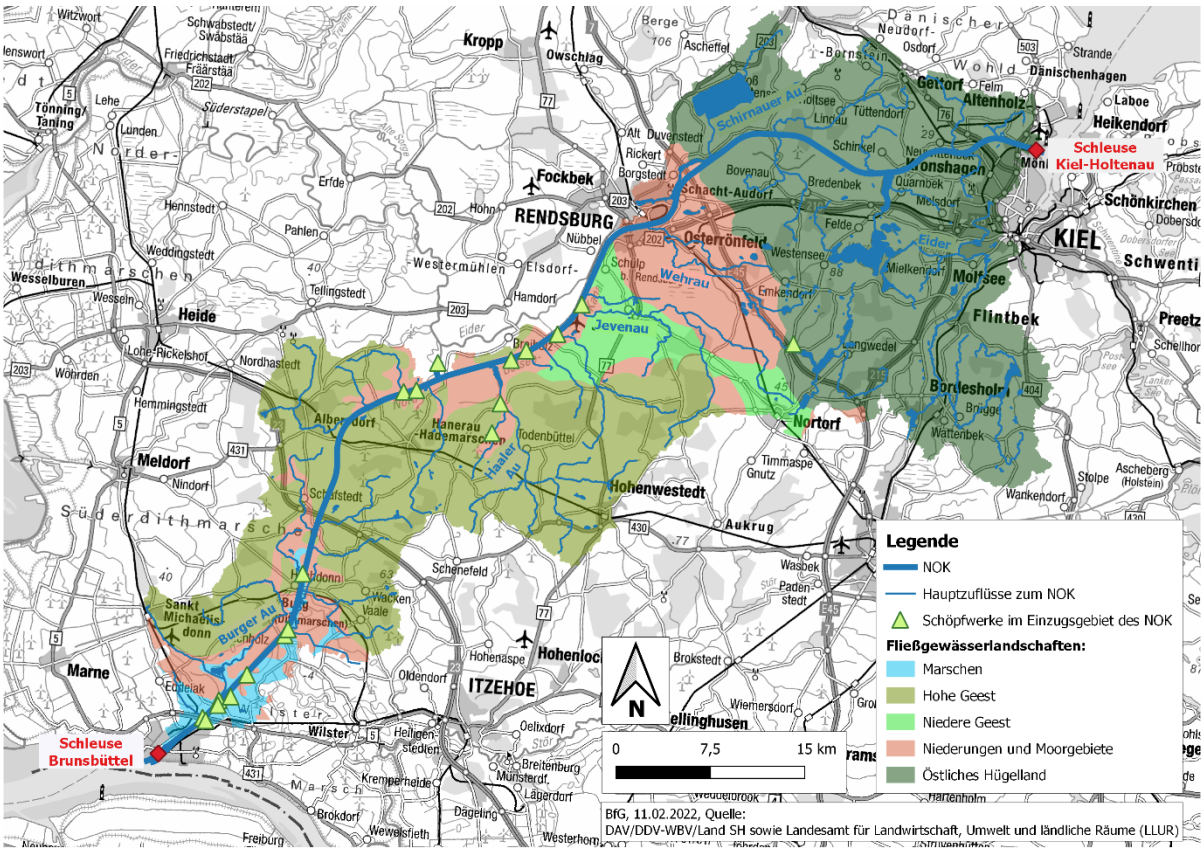


Abbildung 1-2: Einzugsgebiet NOK. Ein Großteil des 1 530 km² großen Gebietes befindet sich südlich des Kanals. Zusätzlich zu den Hauptnaturräumen sind die Schleusen- und Entwässerungsstandorte in Brunsbüttel und Kiel-Holtenau sowie die Lage der Schöpfwerke in den Marschen sowie den Niederungen und Moorgebieten und weiten Bereichen der Hohen Geest dargestellt. Die Kartendarstellung erfolgte durch die BfG auf der Grundlage von Daten des Landesamtes für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holsteins und den in der BfG verfügbaren Web Map Services.

Die Hauptnaturräume des NOK sind im Weiteren kurz beschrieben:

Die **Marsch** befindet sich am westlichen Rand des Untersuchungsgebiets und nimmt mit ca. 4 % des Einzugsgebietes den kleinsten Naturraum ein. Sie ist zu 80 % durch Grünlandnutzung geprägt. Der hohe Anteil der Grünlandnutzung in diesem Gebiet, in dem die Geländehöhen zumeist unterhalb der Wasserspiegellage des NOK liegen, erfordert ein komplexes Grabensystem zur Be- und Entwässerung. Die Entwässerung erfolgt zumeist über Schöpfwerke in den NOK.

Die **Hohe Geest** schließt sich östlich an die Marsch an, umfasst eine Fläche von ca. 490 km² und damit ca. 32 % des Untersuchungsgebietes. Die Landnutzung in diesem Hauptnaturraum ist zu 75 % bestimmt durch Grünland- und Ackernutzung. Die Hohe Geest zeichnet sich im Vergleich zum östlichen Hügelland durch ein wesentlich flacheres Relief aus. Die Täler der Hohen Geest sind ebenso wie die Marsch von Entwässerungsgräben durchzogen und auch die Geländehöhen der Niederungen liegen teilweise unter der Wasserspiegellage des NOK, so dass auch hier die Entwässerung in den NOK zum Teil über Schöpfwerke erfolgt.

Die **Vorgeest** bildet mit ca. 9 % den zweitkleinsten Naturraum und bildet die Grenze zwischen der Altmoränenlandschaft (Hohe Geest) und der Jungmoränenlandschaft (Östliches Hügelland). Sie besitzt

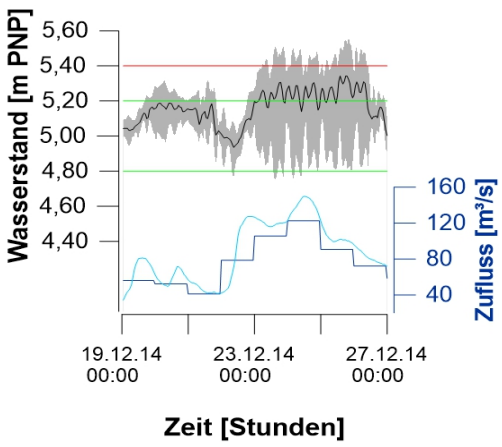
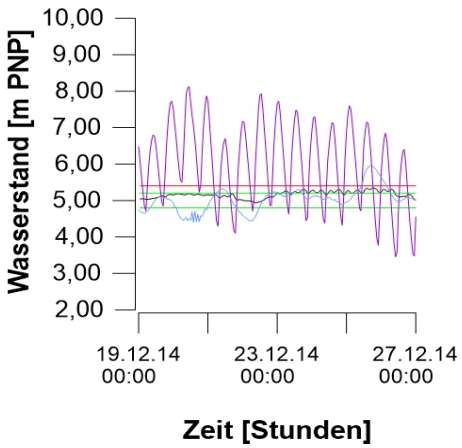
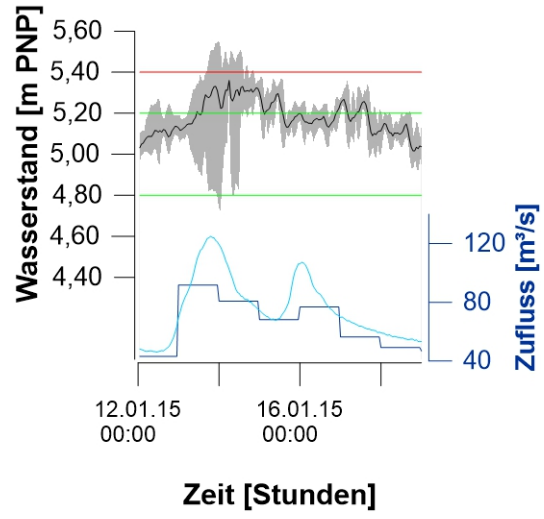
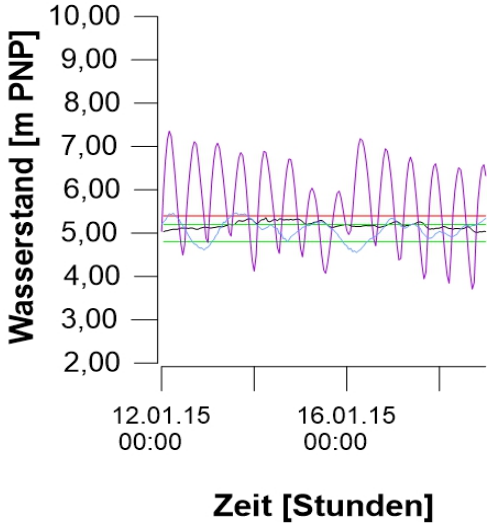
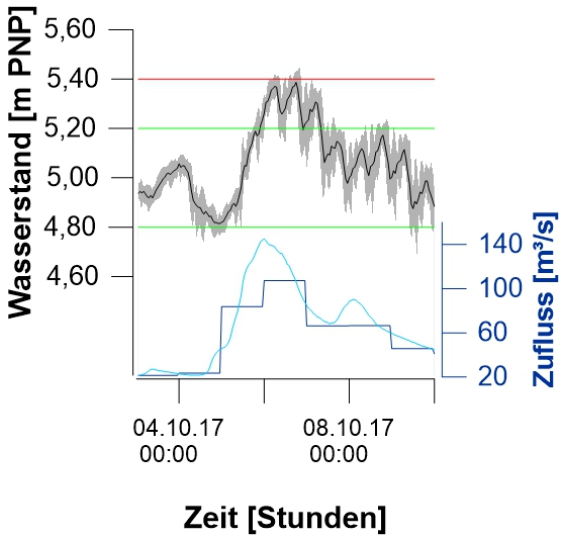
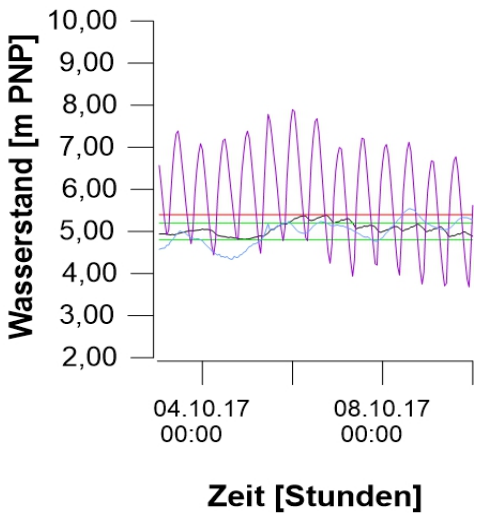
ein leicht nach Westen gerichtetes Gefälle, hat aber ansonsten keine Reliefenergie. Sie wird auch als Sanderebene bezeichnet. Die Landnutzung ist ebenso wie in der Hohen Geest durch Ackerbau und Grünland bestimmt, wobei die Grünlandnutzung einen leicht höheren Anteil einnimmt.

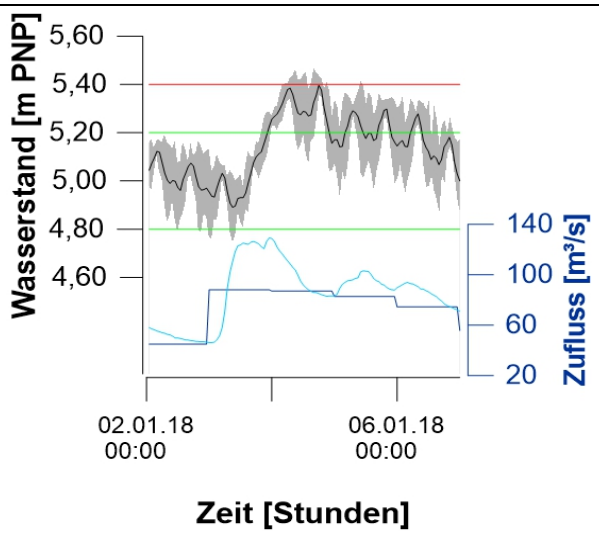
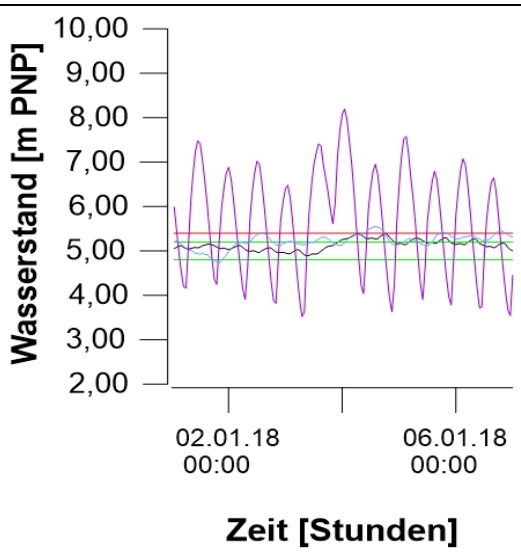
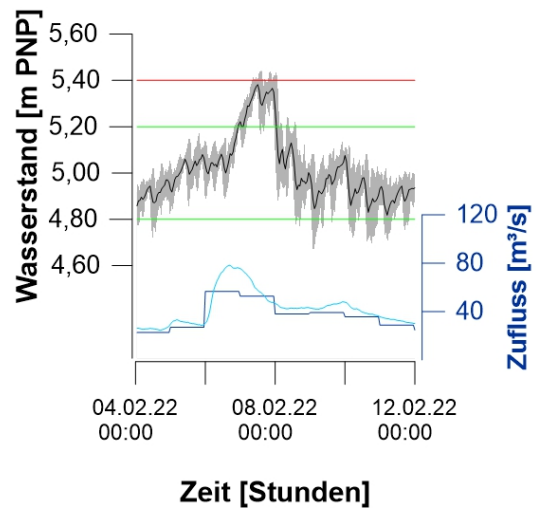
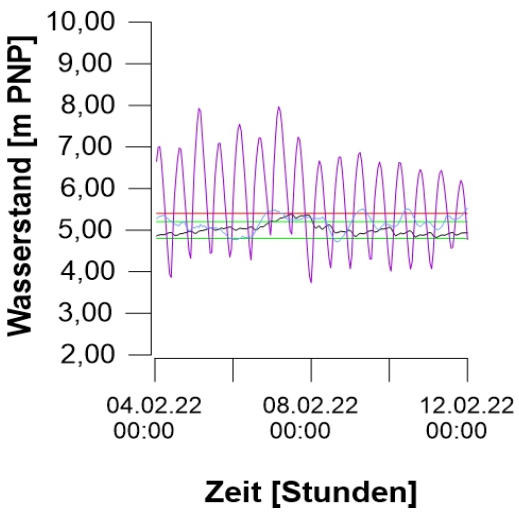
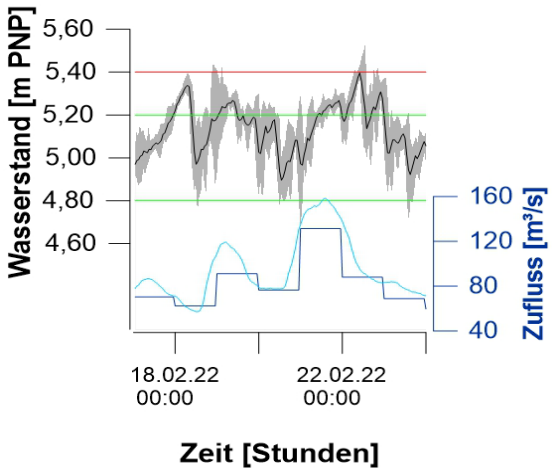
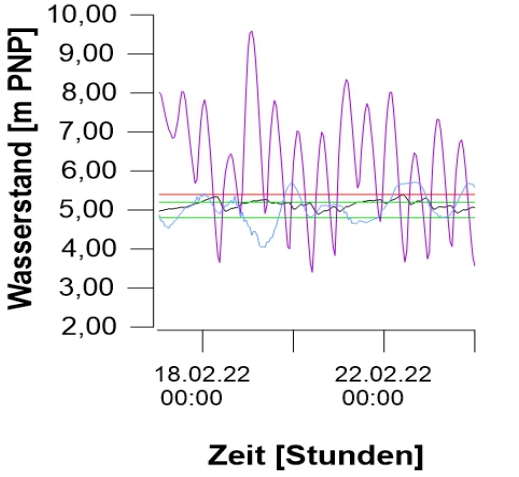
Das **östliche Hügelland** liegt am östlichen Rand des Untersuchungsgebietes und bildet mit 47 % den flächenmäßig größten Naturraum. Die ackerbauliche Nutzung ist mit ca. 61 % deutlich höher als die Grünlandnutzung mit 14 %. Das östliche Hügelland besitzt die höchste Reliefenergie im Einzugsgebiet des NOK.

1.1.1 Kanal: kritische Bewirtschaftungssituationen

Im Bericht BfG-2009 (BfG, 2020) sind die kritischen Bewirtschaftungssituationen im Kanal anhand von Beobachtungsdaten ausgewertet worden. Es wurden 12 Ereignisse im Zeitraum von November 1980 bis Oktober 2012 (größte Verfügbarkeit an Beobachtungsdaten) identifiziert, die zu Wasserständen über 5,40 m PNP (kritische Bewirtschaftungssituation laut Entwässerungsvorschrift WSA Brunsbüttel, 2018) an einem oder mehreren Pegeln im Kanal führten und/oder sehr hohe Zuflüsse aufwiesen. Die Lage der Pegel ist in Abbildung 1-1 dargestellt. Für den sich anschließenden Zeitraum bis zum Wasserhaushaltsjahr 2024 wurde diese Analyse erneut mit fortgeschriebenen Daten durchgeführt. Es wurden acht weitere Ereignisse mit einer ähnlichen Charakteristik (dargestellt in Abbildung 1-3) identifiziert: Dezember 2014 und Januar 2015, Oktober 2017, Januar 2018, Februar 2022 (Monatsbeginn und Monatsmitte, 2 Ereignisse), Januar und Februar 2024. Auch bei diesen Ereignissen traten an mindestens einem Kanalpegel Wasserstände über 5,40 m auf. Ursache hierfür sind zum einen hohe Zuflüsse aus dem Einzugsgebiet, wie z.B. Dezember 2014 oder Mitte Februar 2022 mit z.T. über 150 m³/s. Meist führt jedoch die zeitgleiche Kombination aus erhöhten Gebietszuflüssen und erhöhten Außenwasserständen und daraus resultierender reduzierter Entwässerung (siehe Kapitel 1.1) in Brunsbüttel, wie z.B. bei den Ereignissen 2014 und 2024 oder in Kiel-Holtenau, wie bei den Ereignissen von 2015 bis 2022 zum Überschreiten des kritischen Wasserstandes von 5,40 m. Besonders deutlich zeigt sich dies bei den Ereignissen Anfang Februar 2022 und 2024.

Es stellt sich automatisch die Frage, ob eine Zunahme der Häufigkeit an kritischen Ereignissen in der Bewirtschaftung im Vergleich der Zeiträume (1998-2012; 2013-2024) feststellbar ist. Aufgrund der unterschiedlichen Datenverfügbarkeit (hoch aufgelöste Wasserstände für den Kanal liegen seit Ende 2006 / Anfang 2007 vor, und damit nicht vollständig im ersten Untersuchungszeitraum), kann diese Frage nicht belastbar beantwortet werden. Hier empfiehlt sich eine einheitliche Analyse von Zeiträumen mit gleicher Verfügbarkeit und Qualität von Wasserstandsdaten für den Kanal (an allen Betriebspegeln) bei gleichzeitiger Festlegung von Grenzwerten zur Auswertung und einer dezidierten Analyse der Zuflussvolumina / Zuflussscheitel und der Entlastungsmöglichkeiten.

		
1	Dezember 2014	
		
2	Januar 2015	
		
3	Oktober 2017	

		
4	Januar 2018	
		
5	(Monatsbeginn) Februar 2022	
		
6	(Monatsmitte) Februar 2022	

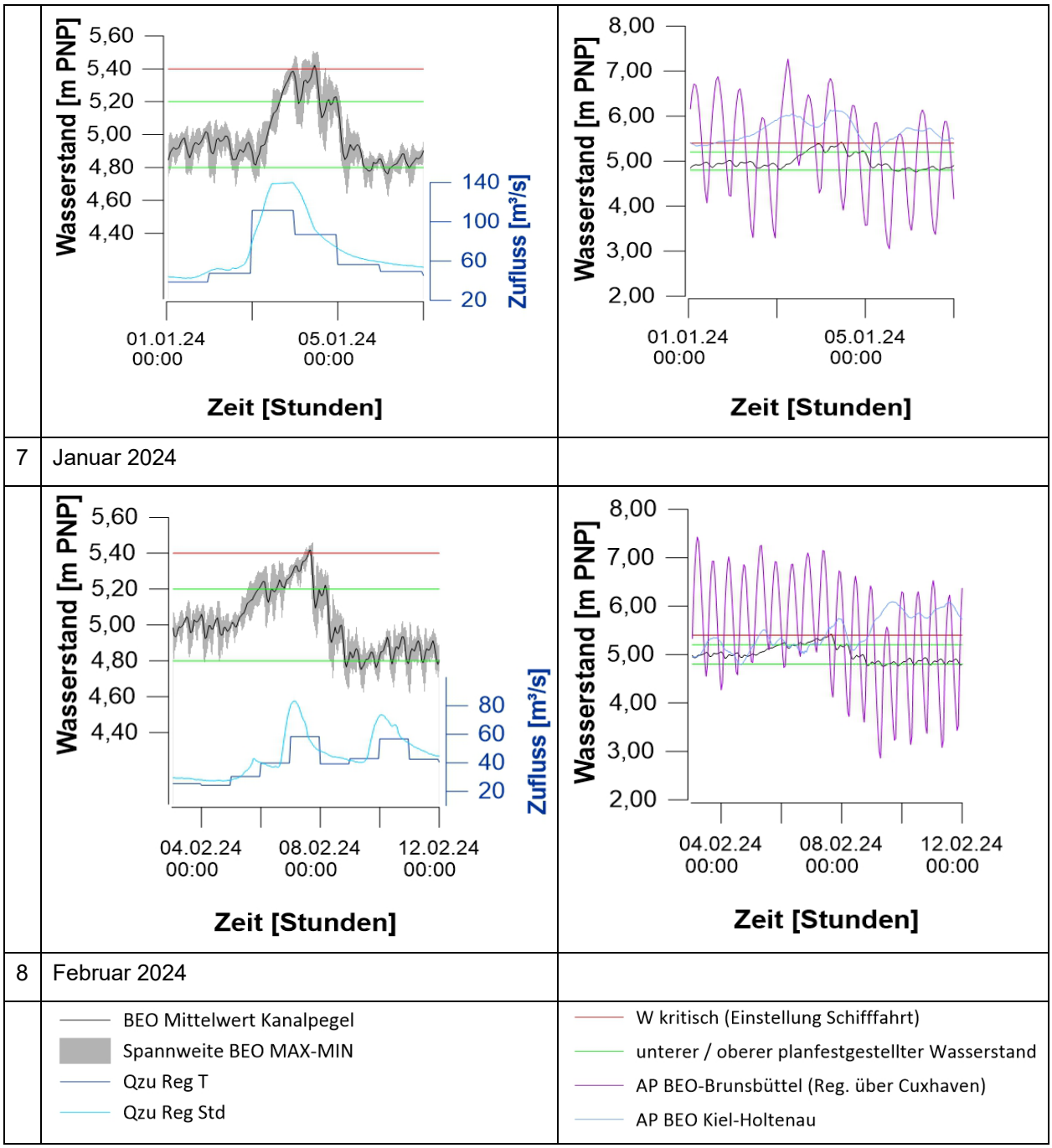


Abbildung 1-3: Ereignisse mit kritischen Situationen in der Kanalbewirtschaftung (Wasserstände über 5,40 m PNP an einem oder mehreren Wasserstandspegeln im Kanal und / oder einem hohen Gebietszufluss Qzu, keine Berücksichtigung des Pegels Rensburg, das die Daten zu Beginn des Projektes nicht vorlagen). Die Ereignisse 1 bis 6 (Dezember 2014 bis Februar 2022) wurden im Zuge der Masterarbeit von Laura Heusel[2] aufbereitet, analysiert, plausibilisiert, ausgewertet und bewertet; die Ereignisse 7 und 8 (Januar und Februar 2024) in der Praktikumsarbeit[3] von Lutz Malte Geilen. Die beobachteten Mittelwerte wurden über 5 Kanalpegel (Betriebspegel)l ermittelt. Lücken in der Reihe des beobachteten Außenpegels (AP) Brunsbüttel wurden mittels Regionalisierung (Reg.) über den Pegel Cuxhaven gefüllt.

[2] Heusel, Laura (2023): Analyse von extremen Entwässerungssituationen für den NOK als Grundlagen für Resilienzuntersuchungen. Masterarbeit. Leibniz Universität Hannover (Betreuer: Prof. Schlurmann, Dr. Visscher, Dr. Jordan) und Bundesanstalt für Gewässerkunde (Dr. Anna-Dorothea Ebner von Eschenbach, Peter Krahe)

[3] Geilen, Lutz Malte (2025): Daten- und modellgestützte Analyse von kritischen Bewirtschaftungssituationen im Nord-Ostsee-Kanal (NOK) in der jüngeren Vergangenheit. Praktikumsarbeit vom 17. Februar bis 14. März 2025 in der Bundesanstalt für Gewässerkunde unter der Betreuung von Dr. Anna-Dorothea Ebner von Eschenbach

1.1.2 Einzugsgebiet: Klima- und Wasserhaushaltsgrößen

Das Einzugsgebiet des Nord-Ostsee-Kanals liegt im warm-gemäßigten Regenklima der mittleren Breiten. Die räumliche Verteilung der Lufttemperatur, die die rechte und linke obere Abbildung 1-4 zeigt, ist durch die Nähe zu Nord- und Ostsee gegeben. Die mittlere vieljährige Lufttemperatur im Zeitraum von 1990 bis 2020 liegt im Winter (Dezember D, Januar J, Februar F) durchschnittlich bei 2,2°C und im Sommer (Juni J, Juli J, August A) bei ca. 16,7°C; ganzjährig bei ca. 9,3°C. Die rechte und linke untere Abbildung 1-4 zeigt die räumliche Verteilung der vieljährigen mittleren Niederschlagssummen über denselben Zeitraum. Die dreimonatigen Niederschlagssummen liegen im Sommer (JJA) bei 250 mm, im Winter (DJF) leicht darunter bei ca. 220 mm und ganzjährig bei ca. 865 mm. Die Auswertung der Windgeschwindigkeit (hier nicht dargestellt) zeigt ein überwiegendes Vorherrschen von westlichen Winden mit mittleren Windgeschwindigkeiten von 5 m/s (schwache Briese) in einer Höhe von 10 m.

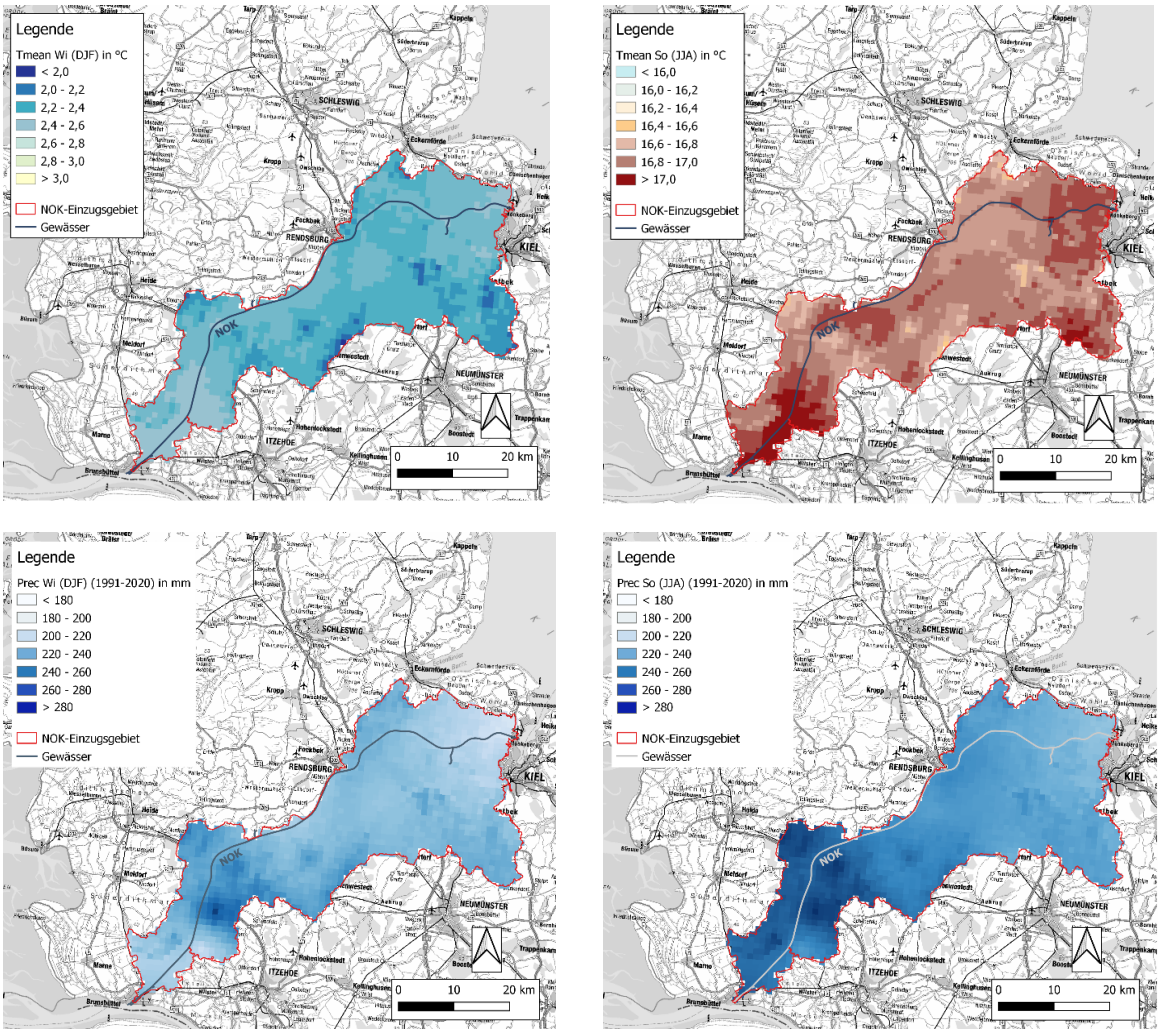


Abbildung 1-4: Oben mittlere Lufttemperatur, unten mittlere dreimonatige Summe des Niederschlages; links jeweils Winter mit den Monaten Dezember, Januar, Februar; rechts Sommer mit den Monaten Juni, Juli, August. Datengrundlagen: Klimaatlas Deutschland, DWD, 1991-2020.

Bei Betrachtung der interannuellen Variabilität für das Bundesland Schleswig-Holstein über 79 Jahre von 1945 bis 2023, dargestellt in Abbildung 1-5, ergibt sich eine durchschnittliche dreimonatige Win-

terniederschlagssumme von 190 mm und Sommerniederschlagssumme von 235 mm. Die Niederschlagshöhen im Sommer sind höher als im Winter; ein signifikanter saisonaler Trend ist nicht erkennbar. Die interannuelle Variabilität der Lufttemperatur über 79 Jahre von 1945 bis 2023 zeigt vieljährige Dreimonatsmittelwerte im Winter von 1,5°C und im Sommer von 16,6°C. Kalte Winter mit mittleren Temperaturen unter - 2 °C traten 1946/47, 1962/63, 1969/70 und 1995/96 auf. Warme Winter mit mittleren Temperaturen über 5 °C traten in 2006/07 und 2019/20 auf. Die wärmsten Sommer mit mittleren Temperaturen über 18°C gab es in jüngerer Vergangenheit 1997, 2003, 2006 und 2018. Es ist ein ansteigender Trend der Lufttemperatur zu erkennen. Die interannuelle Variabilität der Sonnenscheindauer über 72 Jahre von 1952 bis 2023 zeigt 140 Sonnenstunden im vieljährigen 3-Mo-Mittel im Winter und 660 Sonnenstunden im Sommer. Die Anzahl der Sonnenstunden im Winter ist damit mehr als 2/3 geringer als im Sommer. Es ist keine zeitliche Veränderung über die Jahre im Sommer oder Winter erkennbar.

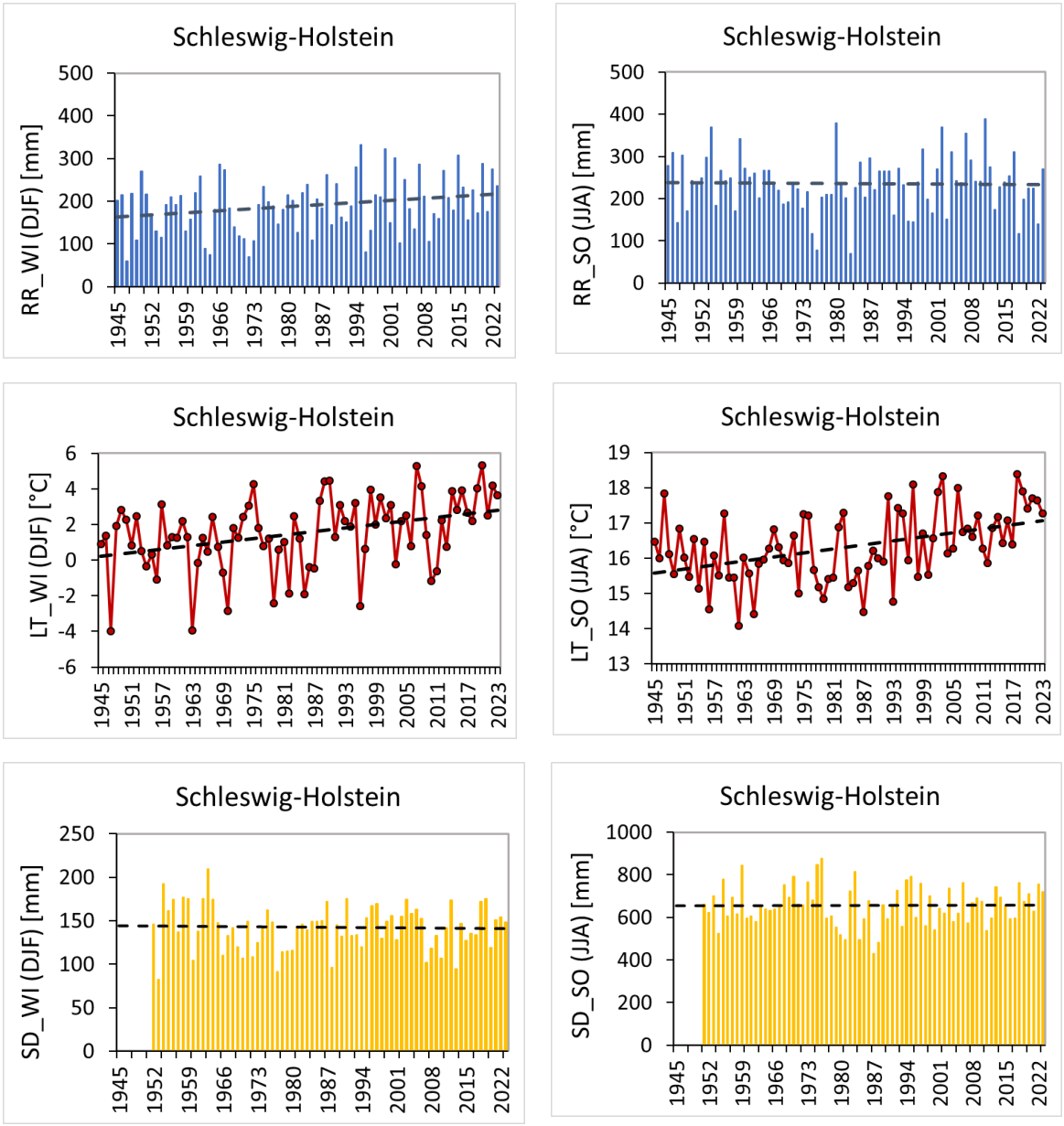


Abbildung 1-5: Interannuelle Variabilität über verschiedene Zeiträume für die Klimagrößen Niederschlag (RR, oben), Lufttemperatur (LT, Mitte) und Sonnenscheindauer (SD, unten). Winter (WI) mit den Monaten Dezember, Januar, Februar jeweils linke Abbildung, Sommer (SO) mit den Monaten Juni, Juli, August jeweils rechte Abbildung.

Die Abbildung 1-6 zeigt die interannuelle Variabilität des Niederschlages und der Lufttemperatur für die nahe des Zentrums des Gebiets liegende Station Rendsburg über die beiden Klimanormalperioden 1961 bis 1990 (links) und 1991 bis 2020 (rechts). Der monatliche Niederschlag in der Klimanormalperiode von 1961 bis 1990 liegt bei 71 mm/ mon und in der Klimanormalperiode von 1991 bis 2020 bei 73 mm/ mon. Die mittlere Lufttemperatur hat ihr Maximum im Juli und ihr Minimum im Januar. Die mittlere Lufttemperatur in der Klimanormalperiode von 1961-1990 liegt bei 8,2 Grad C und in der Klimanormalperiode von 1991-2020 bei 9,3 Grad C.

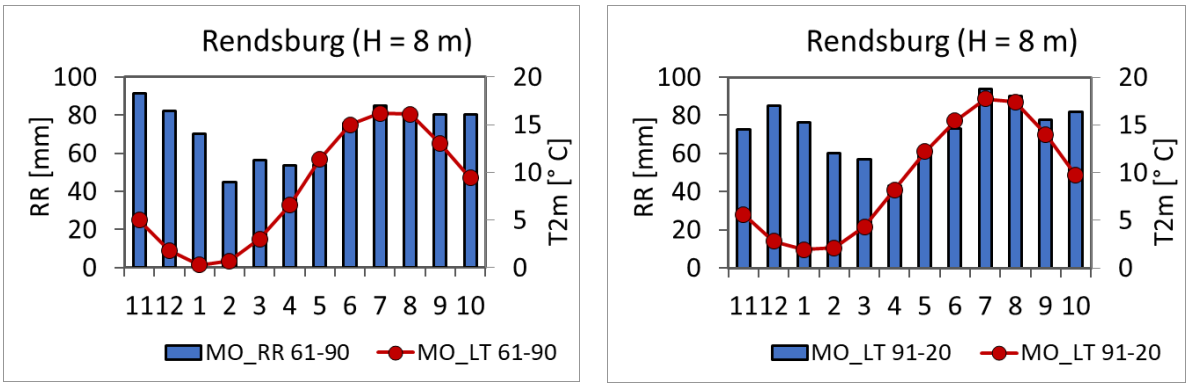


Abbildung 1-6: Verteilung von monatlichem (MO) Niederschlag (RR) und Lufttemperatur (LT) an der Station Rendsburg innerhalb eines Jahres. Klimanormalperiode 1961 bis 1990 (links) und 1991 bis 2020 (rechts). Datengrundlage: DWD

Im Ergebnis der Analyse der Klimagrößen kann festgehalten werden, dass deren räumliche klimatische Gradienten vergleichsweise schwach ausgeprägt sind und tendenziell einen West-Ost-Verlauf aufweisen. Der Grund hierfür ist die topographische Struktur: Die Nordseeküsten und die Marschen, die sich im westlichen Bereich des Gebiets befinden, liegen knapp über und teilweise auch unter dem Meeresniveau. Nach Osten ragen aus dem Tiefland und den Niederungsgebieten die Geesthügel hervor, an die sich die Höhenzüge des schleswig-holsteinischen Hügellandes mit bis zu ca. 50 m über NHN anschließen.

An die Analyse der Klimagrößen schließt sich die Auswertung der Wasserhaushaltsgrößen Verdunstung und Abfluss an.

Die Klimagrößen Lufttemperatur, Sonnenscheindauer / Globalstrahlung, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Luftdruck sind erforderlich, um die klimatische Wasserbilanz aufstellen zu können. Diese ist ein Maß für die Wasserverfügbarkeit und ergibt sich aus der Differenz von Niederschlag und potenzieller Verdunstung. Die potenzielle Grasreferenzverdunstung[4] liegt im Zeitraum der Klimanormalperiode bei ca. 536 mm/Jahr. Eine hohe Wasserverfügbarkeit im Gebiet sowie die hohen Anteile an landwirtschaftlichen Flächen führen zu einer relativ hohen realen (auch aktuellen) Verdunstung[5], die bei 502 mm/ Jahr liegt. Die Abbildung 1-7 zeigt die räumliche Verteilung der potentiellen Verdunstung (links) und der realen (tatsächlichen) Verdunstung (rechts).

[4] Die potentielle Verdunstung (Evapotranspiration = Evaporation und Transpiration) ist nach DIN 4049 definiert als Verdunstungshöhe in mm eines einheitlichen, niedrigen Pflanzenbestandes bei gegebenen meteorologischen Bedingungen und unbegrenzt verfügbarem Wasseräquivalent. Als international einheitlicher Standard zur Berechnung der potentiellen Verdunstungshöhe gilt die Gras-Referenzverdunstung (ALLEN et al. 1994), die auf dem Penman-Monteith-Modell beruht

[5] Die reale Verdunstung ist die Verdunstung von Oberflächen bei gegebenen meteorologischen Bedingungen, also bei tatsächlichem Wasservorrat im Boden.

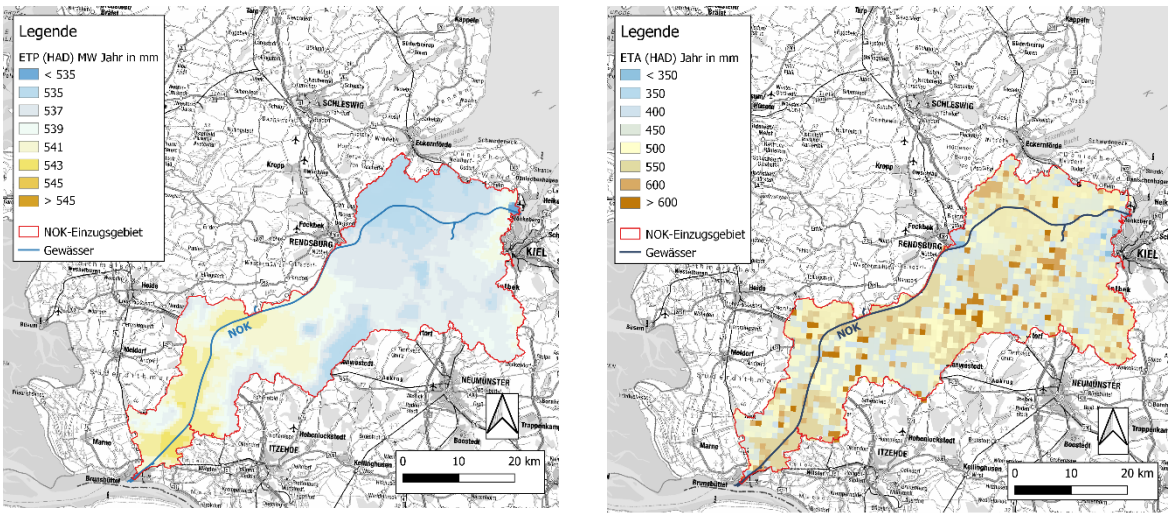


Abbildung 1-7: Räumliche Verteilung der mittleren jährlichen potenziellen (links) und realen Verdunstung (rechts) in der Klimanormalperiode von 1961 bis 1990. Quelle: BMUKN (2003)

Die klimatische Wasserbilanz liegt damit bei 377 mm (korrigierter Jahresniederschlag = 913 mm, potenzielle Grasreferenzverdunstung = 536 mm). Die Abflusshöhe ist die Differenz aus dem korrigierten Jahresniederschlag und der realen Verdunstung. Sie beträgt im Mittel über den Zeitraum von 1961 bis 1990 411 mm im Jahr (korrigierter Jahresniederschlag = 913 mm, reale Verdunstung = 502 mm). Deren räumliche Verteilung zeigt Abbildung 1-8.

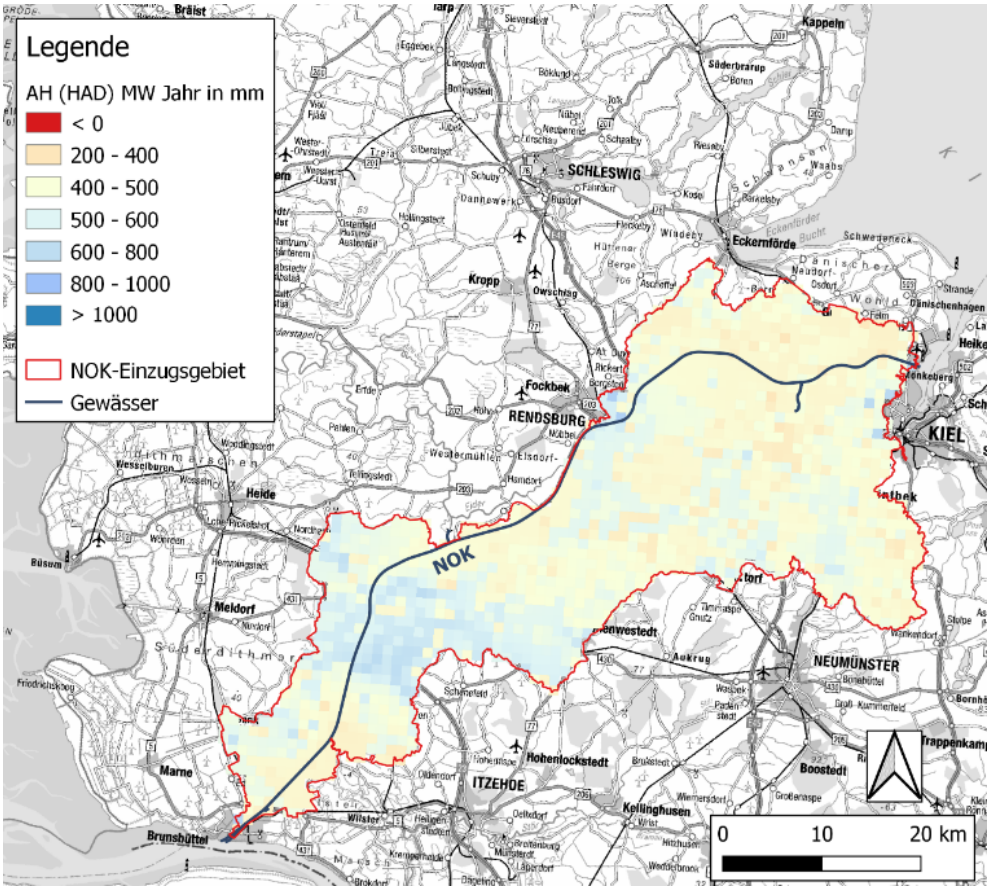


Abbildung 1-8: Räumliche Verteilung der Abflusshöhe in mm/a über die Periode von 1961 bis 1990.

Im Ergebnis der Auswertungen der Wasserhaushaltsgrößen kann festgehalten werden, dass die reale Verdunstung mit 502 mm / Jahr relativ nahe an der potenziellen Verdunstung mit 536 mm / Jahr liegt.

1.2 Modellinstrumentarium

1.2.1 Kanal: BEWASYS NOK

Für die Simulation der langfristigen Wasserbewirtschaftung, mit Steuerung auf einen Zielwasserstand im Kanal unter Ausnutzung der Entwässerungsanlagen an den Kanalenden als Regelorgane, wurde das Bilanzierungs- und Steuerungsmodell BEWASYS NOK, basierend auf dem Modellsystem BEWASYS (Preuß, 2010) aufgebaut. Das Modell simuliert im Stundenzeitschritt die Entwässerungsmengen entsprechend eines vorgegebenen funktionalen Zusammenhanges zwischen den Wasserstandsdifferenzen der Betriebs- und Außenpegel[6] und der Höhe der Entwässerungsleistung. Für die ausführliche Beschreibung wird auf den Bericht BfG-2009 (BfG, 2020) verwiesen.

Das Modell BEWASYS NOK wurde in der Projektphase 2 hinsichtlich der Eingangszeitreihen aktualisiert, der Simulationszeitraum verlängert, anhand der kritischen Bewirtschaftungsereignisse (siehe Kapitel 1.1.1) plausibilisiert und für die Untersuchungen zum Klimawandel angewendet.

1.2.2 Kanal: SOBEK NOK

Für die operationelle Vorhersage (kurzfristige Wasserbewirtschaftung, Vorhersagezeitraum bis zu 5 Tage) wurde – ebenso wie in der Phase 1 - das eindimensionale hydrodynamische Modell SOBEK NOK als Bestandteil eines operationellen Vorhersagesystems für den NOK aufgebaut, kalibriert und validiert (aktuell noch in der Testphase). Die Steuerung erfolgt vergleichbar zu BEWASYS NOK auf einen konstanten Zielwasserstand, wobei die Entwässerung über die Regelorgane (im Gegensatz zu BEWASYS NOK) explizit hydrodynamisch simuliert wird. Für die ausführliche Beschreibung wird an dieser Stelle auf den Bericht BfG-2009 (BfG, 2020) verwiesen. Das Modell wurde in der Projektphase 2 hinsichtlich der Eingangszeitreihen aktualisiert, der Simulationszeitraum verlängert und anhand der kritischen Bewirtschaftungsereignisse (siehe Kapitel 1.1.1) plausibilisiert.

1.2.3 Einzugsgebiet: HydPy NOK

Für die Simulation des Zuflusses aus dem 1 530 km² großen Einzugsgebiet unter beobachteten und projizierten (Klimawandel) Randbedingungen wurde in der Projektphase 1 das Wasserhaushaltsmodell LARSIM NOK (basierend auf dem Modellsystem LARSIM, Bremicker, 2000) aufgebaut. Modellaufbau, -kalibrierung / -validierung erfolgten in Form einer Auftragsvergabe, die 2015 abgeschlossen wurde. Das Wasserhaushaltsmodell wurde als Rastermodell mit einer räumlichen Auflösung von 1 x 1 km² und einer zeitlichen Diskretisierung von 1 Tag aufgebaut. Für einzelne Teilgebiete im westlichen Einzugszugsgebiet wurde auch ein Stundenwertmodell aufgebaut, um erarbeiten zu können, ob modelltechnische Unsicherheiten in der Abflussmodellierung (z.B. Unterschätzungen von Hochwasserscheiteln) prozess- oder zeitschrittbedingt waren (Details hierzu im nächsten Absatz).

Die Wasserhaushaltssimulationen im östlichen Einzugsgebiet zeigten mit LARSIM NOK Probleme im Niedrigwasserbereich häufig in Form von Überschätzungen des Abflusses. Dies ließ sich in erster Li-

[6] Brunsbüttel bzw. Kiel-Holtenau

nie auf die unzureichende Erfassung der Seensteuerung im Modell zurückführen. Problematisch waren hier zum Teil auch die Abflussmessdaten als Referenz (erhöhte Unsicherheiten im Niedrigwasserbereich). Die Wasserhaushaltssimulationen im Bereich NOK-West unterschätzten (sowohl bei täglicher als auch stündlicher Diskretisierung) die beobachteten Hochwasserscheitelabflüsse systematisch, insbesondere bei den Winterabflüssen im Bereich der hohen Geest.

Diese erkannten Defizite sollten behoben werden. Daher wurde von September 2019 bis Mai 2021 das Tageswertmodell LARSIM NOK weiterentwickelt: Im Rahmen der Modell-Weiterentwicklung wurden die LARSIM-Modelle aktualisiert und in das Modellframework HydPy überführt. Das resultierende Modell HydPy-L-NOK (L = LARSIM) wurde sowohl für die Tagesschrittweite als auch für die Stundenschrittweite flächendeckend kalibriert. Hierbei wurde geprüft, ob die bestehenden Simulationsdefizite im Rahmen der LARSIM-Konzeption reduzierbar sind. Zusätzlich wurde als Pilotmodell mit HydPy-W-NOK (W = WALRUS) ein alternativer Modellansatz getestet, welches den Bodenwasserhaushalt und die Grundwasser-Oberflächenwasser-Interaktion analog zum WALRUS-Modellsystem abbildet. Die WALRUS-Konzeption (Brauer et al., 2014) zielt auf die Abbildung hydrologischer Prozesse in Flachlandgebieten mit geringen Flurabständen ab und unterscheidet sich somit signifikant von LARSIM, dessen Modellkonzeption eher auf die Abbildung mittelgebirgstypischer Prozesse fokussiert ist. Die Weiterentwicklung der Modelle wurde vom Ingenieurbüro Björnsen Beratende Ingenieure im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde durchgeführt.

Die Modellerweiterungen sowie die Modellanwendung sind in Berichten dokumentiert. Projektbericht und Ergänzungsbericht: „Weiterentwicklung des Wasserhaushaltsmodells für den Nord-Ostsee-Kanal unter Verwendung des Modellframeworks HydPy“ (Björnsen Beratende Ingenieure GmbH, 2021).

1.3 Modellkalibrierung / Modellvalidierung / Modellplausibilisierung

1.3.1 Modellkalibrierung / Validierung: HydPy L- NOK

Die Kalibrierung erfolgte parallel, das heißt, dass mehrere Bereiche zugleich kalibriert wurden. Damit ging eine immense Vergrößerung des zu betrachtenden Parameterraumes einher, aber auch eine Zunahme an Gestaltungsmöglichkeiten, weshalb dieser Variante (im Vergleich zur sequentiellen Kalibrirung) der Vorzug gegeben wurde. Eine parallele Kalibrierung großer Modelle ist mit vertretbarem Arbeitsaufwand jedoch nur auf algorithmischem Wege möglich. Zum Einsatz kam das Optimierverfahren BOBYQA (Powell, M. J. D. (2009)). BOBYQA ist ein lokales Optimierverfahren, das einen vorgegebenen Startparametersatz sukzessive in Richtung der stärksten Verbesserung des definierten Gütekriteriums modifiziert.

Für die Übertragung der Kalibrierparameter auf die messtechnisch nicht erfassten Gebiete wurde ein naturraumspezifischer, zweistufiger Ansatz gewählt: Im ersten Schritt (Grobkalibrierung) wurden den Selektionen für die Naturräume Hohe Geest, Vorgeest und östliches Hügelland ein jeweils eigenständiger Satz an Kalibrierparametern zugeordnet. Diese drei Parametersätze wurden parallel mit BOBYQA kalibriert. Als Gütekriterium diente der arithmetische Mittelwert der für alle Abflussmesspegel bestimmten Effizienz nach Nash und Sutcliffe. Als Ergebnis lagen naturraum-spezifische Werte der Kalibrierparameter vor, die zwar hinsichtlich der Simulationsgüte in den beobachteten Gebieten nicht optimal, hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf die unbeobachteten Gebiete aber als robust anzusehen waren.

Der zweite Schritt („Feinkalibrierung“) diente der Verfeinerung der Simulationsgüte in den beobachteten Bereichen. Hier erfolgte zunächst eine flächengewichtete Mittelung der naturraum-spezifischen Kalibrierparameter auf die beobachteten Pegelkontrollbereiche. Diese wurden, soweit möglich, mit BOBYQA besser an die lokalen Bedingungen angepasst. Auch dieser Schritt erfolgt parallel, allerdings nur für die ineinander entwässernden Pegelkontrollbereiche.

Da für die Marsch keine Abflussmessungen vorlagen, ließ sich dieser Naturraum mit der soweit beschriebenen Methodik nicht behandeln. Es wurde eine Übertragung der für die Hohe Geest erzielten Parametersätze behelfsmäßig auf die Teilgebiete der Marsch gewählt.

Sowohl die Kalibrierung als auch die Validierung erfolgten grundsätzlich über eine kontinuierliche Simulationsrechnung (im Gegensatz zur Ereignissimulation) und, soweit vorhanden, unter Weiterleitung simulierter Oberliegerzuflüsse (im Gegensatz Weiterleitung gemessener Abflusszeitreihen). Dies entspricht dem operativen Anwendungsfall.

Der acht Abflussjahre umfassende Kalibrierzeitraum startet am 1.10.2007 und endet am 30.09.2015. Die Abflussjahre 2006 und 2007 dienen als Einschwingphase. Die Validierung erfolgt getrennt für drei Zeiträume:

- Validierzeitraum 1: vom 1.11.1998 bis zum 31.10.2001
- Validierzeitraum 2: vom 1.11.2001 bis zum 30.09.2007
- Validierzeitraum 3: vom 1.10.2015 bis zum 30.09.2019

Durch die Weiterentwicklung des Modellinstrumentariums für den Wasserhaushalt war es nun möglich, über einen längeren, aktuelleren Zeitraum (einschließlich Februar 2024) Simulationen für den Zufluss aus dem Einzugsgebiet zum Kanal durchzuführen.

Abbildung 1-9 zeigt den mit LARSIM NOK und HydPy-L-NOK-d simulierten Verlauf des Hochwassers Februar 2002 am Pegel Wennbüttel / Hohe Geest. Dargestellt sind folgenden Abflussganglinien:

- gemessen: Messung am Pegel Wennbüttel
- LARSIM original / angepasst: Simulation mit dem originalen bzw. mit dem angepassten LARSIM-NOK-d-Modell (Änderung in den Landnutzungsklassen)
- HydPy überführt: Simulation mit dem Modell HydPy-L-NOK-d, überführt aus dem angepassten LARSIM-NOK-Modell bei unveränderter Parametrisierung
- HydPy kalibriert: Simulation mit dem Modell HydPy-L-NOK-d, mit aktualisierter Parametrisierung.

Die Details zu den verschiedenen Modellparametrisierungen sind dem Bericht von Björnsen Beratende Ingenieure GmbH (2021) zu entnehmen. Sie werden hier nicht explizit aufgeführt, sondern dienen in der grafischen Darstellung als Orientierung für die Güte der einzelnen Modellansätze.

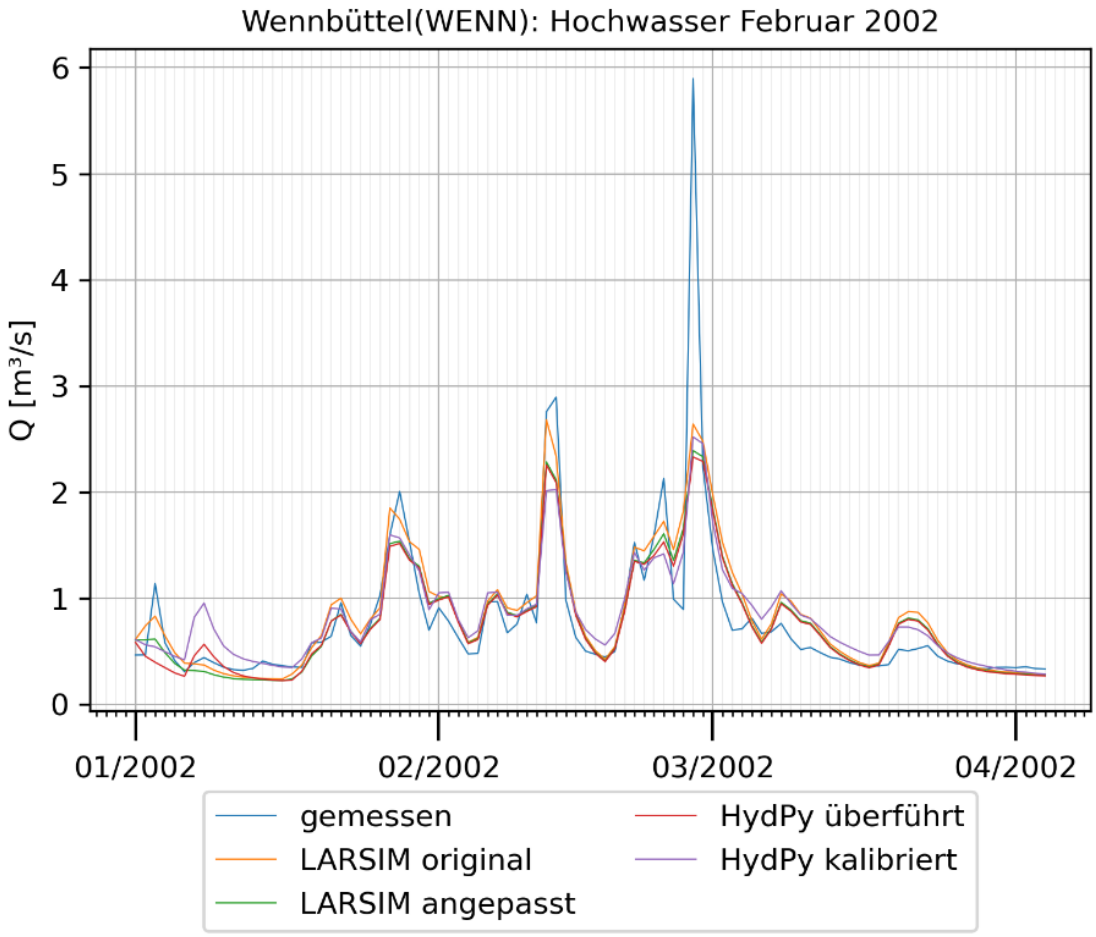


Abbildung 1-9: Hochwasser Februar 2002, Wennbüttel, LARSIM-NOK und HydPy-L-NOK-d

Abbildung 1-9 zeigt, dass der Hochwasserscheitel Ende Februar 2002 von allen Modellen stark und auf sehr ähnliche Weise unterschätzt. Dies weist entweder auf eine Dominanz der Eingangsdatenunsicherheit gegenüber der Modellunsicherheit hin, oder auf ein grundsätzliches Defizit in der LARSIM-Modellstruktur.

Die Anpassung von LARSIM-NOK-d bewirkt einen Rückgang der Scheitelabflüsse. Dieser ist primär auf die Korrektur der Landnutzungsklassen zurückzuführen, die mit einer markanten Verringerung der Versiegelungsgrade einhergeht.

Die Übereinstimmung zwischen LARSIM-NOK-d und HydPy-L-NOK-d ist über weite Teilzeiträume so eng, dass kein erkennbarer Unterschied zwischen den jeweils simulierten Ganglinien vorliegt. Vereinzelt, insbesondere im Vorlauf des Ereignisses, zeigen sich aber größere relative Abweichungen. Hier treten die zwischen den Modellen verbliebenen Unterschiede in der Verdunstungsberechnung gegenüber der besseren Übereinstimmung in anderen Modellkomponenten den Vordergrund (weitere Hintergründe in Björnsen Beratende Ingenieure GmbH (2021)

Die Nachkalibrierung von HydPy-L-NOK-d führt für dieses Ereignis nur zu einer geringen Veränderung der simulierten Ganglinien. Die Hochwasserscheitel liegen unterhalb der Scheitelwerte des originalen LARSIM-NOK-d-Modells. Dies ist aber kein fest wiederkehrendes Muster. Für mehrere andere Hochwasser (z. B. im Oktober 1998) simuliert HydPy-L-NOK-d höhere Scheitelwerte.

Für das in Abbildung 1-10 dargestellte Hochwasser im Januar 2015 liegen keine Simulationsergebnisse für das originale LARSIM-NOK-Modell vor. Die Übereinstimmung zwischen LARSIM-NOK (angepasst) und HydPy-L-NOK-d (überführt) fällt noch zufriedenstellender als für das 2002er Ereignis aus. Im Vergleich zum 2002er Ereignis wirkt sich die Nachkalibrierung viel stärker auf die Simulation der Hauptereignisse aus, insbesondere Ende Dezember 2014 und Mitte Januar 2015. Trotz einer deutlichen Erhöhung der Abflussscheitel liegt weiterhin eine Unterschätzung vor. Diese Unterschätzung ist, wenngleich einzelne Ausnahmen vorliegen, weiterhin als systematisch für die verschiedenen Pegel und Hochwasserereignisse der Hohen Geest anzusehen.

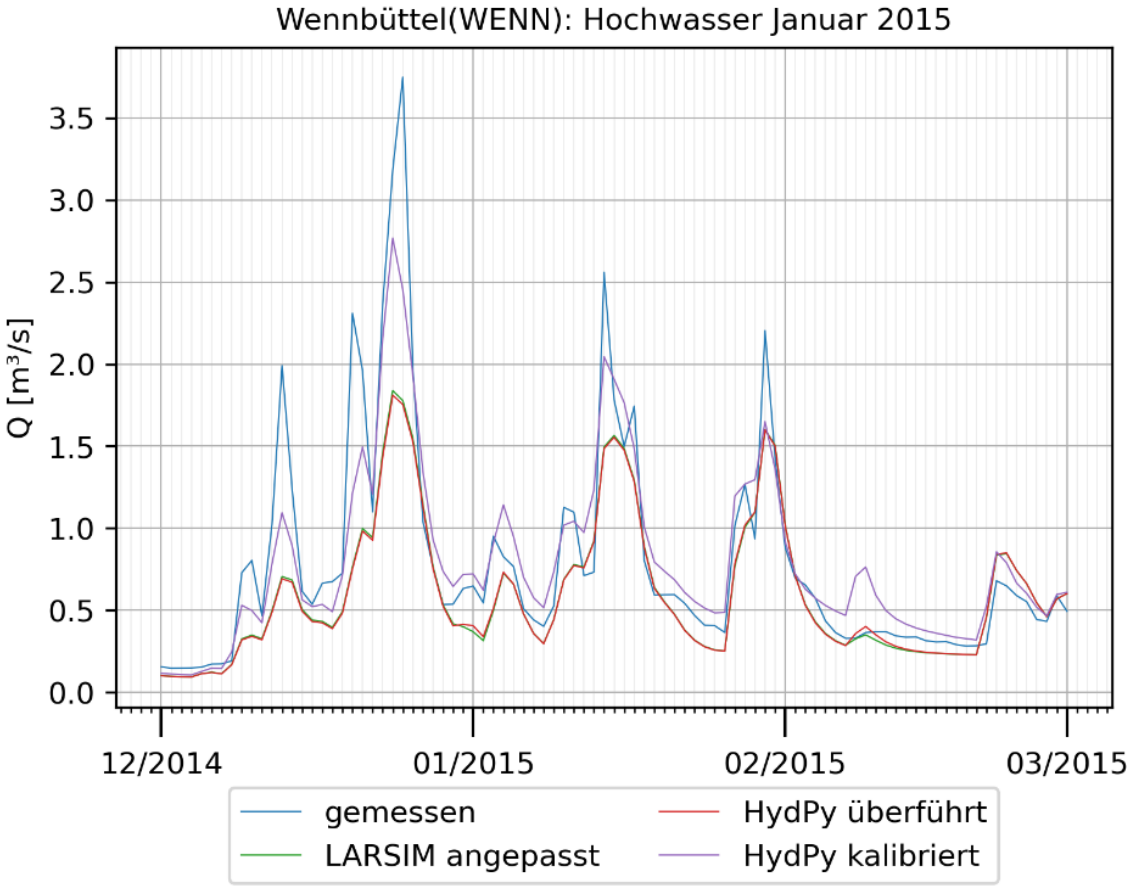


Abbildung 1-10: Hochwasser Januar 2015, Wennbüttel, LARSIM-NOK und HydPy-L-NOK.

Während Pegel Wennbüttel die für die Hohe Geest typischen hoch-dynamischen Abflussreaktionen zeigt, fallen die Abflussganglinien am Pegel Hammer (Abbildung 1-11) deutlich gedämpfter aus. Neben den unterschiedlichen hydrologischen Eigenschaften des Östlichen Hügellandes ist dies auf das größere erfasste Einzugsgebiet und das Vorliegen mehrerer Seen zurückzuführen.

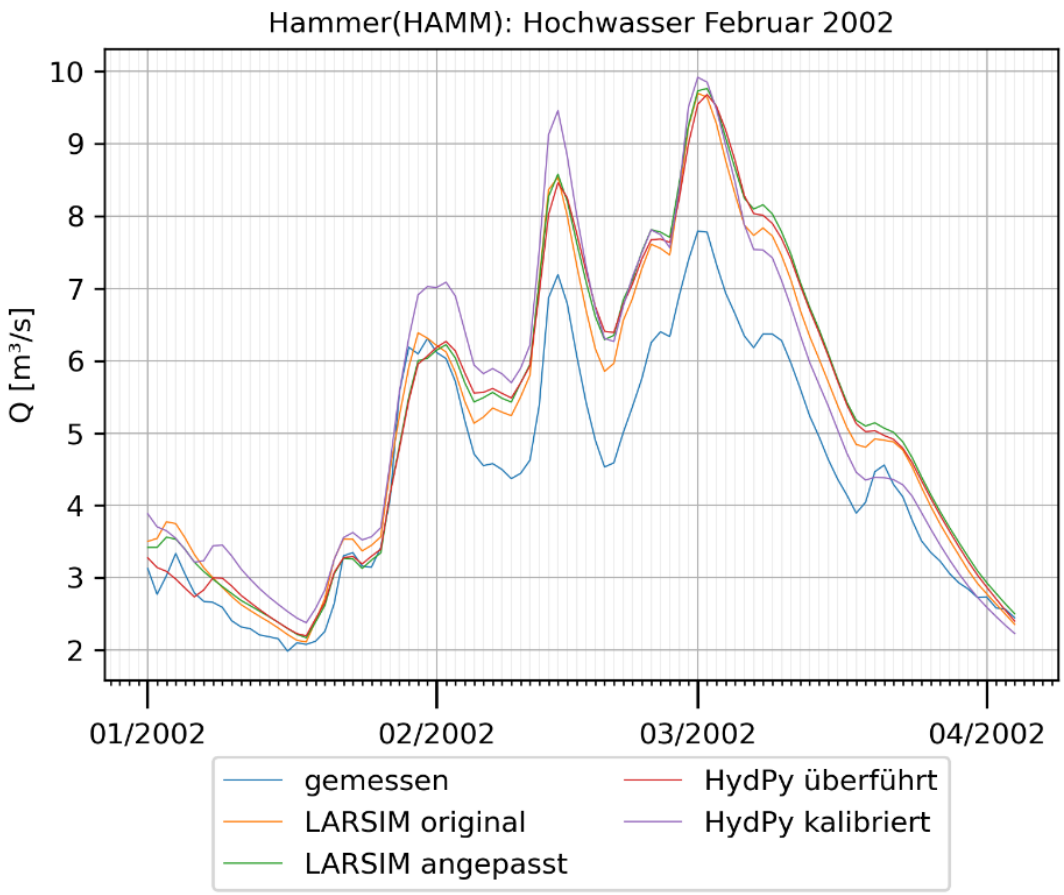


Abbildung 1-11: Hochwasser Februar 2002, Hammer, LARSIM-NOK und HydPy-L-NOK-d

Der Effekt der Anpassung von LARSIM-NOK-d fällt für Pegel Hammer deutlich moderater aus. Die Übereinstimmung von LARSIM-NOK-d und HydPy-L-NOK-d ist bei gleicher Parametrisierung, von Abweichungen im Vorlauf des 2002er Ereignisses abgesehen, sehr befriedigend. Die Abflusserhöhung durch die Nachkalibrierung ist für beide Ereignisse markanter als für Pegel Wennbüttel. 2002 kommt es zu einer zusätzlichen Überschätzung des Abflusses um ca. 1 m³/s Anfang und Mitte Februar, wohingegen der Scheitel Ende Februar weitgehend unverändert simuliert wird. Beim 2015er Ereignis erhöhen sich die Scheitelabflüsse beider Teilereignisse um ca. 3 m³/s und 2 m³/s und nähern sich den gemessen Abflussscheiteln stark an. Wie auch für Pegel Wennbüttel unterscheiden sich die simulierten Hochwasserganglinien in ihrer sonstigen Form nur wenig.

Die vorgenommenen Erweiterungen des HydPy-Frameworks zur Abbildung des Wasserhaushalts des Nord-Ostsee-Kanals analog zum Modell LARSIM-NOK wurden mit zufriedenstellenden Ergebnissen abgeschlossen. Verbleibende modellstrukturelle Unterschiede zwischen LARSIM und HydPy-L können als Ausgangspunkt einer fachlichen Diskussion dienen, von der beide Modellsysteme profitieren. Hinsichtlich der am NOK erreichten Simulationsgüte sind die modellstrukturellen Unterschiede von untergeordneter Bedeutung.

Nach der Anpassung und Korrektur der Modellkonfiguration, der Überführung von LARSIM-NOK in HydPy-L-NOK, der Erstellung eines NOK-weiten Stundenwertmodells und umfangreichen Nachkalibrierungen steht nun ein aktualisiertes, in mancherlei Hinsicht verbessertes Instrumentarium zur Vor-

hersage und Analyse der Abflussverhältnisse am NOK bereit. HydPy-L-NOK ist daher der Modellansatz, der zur Simulation der Zuflüsse aus dem Einzugsgebiet in den Kanal verwendet wurde. Die summarischen Zuflussganglinien zeigt Abbildung 1-12.

1.3.2 Modellvalidierung: BEWASYS NOK, SOBEK NOK

Der Zufluss aus dem Einzugsgebiet bildet die binnenseitige Randbedingung für die Kanalmodellierung ab. Zur Simulation des Gebietszuflusses wurde das Wasserhaushaltsmodell HydPy-L-NOK aufgebaut und angewendet (siehe Kapitel 1.2.3).

Abbildung 1-12 zeigt das Ergebnis der Wasserhaushaltsmodellierung, d.h. die Simulation des Gesamtzuflusses zum Kanal im Zeitraum von Januar 2012 (also fortschreibend die Modellierung aus NOK Phase 1) bis Februar 2024 und im Vergleich dazu die auf Basis von Beobachtungswerten regionalisierten Gesamtzuflussreihen.

Zur deutlichen Darstellung der Ganglinien wurde der Gesamtsimulationszeitraum in drei Zeitabschnitte unterteilt: Januar 2012 bis Dezember 2015, Januar 2016 bis Dezember 2019 und Januar 2020 bis Februar 2024. Die Farbwahl mit „Dunkel – und Hellblau“ für die regionalisierten Ganglinien und „Oliv“ für die mit HydPy NOK simulierte Zuflussreihe orientiert sich ebenso an der Darstellung im Bericht NOK 1, und wird im gesamten Bericht beibehalten.

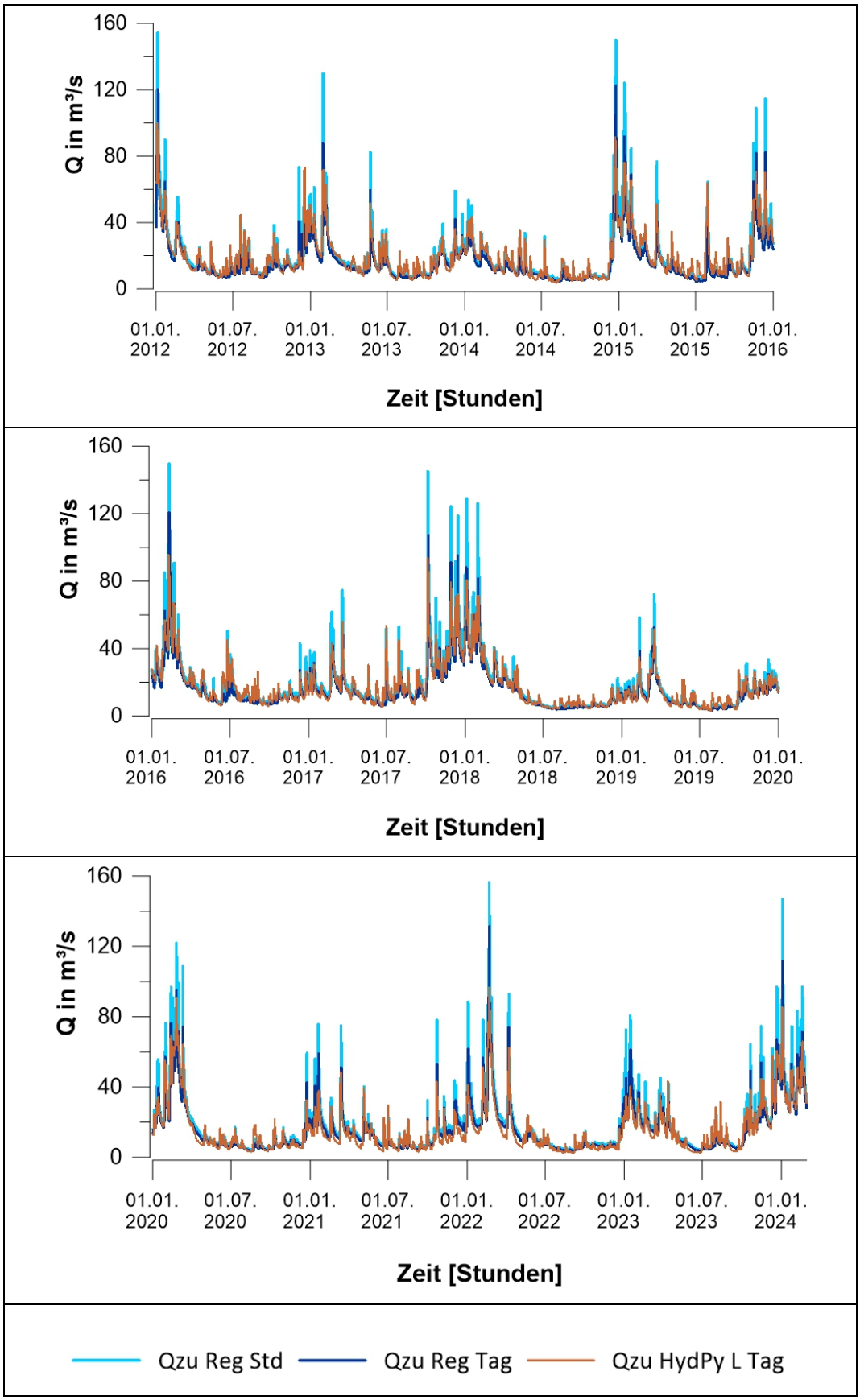


Abbildung 1-12: Gesamtzufluss zum NOK von 2012 bis 2024 ermittelt über die Wasserhaushaltssimulation auf der Basis von HYRAS-Daten bis 2020 und anschließend unter Nutzung von Metstat für den meteorologischen Input (Modell: HydPyL-NOK, Tag). Ergänzend ist eine Zuflussregionalisierung anhand von beobachteten Abflusspegeldaten auf Tages- und Stundenwertbasis dargestellt (REG Qzu Tag bzw. REG Qzu Std).

Abbildung 1-13 zeigt die mittleren mit HydPy-L-NOK simulierten Jahreszuflüsse aus dem Einzugsgebiet zum Kanal über den Zeitraum von 2012 bis 2023. Ausgewertet wurden jeweils die Wasserhaushaltsjahre; die Variabilität zwischen den Jahren ist gut zu erkennen. Der mittlere Zufluss zum Kanal beträgt ca. 17 m³/s, mit einer Spannweite von 11 m³/s (Minimum der Jahreswerte) bis 23 m³/s (Maximum der Jahreswerte).

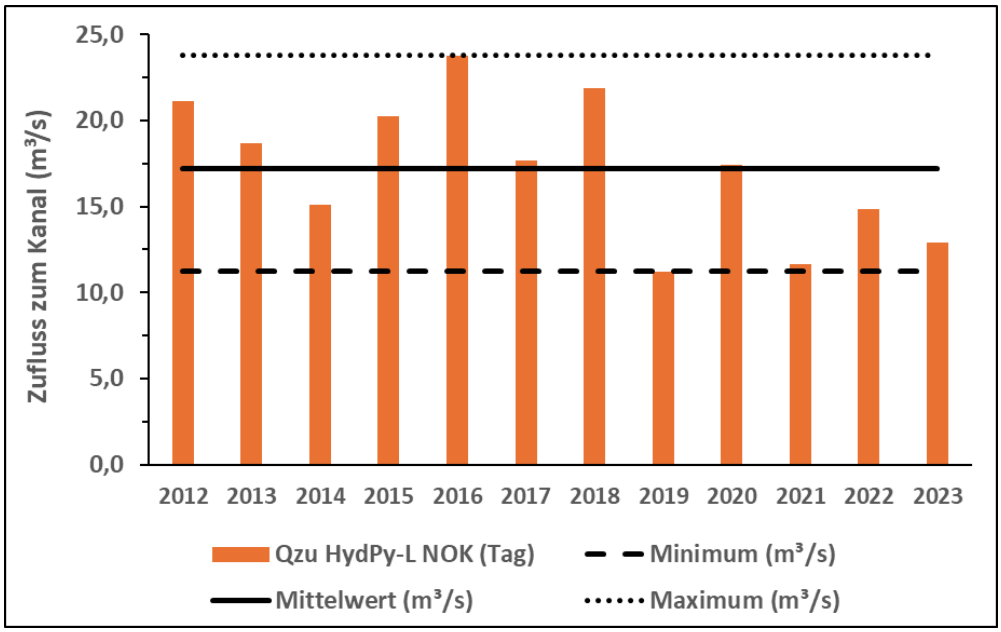


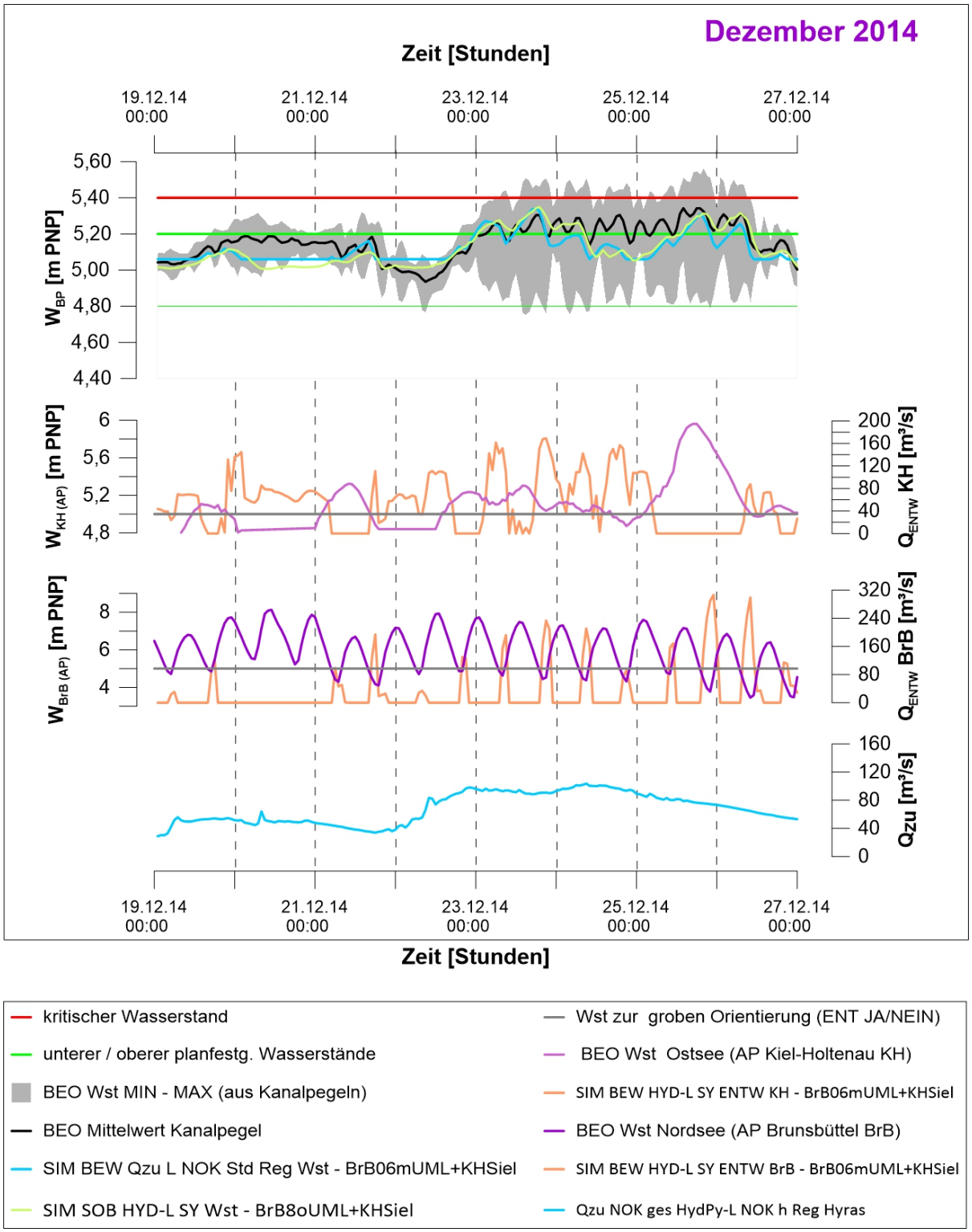
Abbildung 1-13: Gesamtzufluss zum NOK von 2012 bis 2024 ermittelt über die Wasserhaushaltssimulation mit HydPy-L-NOK (Tag).

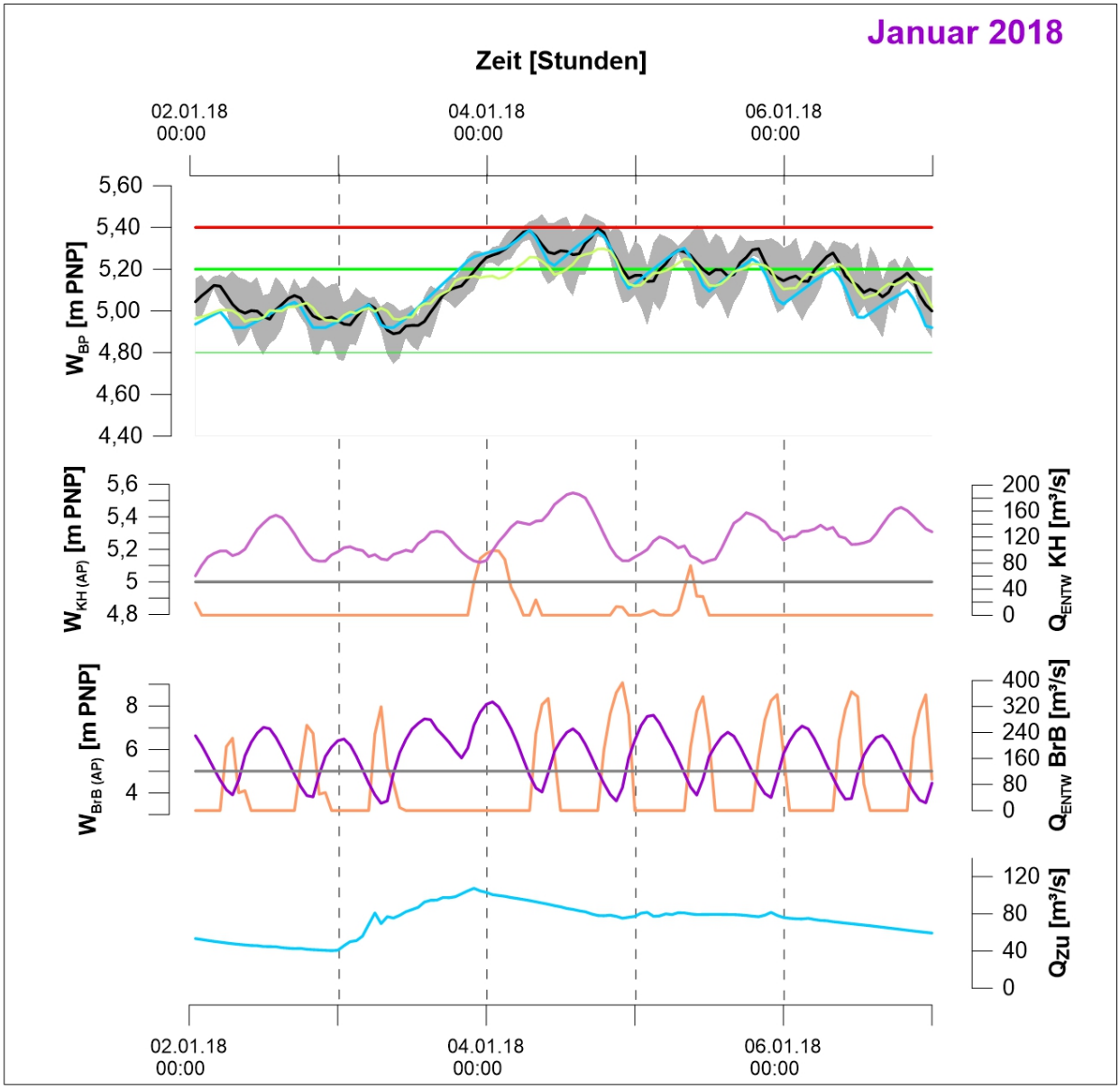
Die Überprüfung der Sensitivität der mit HydPy-L-NOK simulierten Zuflussreihe auf die Simulation der Kanalbewirtschaftung erfolgte ereignisbasiert, bezogen auf kritische Bewirtschaftungssituationen, in denen der Kanalwasserstand über 5,40 m PNP steigt und die Schifffahrt im Längsverkehr eingestellt werden muss. Anhand von drei kritischen Ereignissen in der Kanalbewirtschaftung (Dezember 2014 Nr. 1, Januar 2015 Nr. 4 und Januar 2024 Nr. 7) wurde gezeigt, dass sowohl das Steuermodell BEWASYS NOK als auch das hydraulische Modell SOBEK NOK die kritischen Bewirtschaftungssituationen im Kanal gleich gut abbilden. Die Abbildung 1-14 zeigt die Simulationsergebnisse für alle drei Ereignisse. Folgende Erkenntnisse zeigen sich:

- **Dezember 2014**. Beide Modelle zeigen eine befriedigende Abbildung des mittleren beobachteten Anstiegs des Ereignisses vom 22.12. zum 23.12. und im weiteren Verlauf bis zum 24.12.; fortsetzend zeigt sich ein Absunk der simulierten Wasserstände zum 25.12. mit dem Ziel der Steuerung auf den mittleren Kanalwasserstand und einer Entwässerung in die Ostsee; bis zum 26.12. erfolgt ein Wiederanstieg der simulierten Kanalwasserstände durch eine fehlende Entwässerungsmöglichkeit in die Ostsee.

- **Januar 2018.** Beide Modelle zeigen eine befriedigende Abbildung der mittleren beobachteten Wasserstände bis zum 4.01.; die Simulation mit SOBEK unterschätzt den mittleren beobachteten Scheitel stärker als die Simulation mit BEWASYS; zum Ende des Ereignisses drehen sich diese Verhältnisse um – der mittlere beobachteten Wasserstand wird mit SOBEK besser nachgebildet als mit BEWASYS.

- **Januar 2024.** Beide Modelle bilden die mittleren Abflussbeobachtungen bis zum 3.01. gut ab und simulieren den Anstieg befriedigend. Im Abschluss des Ereignisses liegen beiden Modellsimulationen jedoch fast außerhalb der Spannweite der Pegelbeobachtungen, was darauf schließen lässt, dass in der Praxis einer anderen als im Modell angenommenen Entwässerungsstrategie gefolgt wird.





kritischer Wasserstand	Wst zur groben Orientierung (ENT JA/NEIN)
unterer / oberer planfestg. Wasserstände	BEO Wst Ostsee (AP Kiel-Holtenau KH)
BEO Wst MIN - MAX (aus Kanalpegeln)	SIM BEW HYD-L SY ENTW KH - BrB08mUML+KHSiel
BEO Mittelwert Kanalpegel	BEO Wst Nordsee (AP Brunsbüttel BrB)
SIM BEW Qzu L NOK Std Reg Wst - BrB08mUML+KHSiel	SIM BEW HYD-L SY ENTW BrB - BrB08mUML+KHSiel
SIM SOB HYD-L SY Wst - BrB8oUML+KHSiel	Qzu NOK ges HydPy-L NOK h Reg Hyras

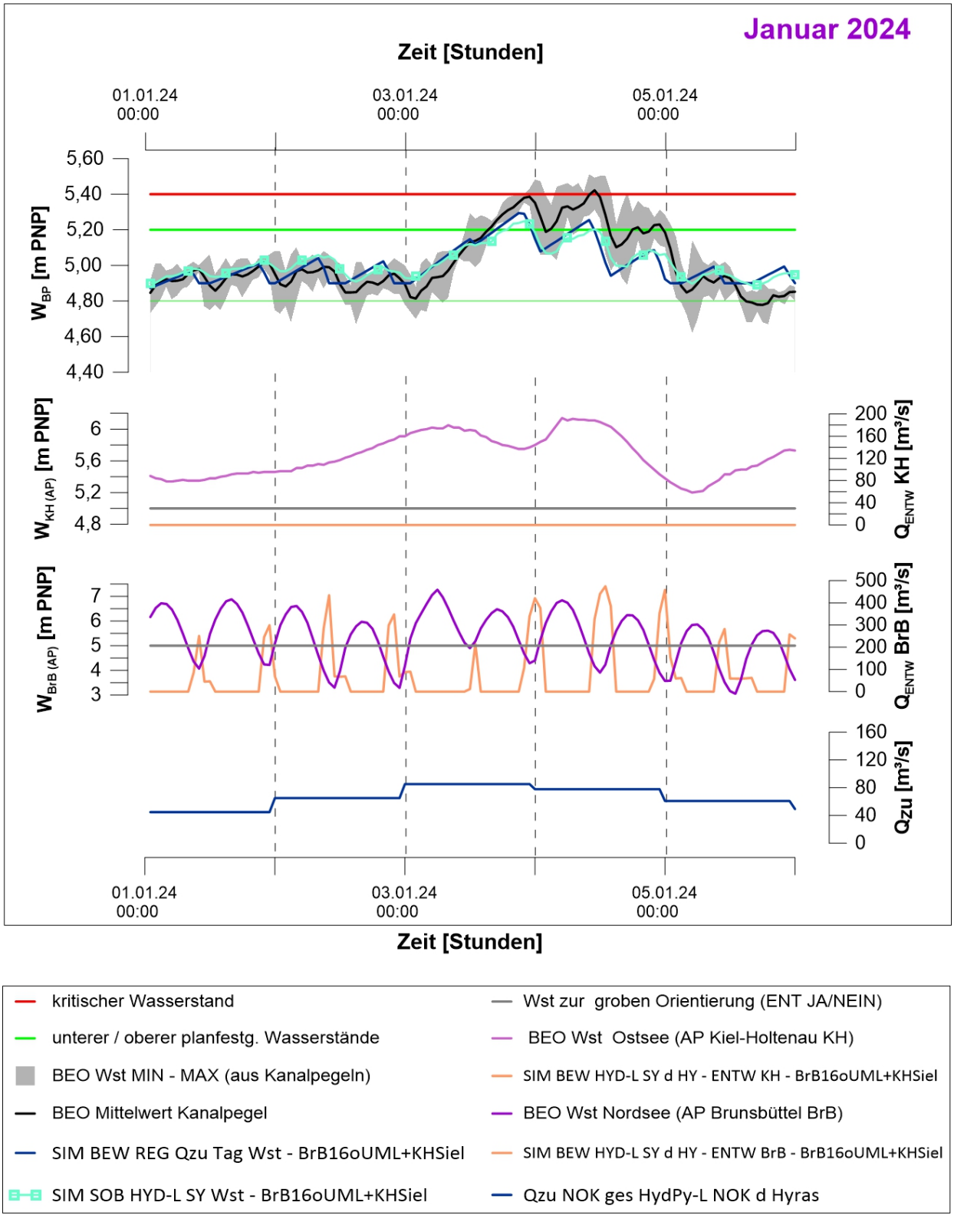


Abbildung 1-14: Simulation der Wasserstände im Kanal. Die Mittelung der Wasserstände im Kanal erfolgte über die verfügbaren Aufzeichnungen an den Pegeln (keine Berücksichtigung der Wasserstände am Pegel Rendsburg, da diese Daten im Zeitpunkt der Untersuchungen nicht vorlagen). Zuflussimulation mit HydPy-L-NOK Heusel, L. (2023)

Die befriedigende Simulationsgüte lässt den Schluss zu, dass das Modellinstrument BEWASYS NOK geeignet ist für den Einsatz in den geplanten Untersuchungen zu den Auswirkungen des Klimawandels und von baulichen Veränderungen auf die Kanalbewirtschaftung. Ebenso können damit Anpassungsmaßnahmen modelliert werden.

Ebenso wird eingeschätzt, dass das Modellinstrument SOBEK NOK für ereignisbezogene Simulationen sowie für kurz- bis mittelfristige Prognosen geeignet ist. Bauwerkssteuerungen können explizit im Modell nachgebildet werden.

Beide Modelle haben ihre Berechtigung aufgrund unterschiedlicher Einsatzbereiche und sollten daher für zukünftige Anwendungen stets einsatzbereit gehalten werden.

1.4 Bewirtschaftung des NOK unter Klimawandel

1.4.1 Methodik

Aufbauend auf den Erkenntnissen in NOK Phase 1, in denen die klimawandelbedingten Auswirkungen auf die Wasserbewirtschaftung des NOK – ermittelt über die Anzahl kritischer Bewirtschaftungssituationen, die einen Wasserstand von 5,40 m PNP überschreiten – durch Sensitivitätsanalysen betrachtet wurden, folgen die aktuellen Arbeiten in NOK Phase 2 einem anderen Ansatz: Für die Stationen Brunsbüttel und Kiel-Holtenau sollen physikalisch begründete Zeitreihen des projizierten Meeresspiegelanstiegs und für die Binnenhydrologie hierzu konsistent verwendet werden. Die erforderlichen Daten sind meeresseitige Wasserstände und für die Binnenhydrologie Niederschlag, Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Sonnenscheindauer / Globalstrahlung, relative Luftfeuchte und Luftdruck. Die Bereitstellung der Daten erfolgte über den DAS-Basisdienst des BSH (Ehlers et al, 2023).

Diese Daten wurden erzeugt mit dem numerischen Ozeanmodell HIROMB-BOOS-Modell (HBM). Ehlers et al (2023, vgl S.1 ff) erläutert hierzu: „Das HBM ist ein regionales 3D-Ozeanmodell zur Beschreibung des physikalischen Zustands von Nord- und Ostsee. Für die Berechnung der beschriebenen Klimaprojektionen wurde in Kooperation mit dem Danmarks Meteorologiske Institut (DMI) die Konfiguration des DMI in der Modellversion HBM-2.8 verwendet (Su, 2022). Diese Konfiguration beruht auf der operationellen Version des DMI zur Sturmflutvorhersage (https://ocean.dmi.dk/models/hbm.uk.php), was ein gut erprobtes und validiertes System garantiert. Die Validierung der Sturmflutvorhersage beinhaltet eine Online-Validierung und Fallstudien (http://ocean.dmi.dk/validations/surges/index.uk.php). Die Gitter-Auflösung für die Nord- und Ostsee liegt bei ca. 5,5 km, 50 Schichten, für die Deutsche Bucht: ca. 1,8 km, 24 Schichten und für die Region Kattegat, dänische Straßen und westliche Ostsee: 900 m, 52 Schichten. Die beiden hochaufgelösten Modellregionen „Deutsche Bucht“ und „Kattegat, dänische Straßen und westliche Ostsee“ wurden interaktiv gekoppelt mit der Modellregion „Nord- und Ostsee“ gerechnet. Am offenen Modellrand (nördliche Nordsee und englischer Kanal) werden Gezeiten aus 17 Partialkonstituenten, sowie eine Windstauwelle aus dem BSH-Nordatlantikmodell und klimatologische Werte für Temperatur und Salzgehalt vorgegeben. Das Modell wurde ohne Meeresspiegelanstieg gerechnet und beinhaltet keine Landsenkung-/hebung.“

Sowohl Meeresspiegelanstieg als auch Landsenkung-/ hebung wurden ergänzend wie folgt berücksichtigt (Ehlers et al (2023, vgl S.1 ff):

- Der **Meeresspiegelanstieg** wurde nachträglich über das Sea Level Projection Tool der NASA[7] berücksichtigt. Dieses Tool ist im Internet frei verfügbar und stellt auf Grundlage des IPCC6 Werte (beispielsweise für Cuxhaven) für den Meeresspiegelanstieg in 10-Jahres-Schritten ab 2020 für die verschiedenen Emissionsszenarien bereit. Für die Stationen wurde jeweils ein lokaler Meeresspiegelanstieg angenommen. Das bedeutet, dass die regionalisierten Werte für die Stationen für den Meeresspiegelanstieg in 10-Jahres-Schritten zwischen 2020 und 2150 verwendet und für die gesamte Zeitreihe zehnminütig interpoliert wurden. Dabei wurden die Werte des 83. Perzentils im SSP5-85 genutzt, um Konsistenz mit der aktuellen Verfügung zur Berücksichtigung des Klimawandels in der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung zu erreichen. Da das Modell schon im Jahr 1970 startet, wurde für den Zeitraum von 1970 bis 2020 der gemessene Meeresspiegelanstieg für 1970- 2000 sowie 2000 bis 2020 linear interpoliert. Die resultierende Meeresspiegelzeitreihe wurde auf die Bias-korrigierten Modell-Wasserstandsdaten addiert.
- **Landhebung (-senkung).** Mit demselben NASA Tool wurde auch die projizierte (beziehungsweise für den Zeitraum von 1970-2020 linear interpolierte) Landhebung (-senkung) korrigiert, auch hier wieder aus Konsistenzgründen mit den Projektionen des 17. (bei Landhebung) bzw. 83. (bei Landsenkung) Perzentils.

Das Modell wurde für einen historischen Zeitraum von 1971 bis 2005, die nahe Zukunft von 2031 bis 2070 und die ferne Zukunft von 2071 bis 2100 gerechnet. Die einzelnen Zeiträume wurden jeweils mit einem eigenen Spin-up-Lauf gestartet. Für ausgewählte Stationen Cuxhaven und Kiel-Holtenau wurden 10-minütige Wasserstandsdaten gespeichert. Eine einzige für Nord- und Ostsee verfügbare Klimaprojektion RCP85_EUR-11_MPI-ESM-LR_rcp85_r1i1p1_REMO2009-HBM stand zur Verfügung.

Die BfG hat die BSH (Ehlers et al, 2023) bereitgestellten 10-min Werte für Cuxhaven und Kiel-Holtenau zu Stundenmittelwerten des Wasserstandes aggregiert und diese bezogen auf die Unterschreitung verschiedener Grenzwasserstände ausgewertet.

1.4.2 Ergebnis: Zufluss aus dem Einzugsgebiet

In einem ersten Schritt wurde mit dem Wasserhaushaltsmodell HydPy-L-NOK (Tag) die Zuflüsse zum NOK bis zum Ende des 21. Jahrhunderts unter Anwendung des Gesamtensembles von 16 Klimaprojektionen simuliert. Abbildung 1-15 bis Abbildung 1-17 zeigen den simulierten Gesamtzufluss für den über 30 Jahre jeweils gemittelten Niedrigwasserabfluss (MNQ), mittlere Abfluss (MQ) und den mittleren Hochwasserabfluss (MHQ); absolut als Volumenstrom in m³/s und relativ zur Referenz (1971-2000) in prozentualer Abweichung.

Im Grundsatz zeigen sich indifferente Änderungssignale für MNQ, MQ und MHQ für die nahe Zukunft (2031-2060): Je nach betrachtetem Kennwert und Ensemblemitglied lässt sich eine Spannweite erkennen, deren Raum sich von - 30 % (Rückgang des Zuflusses) bis + 15 % (Zunahme des Zuflusses) aufspannt. Die mittleren Abflüsse zeigen eine Spannweite von - 15 % (Abnahme) und + 15 % (Zunahme), jedoch mehrheitlich im Bereich von – 5 % bis +15 %. Bei den mittleren Niedrigwasserabflüssen liegt die Spannweite zwischen - 30 % bis + 15 %, jedoch mehrheitlich zwischen -10 % und + 15 %. Die mittleren Hochwasserabflüsse zeigen eine Spannweite des Gesamtensembles von - 15 % (Abnahme) und + 10 % (Zunahme). Auffällig ist ein im Vergleich zu allen anderen Klimaprojektionen extremerer trockener Verlauf der Klimaprojektion RCP85_MIROC5_r1_CCLM (Auslöser des Minimums insbesondere im Mittel- und Niedrigwasserbereich), der jedoch nicht geklärt werden kann.

Für die ferne Zukunft (2071 - 2100) zeigt sich eine größere Spanweite der möglichen Entwicklungen mit mehrheitlich gleichverteilten Klimaprojektionen – je nach Kennwert und Ensemblemitglied von – 40

[7] https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool. Abruf 28.05.2024

% (Abnahme) bis + 30 % (Zunahme). Die mittleren Abflüsse spannen einen Raum von -20 % bis + 30 % auf, die mittleren Niedrigwasserabflüsse von -40 % bis + 20 % und die mittleren Hochwasserabflüsse von -15 bis +25 %.

Hervorgehoben ist in den Grafiken der Verlauf der Zuflussganglinie, die sich aus der Klimaprojektion RCP85_EUR-11_MPI-ESM-LR_rcp85_r1i1p1_REMO2009-HBM, ergibt. Diese Klimaprojektion aus dem Gesamtensemble der Klimaprojektionen ist diejenige, für die konsistent veränderten Meeresspiegelanstiege für Brunsbüttel und Kiel-Holtenau vorliegen.

- In der nahen Zukunft nehmen die mittleren Zuflüsse (+ 5 %) und die mittleren Niedrigwasserabfluss (+ 5 %) eher zu; die mittleren Hochwasserabflüsse mit - 10 % eher ab.
- In der fernen Zukunft zeigt sich in der Zuflusssimulation zwar keine Veränderung zur Referenz bei den mittleren Niedrigwasserabflüssen, jedoch führt die Projektion im Übergang von der nahen zur fernen Zukunft erst zu einem Rückgang, dann wieder zu einem Anstieg der Abfluss bis zum Änderungssignal der Referenz (also keine Änderung). Es ist eine Zunahme um gut 10 % bei den mittleren Abflüssen und ein Rückgang von bis zu - 10 % bei den Hochwasserabflüssen festzustellen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die mit Nord- und Ostsee kohärente Klimaprojektion im Binnenzufluss sich in die Spannweite des gesamten Ensembles einfügt; es ist kein extrem trockenes oder feuchtes Szenario, sondern findet lässt sich im mittleren Bereich mit indifferenten Änderungen in der nahen und fernen Zukunft verorten. Der Verlauf im Vergleich zum Gesamtensemble kann als plausibel angenommen werden, so dass es als Randbedingung für das Kanalmodell BEWASYS NOK für die Simulation von kritischen Bewirtschaftungsereignissen verwendet werden kann.

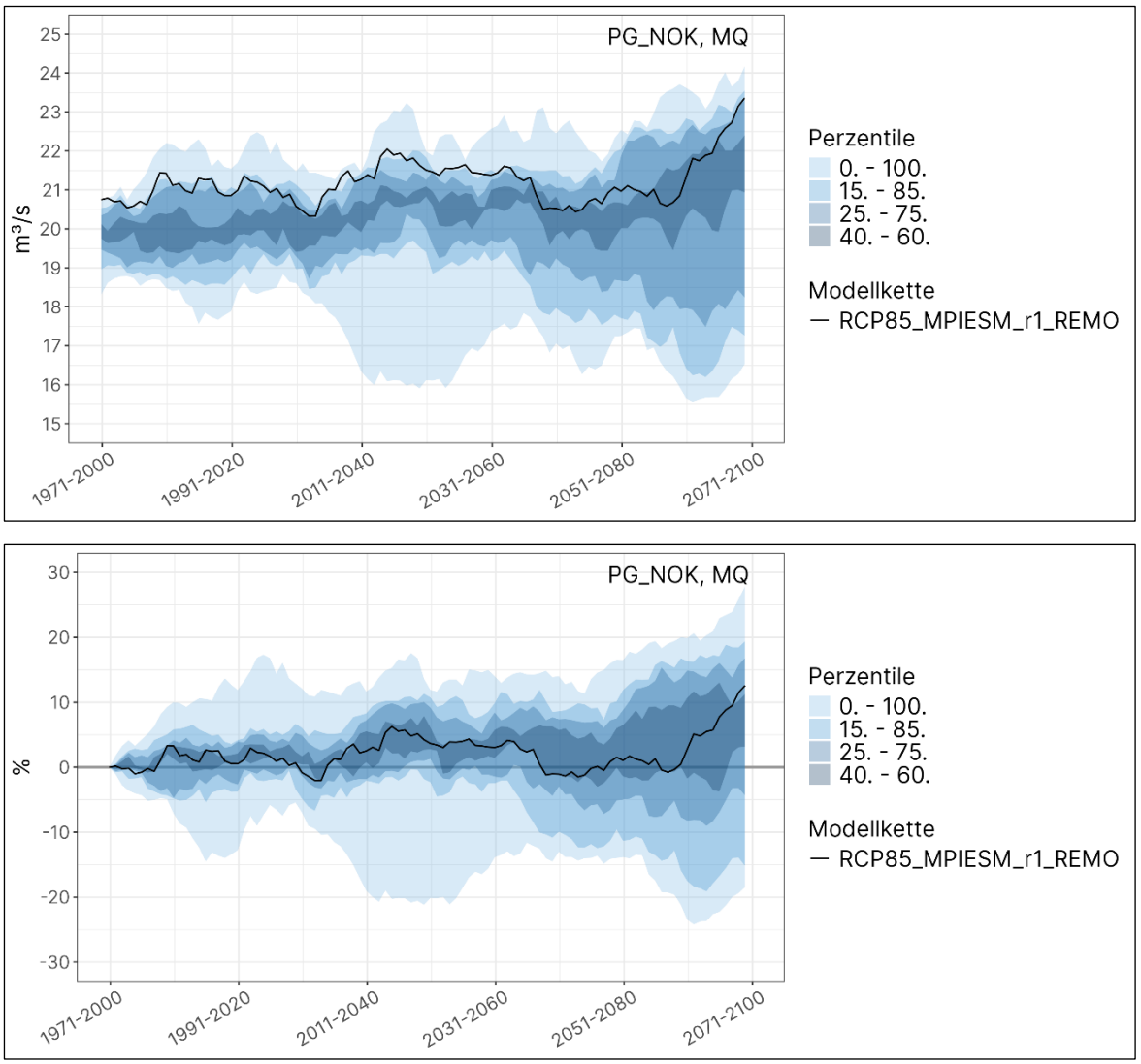


Abbildung 1-15: Gesamtensemble der mittleren Binnenzuflüsse (MQ) zum NOK, simuliert mit dem Wasserhaushaltsmodell HydPy-L-NOK bis Ende des 21. Jahrhunderts. Die hervorgehobene Zuflussganglinie aus der Klimasimulation RCP85_EUR-11_MPI-ESM-LR_rcp85_r1i1p1_REMO2009-HBM ist die Randbedingung für das Kanalmodell BEWASYS NOK. Die obere Darstellung zeigt die absoluten Werte und die untere die prozentualen Abweichungen der nahen (2031-2060) und fernen (2071-2100) Zukunft von der Referenz (1971-2000) jeweils als gleitendes Mittel über 30 Jahre.

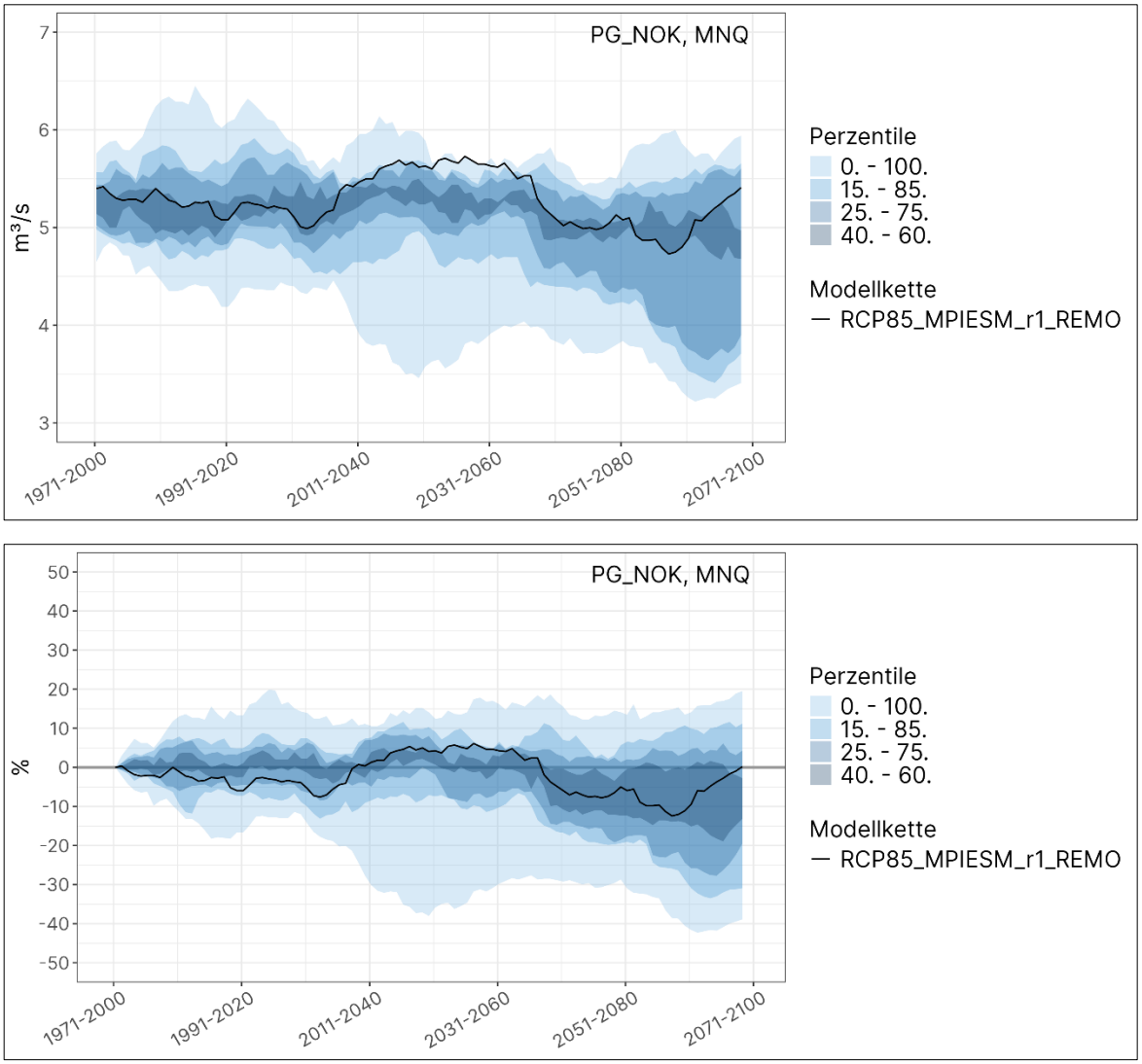


Abbildung 1-16: Gesamtensemble der mittleren Niedrigwasserzuflüsse (MNQ) zum NOK, simuliert mit dem Wasserhaushaltsmodell HydPy-L-NOK bis Ende des 21. Jahrhunderts. Die hervorgehobene Zuflussganglinie aus der Klimasimulation RCP85_EUR-11_MPI-ESM-LR_rcp85_r1i1p1_REMO2009-HBM ist die Randbedingung für das Kanalmodell BEWASYS NOK. Die obere Darstellung zeigt die absoluten Werte und die untere die prozentualen Abweichungen der nahen (2031-2060) und fernen (2071-2100) Zukunft von der Referenz (1971-2000) jeweils als gleitendes Mittel über 30 Jahre.

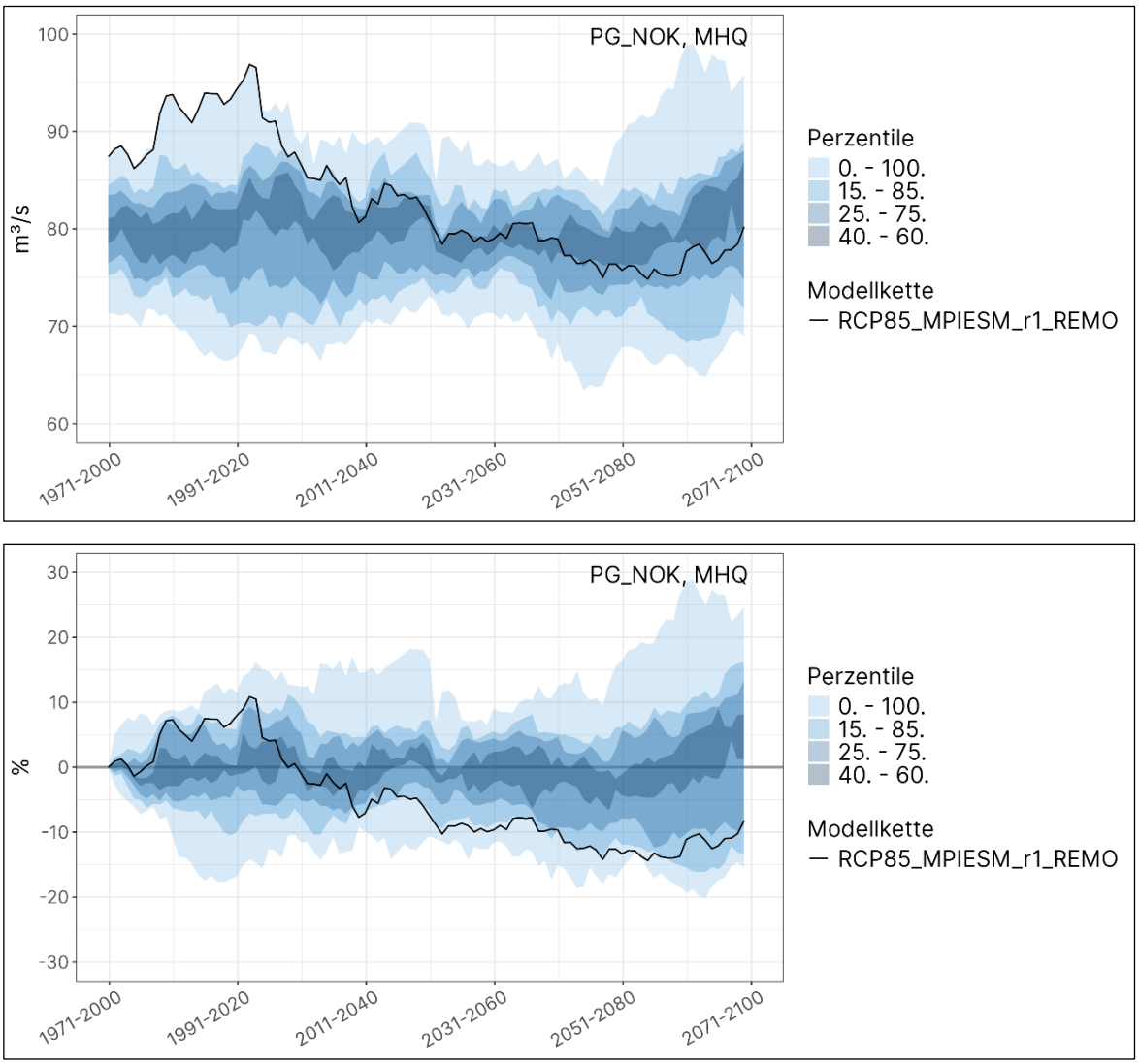


Abbildung 1-17: Gesamtensemble der mittleren Hochwasserzuflüsse (MHQ) zum NOK, simuliert mit dem Wasserhaushaltsmodell HydPy-L-NOK bis Ende des 21. Jahrhunderts. Die hervorgehobene Zuflussganglinie aus der Klimasimulation RCP85_EUR-11_MPI-ESM-LR_rcp85_r1i1p1_REMO2009-HBM ist die Randbedingung für das Kanalmodell BEWASYS NOK. Die obere Darstellung zeigt die absoluten Werte und die untere die prozentualen Abweichungen der nahen (2031-2060) und fernen (2071-2100) Zukunft von der Referenz (1971-2000) jeweils als gleitendes Mittel über 30 Jahre.

1.4.3 Ergebnis: Kritische Bewirtschaftungssituationen im Kanal in der Zukunft

Die Klimaprojektion RCP85_EUR-11_MPI-ESM-LR_rcp85_r1i1p1_REMO2009-HBM ist die Randbedingung für das Kanalmodell BEWASYS NOK, weil die entsprechenden Wasserstände (und Meeresspiegelanstiege) für die Nordsee (Brunsbüttel bzw. über eine Transferfunktion umgerechnet von Cuxhaven) und die Ostsee (Kiel- Holtenau) konsistent zu den Zuflussprojektionen zum NOK vorlagen. Die Wasserstandsprojektionen lagen jedoch nicht als durchgängige Zeitreihe von der Referenz bis zur fernen Zukunft, sondern in Form von Zeitscheiben vor (Referenzzeitraum 1972-1999, nahe Zukunft 2032-2059, ferne Zukunft 2072-2099, vgl. Abschnitt 1.4.1). Abbildung 1-18 zeigt die Entwicklung der Anzahl der Tage pro Jahr in denen der kritische Wasserstand im NOK von über 5,40 m PNP überschritten wurde, als Ganglinien über die vorliegenden Zeitfenster; Abbildung 1-19 zeigt die Änderungssignale der nahen (2032-2059) und fernen (2072-2099) Zukunft im Vergleich zum Referenzzeitraum (1972-1999). In der Klimafolgenforschung werden in der Regel 30jährige Bezugszeiträume verwendet.

Aus Gründen der Datenverfügbarkeit (Überlappungszeiträume der Projektionen der Binnenzuflüsse und der Außenwasserstände) mussten die Bezugszeiträume im vorliegenden Fall auf jeweils 28 Jahre verkürzt werden.

Im Vergleich zur Referenz von 0,1 Tagen steigt die Anzahl der kritischen Ereignisse in der nahen Zukunft auf im Mittel 1,7 Tage und in der fernen Zukunft im Mittel auf 31 Tage. Im Vergleich zu den Ergebnissen der Sensitivitätsuntersuchungen in NOK1 erhöht sich die mittlere Anzahl an kritischen Ereignissen (für 30 cm Anstieg) von 0,5 Tage auf 1,7 Tage in der nahen Zukunft und von 15 Tage auf 31 Tage in der fernen Zukunft (für 80 bzw. 85 cm Anstieg). Diese Unterschiede sind erklärbar, da bei der Sensitivitätsanalyse in der NOK Phase 1 mittlere Änderungssignale für die Binnenhydrologie verwendet wurden, die den meteorlogischen Beobachtungsdaten aufgeprägt wurden, und die gemessenen Wasserstandsdaten der Unterelbe und Ostsee um verschiedene Beträge erhöht wurden. Ein physikalischer Zusammenhang zwischen dem veränderten Binnenzufluss zum NOK und den Außenwasserstandserhöhungen existierte nicht. Demgegenüber bietet die in der Phase 2 angewandte Methode durch die physikalisch konsistente Kopplung der Binnenhydrologie und der Außenwasserstände einen belastbareren Ausblick auf die zukünftig möglichen Randbedingungen der Kanalbewirtschaftung.

An dieser Stelle muss jedoch erwähnt werden, dass eine Klimaprojektion nur eine einzige Realisation einer möglichen Zukunft ist, und damit naturgemäß größere Unsicherheiten bei der Interpretation der Ergebnisse mit sich bringt, als bei Einbeziehung eines Ensembles von Projektionen möglicher Zukünfte. Daher lassen sich keine vertieften Unsicherheitsbetrachtungen durchführen oder wahrscheinlichkeitsbasierte Aussagen der projizierten Entwicklung treffen. Für eine entsprechende Einordung der erzielten Simulationsergebnisse wären zukünftig weitere gekoppelte land- und meeresseitige Projektionen wünschenswert.

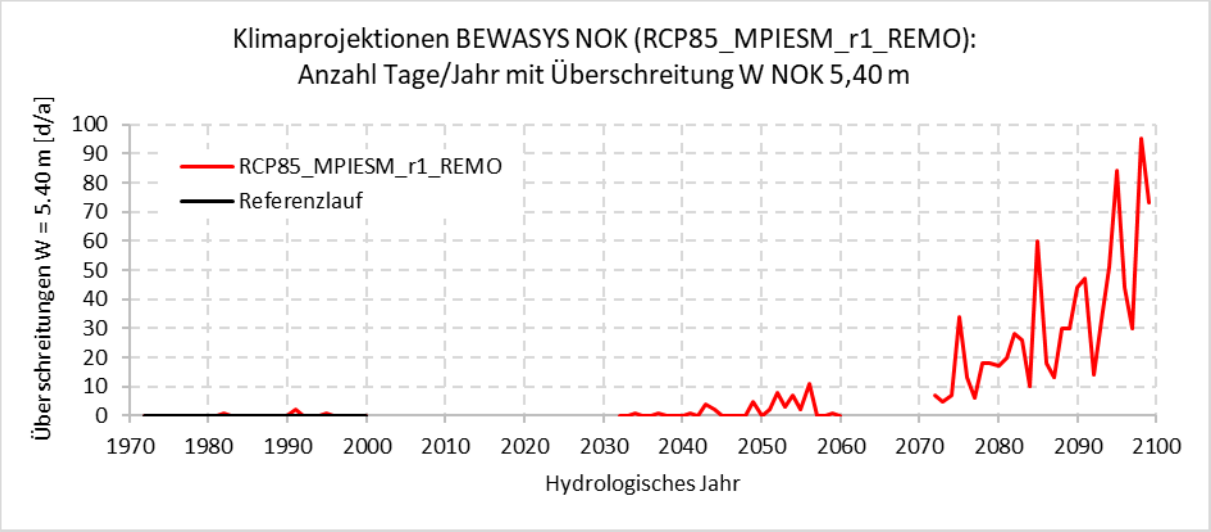


Abbildung 1-18: Projektionen der Anzahl Tage pro Jahr mit Überschreitung des kritischen Wasserstands von 5,40 m PNP im NOK in mindestens einer Stunde des Tages. Szenarien mit veränderter Binnenhydrologie des NOK und klimawandelbedingtem Anstieg der Außenwasserstände. Status Quo: keine Pumpe.

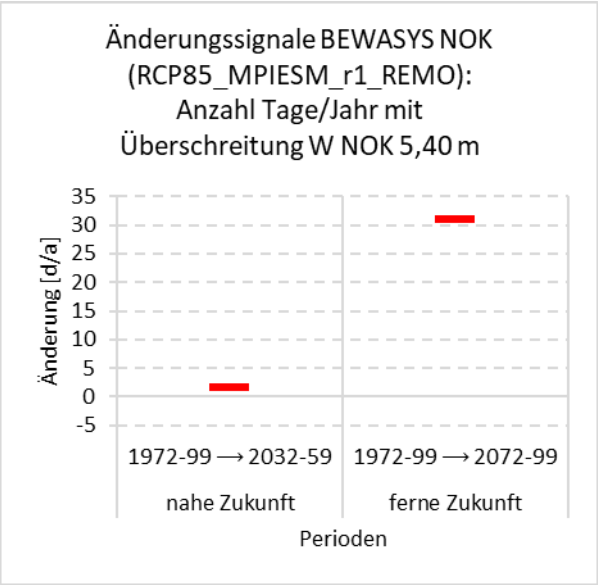


Abbildung 1-19: Mittlere Anzahl der Tage im Jahr, an denen der kritische Wasserstand von 5,40 m PNP im NOK in mindestens einer Stunde des Tages überschritten wird. Status Quo: keine Pumpe. Nahe Zukunft = 1,7 Tage, Ferne Zukunft = 31 Tage.

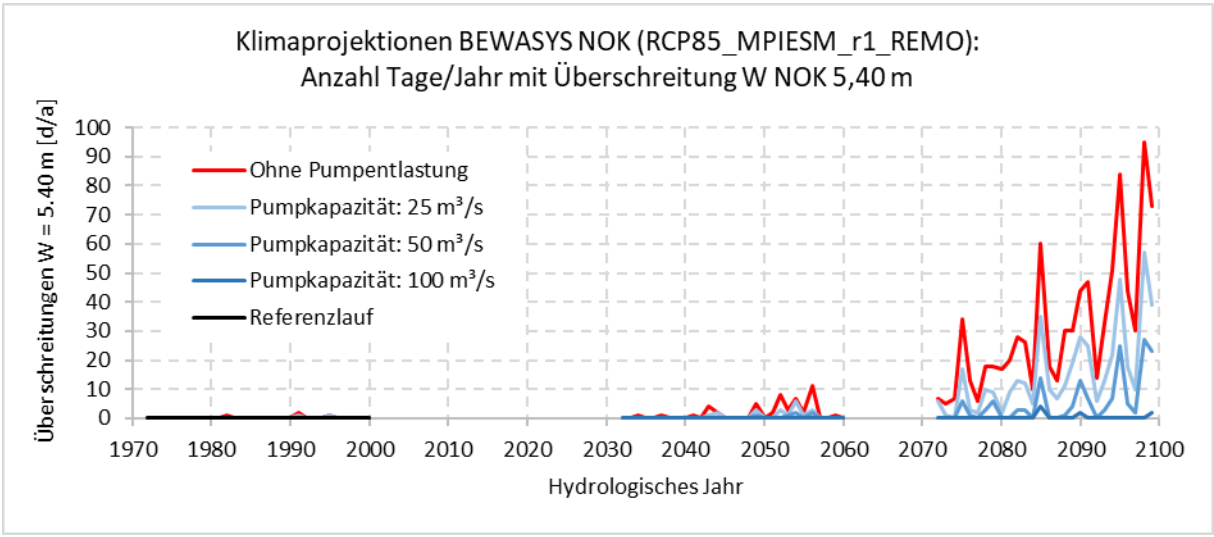
1.4.4 Pumpbetrieb als Beispiel für eine Anpassungsmaßnahme

Wie bereits in der 1. Phase (BfG, 2020) wurde auch in der Phase 2 ein Pumpbetrieb als zusätzliche Entwässerungsoption untersucht. Der Pumpbetrieb zur Unterstützung der Entwässerung des NOK im Freigefälle bildete eine theoretische Anpassungsoption, um der sich bei steigendem Meeresspiegel abzeichnenden Verringerung der Entwässerungsfenster und der damit einhergehenden Zunahme der kritischen Kanalwasserstände entgegenzuwirken. Bezüglich der Gesamtkapazität des Pumpwerks wurden drei Varienten untersucht: 25 m³/s, 50 m³/s und 100 m³/.

Die Pumpensteuerung im Modell wurde so konfiguriert, dass bei Überschreitung eines simulierten Kanalwasserstandes von 5,25 m PNP automatisch die Pumpe als zusätzliche Entwässerungsoption (ergänzend zu Entwässerung im Freigefälle) genutzt wird. Unter Beschränkung auf die maximal angesetzte Pumpkapazität richtet sich die Höhe des Pumpeneinsatzes nach dem Entwässerungsbedarf der notwendig ist, um einen Wasserstand von 5,25 m PNP im NOK möglichst nicht zu überschreiten. Bei Unterschreitung eines Wasserstandes von 5,25 m PNP wird die Pumpe im Modell deaktiviert.

Bezüglich der räumlichen Verortung der Pumpe wurden für jede der untersuchten maximalen Pumpkapazitäten (25 m³/s, 50 m³/s und 100 m³/s) zwei Varianten untersucht: Standort Brunsbüttel und Standort Kiel-Holtenau. Da der gesamte NOK im Modell als eine Bilanzeinheit mit einheitlichem Wasserstand (Bilanzwasserstand) betrachtet wird, spielt die Verortung der Pumpe für die Pumpmenge keine Rolle. Die Lage ist jedoch für die Berechnung der aufzuwendenden Hubarbeit entscheidend, da sich die beiden Standorte hinsichtlich der zu überwindenden Höhendifferenz zwischen den Binnen- und Außenwasserständen unterscheiden (s. unten). In beiden Standortvarianten wird jeweils nur ein Pumpwerk betrachtet, d.h. am jeweils anderen Standort wird nicht gepumpt.

In Abbildung 1-20 (oben) ist die projizierte Entwicklung der Anzahl der Tage im Jahr dargestellt, in denen der kritische Wasserstand von 5,40 m PNP in mindestens einer Stunde des Tages überschritten wird. Abbildung 1-20 (unten) zeigt die korrespondierende Entwicklung der jährlichen Anzahl der Tage mit Pumpbetrieb.



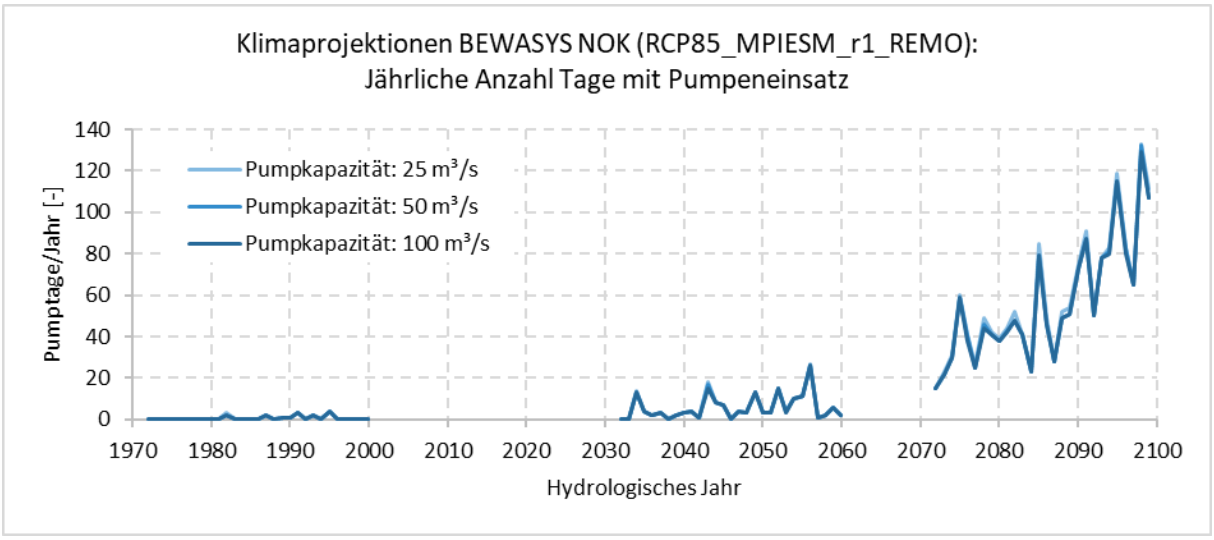


Abbildung 1-20: Projektionen der Anzahl Tage pro Jahr mit Überschreitung des kritischen Wasserstands von 5,40 m PNP im NOK in mindestens einer Stunde des Tages (oben) und jährliche Anzahl der Tage mit Pumpeneinsatz (unten). Berücksichtigung eines Pumpbetriebs als zusätzliche Entwässerungsoption. Szenarien mit veränderter Binnenhydrologie des NOK, klimawandelbedingtem Anstieg der Außenwasserstände und unterschiedlichen Pumpkapazitäten.

Abbildung 1-21 (links) zeigt die absoluten Änderungen der mittleren Anzahl der Überschreitungstage des kritischen Wasserstands für die nahe und die ferne Zukunft, jeweils in Bezug auf den Referenzzeitraum ohne Pumpbetrieb. In Abbildung 1-21 (rechts) sind die Absolutwerte der mittleren Anzahl der Tage im Jahr mit Pumpeneinsatz für die nahe und die ferne Zukunft dargestellt. Die Absolutwerte können auch als Änderungssignale in Bezug auf den Referenzzeitraum ohne Pumpbetrieb interpretiert werden. Neben dem Pumpbetrieb sind die übrigen Modellrandbedingungen identisch mit den Beschreibungen in Kapitel 1.4.3.

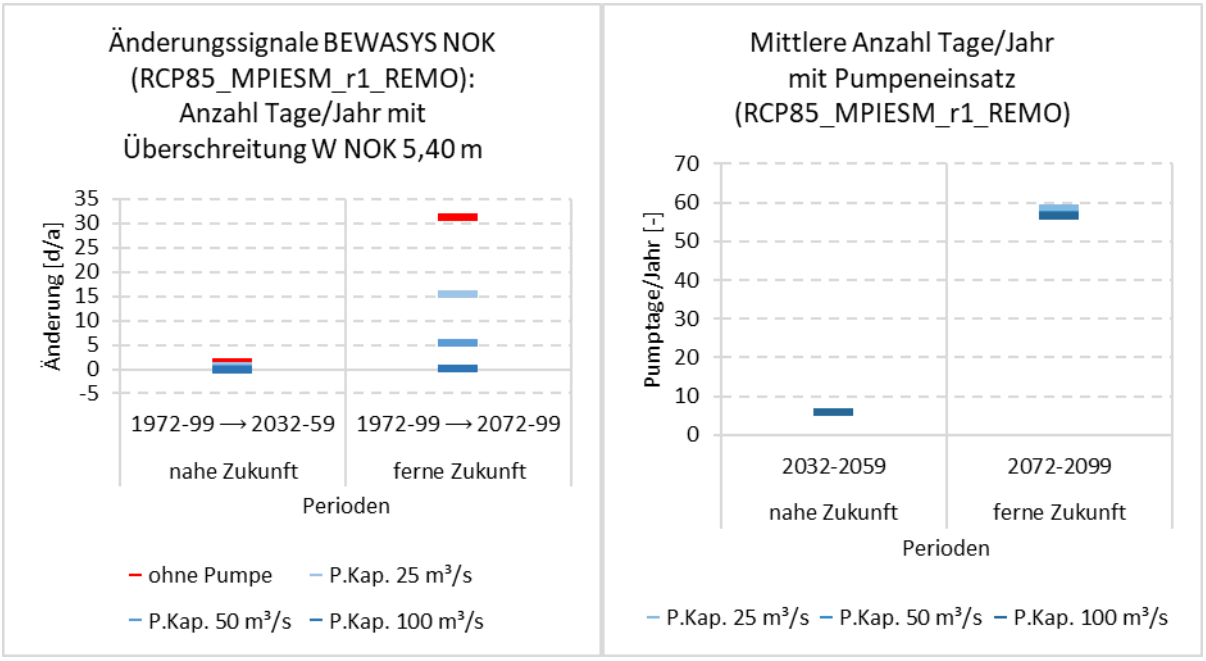


Abbildung 1-21: Projektionen der mittleren Anzahl der Tage im Jahr, an denen der kritische Wasserstand von 5,40 m PNP im NOK in mindestens einer Stunde des Tages überschritten wird (links) und mittlere Anzahl der Tage im Jahr mit Pumpeneinsatz (rechts). Berücksichtigung eines Pumpbetriebs als zusätzliche Entwässerungsoption. Szenarien mit veränderter Binnenhydrologie des NOK, klimawandelbedingtem Anstieg der Außenwasserstände und unterschiedlichen Pumpkapazitäten (P.Kap.).

Bereits mit einer Pumpkapazität von 25 m³/s lässt sich in der nahen Zukunft der Anstieg der Überschreitungstage von 5,40 m PNP im NOK von 1,6 auf 0,6 Tage pro Jahr reduzieren. Mit einer Pumpkapazität von 100 m³/s wird eine Überschreitung von 5,40 m PNP im NOK in der nahen Zukunft vollständig vermieden. Auch in der fernen Zukukunft lässst sich damit eine Überschreitung von 5,40 m PNP nahezu vermeiden: Gegenüber dem Referenzzeitraum ohne Pumpe erhöht sich die mittlere Anzahl der Überschreitungstage ledgilich um 0,1 Tage pro Jahr. Bei einer Pumpkapazität von 50 m³/s beträgt die Zunahme der Überschreitungstage 5,3 Tage und bei einer Pumpkapazität von 25 m³/s durchschnittlich 15,5 Tage.

Bezüglich der Anzahl der Tage mit Pumpeneinsatz gibt es kaum Unterschiede zwischen dern unterschiedlichen Varianten der Pumpkapazität. In der nahen Zukunft wird jeweils an durchschnittlich 6 Tagen pro Jahr gepumpt, in der fernen Zukunft an durchschnittlich 57 Tagen, bei einer Pumpkapazität von 50 m³/s oder 100 m³/s. Bei einer Pumpleistung von 25 m³/s verteilt sich die Pumpwassermenge teilweise auf weitere Tage, so dass hier in der fernen Zukfunft an durchschnittlich an 59 Tagen pro Jahr die Pumpe im Einsatz ist.

Berechnung Hubarbeit

Der Energieaufwand, der zum Betrieb eines Pumpwerks erforderlich ist, hängt neben der Pumpmenge maßgeblich von der zu überwindenden Hubhöhe ab. Die beiden in der vorliegenden Untersuchung betrachteten Varianten der Verortung des Pumpwerks (Brunsbüttel und Kiel-Holtenau) wurden hinsichtlich der jeweils sich ergebenden Hubarbeit ausgewertet. Das Kanalmodell BEWASYS NOK bietet keine direkte Möglichkeit zur Berechnung und Ausgabe der an Pumpwerken aufzubringenden Hubarbeit. Daher wurde diese im Nachgang der jeweiligen Modellrechnung über entsprechende Postprozessierungswerkzeuge anhand des simulierten Pumpwassers und der Hubhöhen nach folgender Gleichung berechnet:

$$W_h = m * g * h \qquad (1.1)$$

Mit W_h Hubarbeit [J, Ws], 1 Ws = 1/3,6 * 10^{-6} kWh = 2,778 * 10^{-7} kWh
m Masse des geförderten Wassers [kg]
g Erdbeschleunigung, ~9,81 [m/s²]
h Hubhöhe [m]

Die Berechnung der Hubarbeit erfolgte entsprechend der zeitlichen Auflösung des Kanalmodells auf Stundenwertbasis unter Berücksichtigung der zeitschrittspezifischen (zeitvariablen) Wasserstandsdifferenzen zwischen dem NOK und den jeweiligen Außenwasserständen. Anschließend wurde die stündliche Hubarbeit zu Jahreswerten (hydrologische Jahre) aggregiert.

Dabei ist anzumerken, dass die Energieaufnahme des Pumpwerks aus dem Stromnetz aufgrund von Verlusten höher als die nach obiger Gleichung berechnete physikalische Hubarbeit ist. Sollte der Gesamtwirkungsgrades des anzusetzenden Pumpwerks bekannt sein, könnte für dieses der korrespondierende Stromverbrauch berechnet und daraus ggf. Energiekosten abgeleitet werden.

Analog zur Abbildung 1-18 (zeitliche Entwicklung der Anzahl der Tage pro Jahr mit Überschreitung des kritischen Wasserstands im NOK von 5,40 m PNP) zeigt Abbildung 1-22 die über den Referenzzeitraum, die nahe und die ferne Zukunft jährlich aufzubringende Gesamthubarbeit des zusätzlich zur im Freigefälle stattfindenden Kanalentwässerung eingesetzten Pumpwerks. Dargestellt ist der sich für die beiden Standortvarianten (oben: Brunsbüttel, unten: Kiel-Holtenau) jeweils ergebende Verlauf der jährlichen Hubarbeit für die betrachteten Pumpkapazitäten (25 m³/s, 50 m³/s und 100 m³/s). Die entsprechenden Mittelwerte der nahen (2032-2059) und fernen (2072-2099) Zukunft sind in Abbildung 1-23 dargestellt und in Tabelle 1-1 aufgelistet.

Korrespondierend mit dem Meeresspiegelanstieg steigt auch die jährlich aufzubringdende Hubarbeit zur Kanalentwässerung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts an. Aufgrund der meist kleineren Wasserstandsdifferenzen zwischen Binnen- und Außenwasserstand ist die mittlere jährliche Hubarbeit in Kiel-Holtenau geringer als in Brunsbüttel.

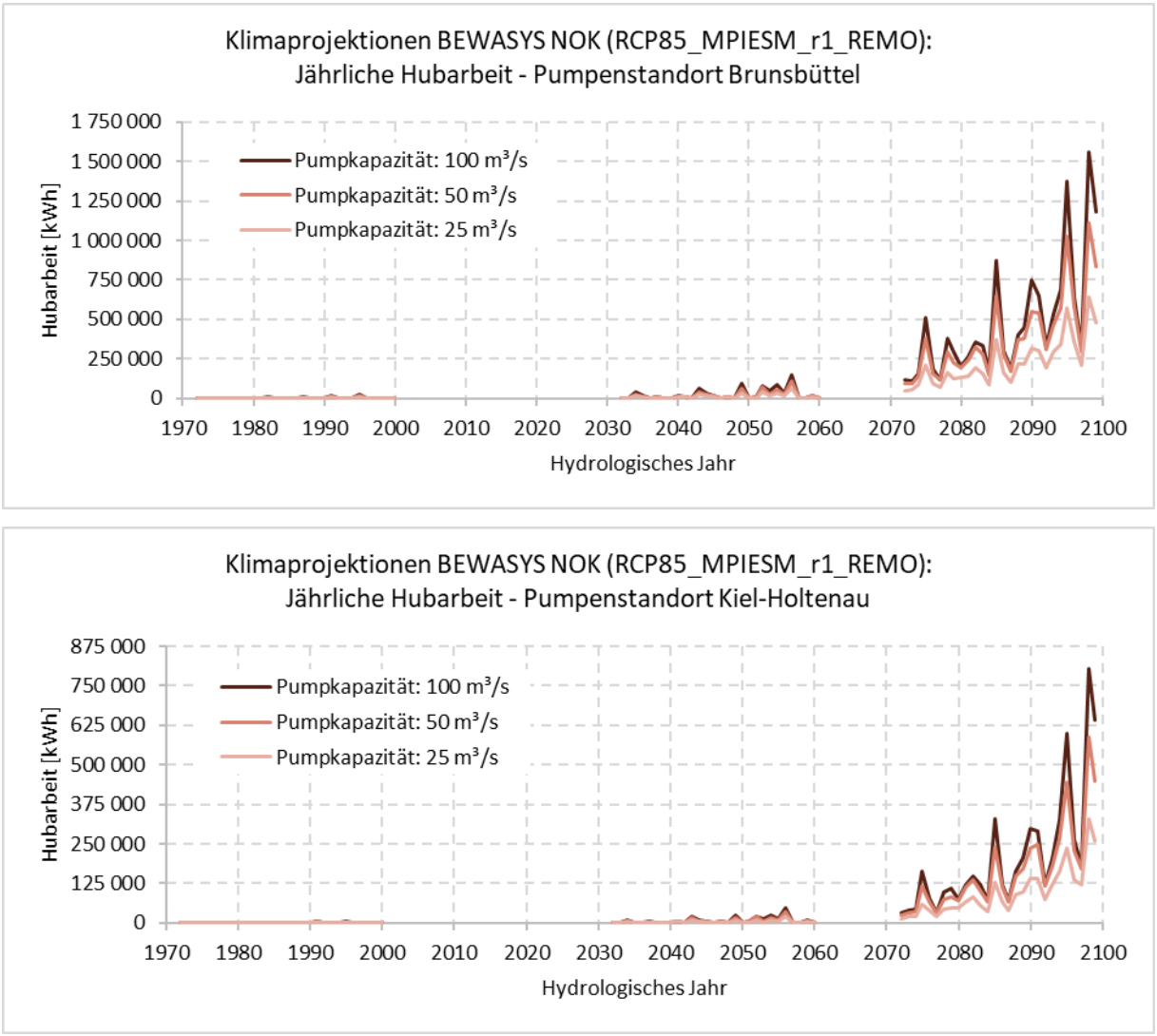


Abbildung 1-22: Projektionen der jährlichen Hubarbeit in der nahen und fernen Zukunft für zwei Standortvarianten (oben: Brunsbüttel, unten: Kiel-Holtenau) mit jeweils unterschiedlichen Pumpkapazitäten. Szenarien mit veränderter Binnenhydrologie des NOK, klimawandelbedingtem Anstieg der Außenwasserstände und unterschiedlichen Pumpkapazitäten.

In der fernen Zukunft ist die Hubarbeit deutlich höher als in der nahen Zukunft. In der Standortvariante Brunsbüttel liegt diese zwischen 226 511 kWh pro Jahr (Pumpkapazität 25 m³/s) und 479 601 kWh pro Jahr (Pumpkapazität 100 m³/s), in der Standortvariante Kiel-Holtenau zwischen 96 283 kWh pro Jahr (Pumpkapazität 25 m³/s) und 204 571 kWh pro Jahr (Pumpkapazität 100 m³/s).

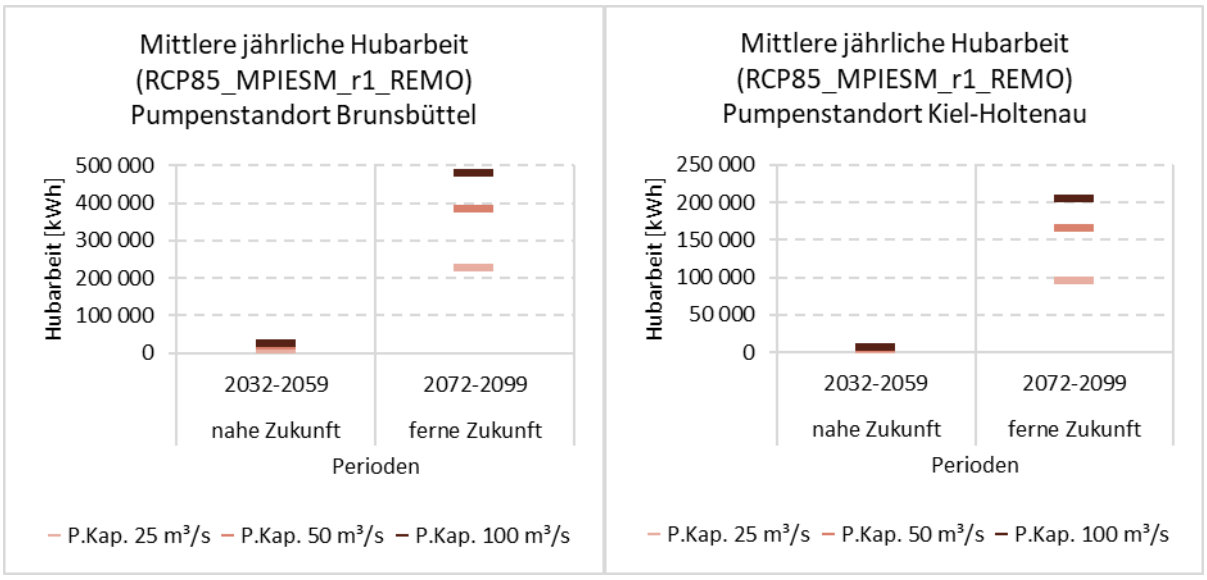


Abbildung 1-23: Projektionen der mittleren jährlichen Hubarbeit in der nahen und fernen Zukunft für zwei Standortvarianten (links: Brunsbüttel, rechts: Kiel-Holtenau) mit jeweils unterschiedlichen Pumpkapazitäten. Szenarien mit veränderter Binnenhydrologie des NOK, klimawandelbedingtem Anstieg der Außenwasserstände und unterschiedlichen Pumpkapazitäten (P.Kap.).

Tabelle 1-1: Projektionen der mittleren jährlichen Hubarbeit in der nahen und fernen Zukunft für die beiden Standortvarianten Brunsbüttel und Kiel-Holtenau) mit jeweils unterschiedlichen Pumpkapazitäten. Szenarien mit veränderter Binnenhydrologie des NOK, klimawandelbedingtem Anstieg der Außenwasserstände und unterschiedlichen Pumpkapazitäten (Klimaprojektion RCP85_MPIESM_r1_REMO).

	Standortvariante Brunsbüttel mittlere jährliche Hubarbeit [kWh]		**Standortvariante Kiel-Holtenau mittlere jährliche Hubarbeit [kWh]**	
Pumpkapazität	**nahe Zukunft 2032-2059**	**ferne Zukunft 2072-2099**	**nahe Zukunft 2032-2059**	**ferne Zukunft 2072-2099**
25 m³/s	10 869	226 511	3 431	96 283
50 m³/s	19 090	386 301	5 909	165 086
100 m³/s	25 743	479 601	7 891	204 571

Es lässt sich zusammenfassen, dass ohne Pumpwerk mit einem Anstieg der Überschreitungstage von 5,40 m PNP von nahezu null im historischen Zeitraum auf ca. 31 Tage in der fernen Zukunft zu rechnen ist. Diese Erhöhung reduziert sich bei einem Pumpeneinsatz von 25 m³/s auf ca. 15 Tage, bei 50 m³/s auf 5,3 Tage und bei 100 m³/s auf 0,1 Tage pro Jahr.

Die in den Modellsimulationen erzielte Wirkung eines zusätzlichen Pumpbetriebs auf die Entwässerung des NOK ist konsistent mit den in Phase 1 erzielten Ergebnissen (BfG, 2020).

1.5 Resilienzmanagement

Die Bundesanstalt für Straßenwesen hat im Expertennetzwerk eine Vergabe initiiert, die das Ziel hatte, das für Bundesfernstraßen entwickelte Grobkonzept zur Resilienz am Beispiel von real aufgetretenen Schadensereignissen für Schiene, Landstraße und Wasserstraße überprüfen zu lassen und entsprechende konzeptionelle Anpassungen vorzuschlagen.

Für die Wasserstraße diente der Nord-Ostsee-Kanal als Pilotprojekt. Die Bundesanstalt für Gewässerkunde hat sowohl die Vergabe begleitet (Kick off 22.01.2019, Projektabschluss Dezember 2023) als auch den Auftragnehmer der Bundesanstalt für Straßenwesen fachlich sehr stark durch Wissen, mit eigenen Untersuchungen bzw. mit Simulationsergebnissen aus der NOK Phase 1 (BfG, 2020) unterstützt. Der Abschlussbericht (BASt, 2024) liegt vor. Ein Kurzbericht wurde bereits veröffentlicht, aus dem hier zitiert wird (Ebner von Eschenbach, A.-D., Zierul, R. , Nilson, E. (2025): Fallstudienbasierte Anwendung eines Resilienzmanagementkonzeptes – Wasserstraße (Nord-Ostsee-Kanal))

„Die Resilienz des Systems wurde nach einem ursprünglich für den Verkehrsträger Straße entwickelten Resilienzmanagementkonzept anhand von zwei Fallstudien bewertet (Mayer et al., 2020, 2024). Fallstudie 1 unterstellt eine Vollsperrung des NOK aufgrund hoher Pegelwasserstände. Hohe Pegelwasserstände im Nord-Ostsee-Kanal treten zumeist aufgrund einer ungünstigen Kombination von zwei treibenden natürlichen Größen auf: a) Hoher Binnenzufluss aus den Einzugsgebieten des NOK und b) Hohe Außenwasserstände an Nord- sowie Ostsee. Erreicht der Wasserstand 5,25 Meter PNP erfolgt die Einstellung des regionalen Fährverkehrs (Querverkehr, Teilsperrung). Ab 5,40 Meter PNP wird auch der Längsverkehr eingestellt (Vollsperrung; BfG, 2020; WSV 2023). Eine solche Situation trat z.B. im Januar 1966 auf. Dieses Ereignis wurde gewählt, weil es in Langzeitsimulation das einzige Ereignis, welches diese Kriterien erfüllte. Aufgrund des Meeresspiegelanstiegs bzw. Veränderungen im Binnenwasserhaushalt ist davon auszugehen, dass sich derartige Situationen in Zukunft häufen und intensivieren (BfG, 2020).

Fallstudie 2 geht von einem Schiffsanprall an der Schleusenkammer einer der großen Schleusen aus. Dieser Fall ist an eine reale Havarie im Februar 2018 angelehnt, als der Frachter AKACIA mit dem Tor der Großen Südkammer in Kiel-Holtenau kollidierte. Die Folge war eine Begrenzung der Kanalkapazität während einer etwa sieben wöchigen Reparaturphase auf etwa 60 % (Mayer et al., 2024).

Folgende Ergebnisse lassen sich festhalten:

- In Fallstudie 1 „Hochwasser“ kam es im Verlauf des ausgewählten Ereignisses zu einer Sperrung zunächst für den Querverkehr und anschließend auch für den Längsverkehr. Die Dauer war mit unter einem Tag gering, der Funktionsverlust allerdings zunächst total (100%; Kosten pro Tag insgesamt 340.000 EUR). Als resilienzfördernde Maßnahme wurden zusätzliche Pumpleistungen virtuell mithilfe des BfG-Modellinstrumentariums implementiert. Eine Leistung von 25 m^3/s brachte noch keine nennenswerte Verbesserung, jedoch konnten bei Leistungen von 50 m^3/s und 100 m^3/s relevante Fortschritte erzielt werden.

- Durch Fallstudie 2 "Schiffsanprall" wurde der Längsverkehr instantan erheblich beeinträchtigt, während der Querverkehr unbeeinflusst blieb. Die Dauer der Beeinträchtigung war unter den der Realität entliehenen außergewöhnlich ungünstigen Rahmenbedingungen (keine Schwimmfähigkeit des defekten Schleusentores) mit 7 Wochen erheblich und mit Kosten von ca. 269.000 EUR pro Tag (Ereignissumme gut 12 Mio. EUR) verbunden. In der Maßnahmenplanung und -bewertung wurde der Einfluss eines zur Verfügung stehenden Reservetors vor

Ort berücksichtigt. Sofern eine normale Schleusentorhavarie vorliegt bei der die Schwimmfähigkeit erhalten bleibt, führt der Einfluss eines zur Verfügung stehenden Reservetores zu einer Dauer der Beeinträchtigung der Funktionalität von drei bis 5 Tagen. Die Resilienz kann gemäß dem angewendeten Bewertungsschema analysiert und bewertet werden. Dies kann zu konkreten Maßnahmenplanungen führen

Folgende Kernaussagen lassen sich festhalten:

- Ein für den Verkehrsträger „Straße“ entwickeltes Resilienzmanagementkonzept wurde erfolgreich auf den Verkehrsträger „Wasserstraße“ übertragen, jedoch sind vereinzelte Anpassungen des Konzeptes erforderlich (z.B. „Richtungsfahrbahnen“).
- Das Konzept wurde anhand zweier Ereignisse am Nord-Ostsee-Kanal (NOK) erprobt: (1) Eine kritische Betriebssituation bzgl. der Wasserbewirtschaftung aufgrund gleichzeitigen Auftretens hoher Wasserstände an Ost- und Nordsee sowie hohem Binnenzufluss; (2) Schiffsanprall an einem Schleusentor im NOK aufgrund von schiffstechnischem Versagen.
- Die netzbezogenen Wirkungen, d.h. die Einschränkungen der Funktionalitäten (insb. Schifffahrt im Längsverkehr) der genannten negativen Ereignisse konnten monetarisiert werden. Für Fallstudie 1 „Hochwasser“ ergaben sich tägliche Kosten in Höhe von bis zu 340.000 EUR; für Fallstudie 2 „Schiffsanprall“ betragen die täglichen Kosten bis zu 269.000 EUR.
- Durch resilienzfördernde Maßnahmen können die Wirkungen erheblich reduziert werden.

1.6 Literatur

BASt (2024): Erprobung und Optimierung eines Resilienzmanagementkonzepts – Fallstudienbasierte Untersuchungen für die Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße im Kontext des Klimawandels, FE 69.0010/2020, Auftraggeber: Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) sowie durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt). Auftragnehmer: BUNG Ingenieure AG, EBP Schweiz AG, ILF Consulting Engineers Austria GmbH, PTV Planung Transport Verkehr GmbH

BfG (2020): Wassermengenbewirtschaftung des NOK unter Klimawandel. Dr. Anna-D. Ebner von Eschenbach, Jochen Hohenrainer. Bericht der Bundesanstalt für Gewässerkunde Nr. 2009. Projekt NOK Phase 1

Björnsen Beratende Ingenieure GmbH (2021): Weiterentwicklung des Wasserhaushaltsmodells für den Nord-Ostsee-Kanal unter Verwendung des Modell-Frameworks HydPy. Abschluss und Erläuterungsbericht im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde

BMUKN (Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Herausgeber) (2003): Hydrologischer Atlas von Deutschland. Projektleitung Bundesanstalt für Gewässerkunde und Universität Freiburg, 2003 erweiterte Ausgabe.

Brauer, C.C., Teuling, A.J., Torfs, P.J.J.F., Uijlenhoet, R., (2014): The Wageningen Lowland Runoff Simulator (WALRUS): a lumped rainfall-runoff model for catchments with shallow groundwater. Geoscientific Model Development, 7: 2313-2332. DOI:10.5194/gmd-7-2313-2014.

Bremicker, M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM - Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Volume 11. https://www.hydrology.uni-freiburg.de/publika/FSH-Bd11-Bremicker.pdf (Abruf 28.05.2024)

Klimaatlas Deutschland, DWD, 1991-2020, https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/mittelwerte/temp_9120_SV_html.html,

Ebner von Eschenbach, A.-D., Zierul, R., Nilson, E. (2025): Fallstudienbasierte Anwendung eines Resilienzmanagementkonzeptes – Wasserstraße (Nord-Ostsee-Kanal)

Ehlers et al, 2023: Informationsblatt Daten Wasserstand (NOK-Projekt). Birte-Marie Ehlers (BSH), Jens Möller (BSH), Frank Janssen (BSH). DAS-Basisdienst. Umfang 4 Seiten, Version vom 22.05.2023.

Geilen, Lutz Malte (2025): Daten- und modellgestützte Analyse von kritischen Bewirtschaftungssituationen im Nord-Ostsee-Kanal (NOK) in der jüngeren Vergangenheit. Praktikumsarbeit vom 17. Februar bis 14. März 2025 in der Bundesanstalt für Gewässerkunde unter der Betreuung von Dr. Anna-Dorothea Ebner von Eschenbach

Heusel, Laura (2023): Analyse von extremen Entwässerungssituationen für den NOK als Grundlagen für Resilienzuntersuchungen. Masterarbeit. Leibniz Universität Hannover (Betreuer: Prof. Schlurmann, Dr. Visscher, Dr. Jordan) und Bundesanstalt für Gewässerkunde (Dr. Anna-Dorothea Ebner von Eschenbach, Peter Krahe)

Mayer et al (2024): Erprobung und Optimierung eines Resilienzmanagementkonzepts – Fallstudienbasierte Untersuchungen für die Verkehrsträger Straße, Schiene und Was-serstraße im Kontext des Klimawandels. Autoren: Mayer G, Diehl A, Großmann S, Lindström F, Zulauf C, Kohl B, Kammerer H, Dahl A (2024). Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE-Nr. 69.0010/2020, Bundesanstalt für Straßenwesen (unveröffentlicht).

Powell, M. J. D. (2009): „The BOBYQA algorithm for bound constrained optimization“

Jian Su. (2022). HBM DKSS version 2013 (DKSS-2013). Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.6769238

WSA NOK (2026): Hochwassermeldeplan inkl. Anhänge.

2 Soll-Konzept „Gewässerkundliche Parameter“

Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Generierung von Wissen hinsichtlich der gewässerkundlichen Zusammenhänge von Salzintrusion und Salzverteilung im Kanal und den resultierenden Auswirkungen auf Gewässergüte, Eisbildung, Vegetation / Boden (im Einzugsgebiet) und Fauna (Makrozoobenthos, Avifauna und Fische) in der Gegenwart und deren Veränderung in der Zukunft.

2.1 Meer + Salz

Teilprojektverantwortlichkeit: Dr. Tim Scheufen, Dr. Hartmut Hein

2.1.1 **Hintergrund**

Bereits seit der Eröffnung des NOK im Jahr 1895 wurde der Salzgehalt entlang des Kanals, wenn auch in unregelmäßigen Zeitabständen, gemessen. Viele dieser Messungen wurden von Gocke et al. (2008) aufbereitet. Darüber hinaus wurden 2021 Leitfähigkeitssensoren an vier amtlichen Pegeln (Dükerswisch, Breiholz, Rendsburg, Königsförde) als Dauermessstationen installiert, welche seit 2025 durch einen Leitfähigkeitssensor am Pegel Brunsbüttel ergänzt werden.

Die Zeitreihe der Salzgehalte im NOK umfasst damit einen Zeitraum von 130 Jahren, in denen sich die Methodiken der Salzgehaltsbestimmung grundlegend verändert haben. Während Ende des 19. Jahrhunderts der Salzgehalt noch durch Titration bestimmt wurde, wird der Salzgehalt heutzutage über die Leitfähigkeit bestimmt. Um die Daten untereinander vergleichen zu können wird der Salzgehalt als praktische Salinität (Sp) in PSU angegeben.

Der Salzgehalt im NOK wird im Wesentlichen durch zwei Faktoren bestimmt: die Einträge von Salzwasser über die Schleusen zur Nord- und Ostsee sowie die Zufuhr von Süßwasser aus dem Einzugsgebiet. Aufgrund der unterschiedlichen Wasserstände in der Tideelbe, der Kieler Förde und dem Kanal sowie der Dichteunterschiede zwischen den beteiligten Wassermassen kommt es bei jeder Schleusung zu einem Austausch von Wasser – sowohl zwischen Nord- bzw. Ostsee und der Schleusenkammer als auch zwischen der Schleusenkammer und dem Kanal. Dieser regelmäßige Massen- und Salztransport stellt den wichtigsten Mechanismus für die räumliche Verteilung des Salzgehalts im NOK dar.

Direkte Beiträge durch Niederschlag auf die Kanaloberfläche oder Salzgehaltserhöhungen durch Verdunstung sind physikalisch zwar vorhanden, mengenmäßig jedoch meist vernachlässigbar im Vergleich zu den salzhaltigen Einträgen bei Schleusungsvorgängen und dem Wasserhaushalt des Einzugsgebiets (BfG-2009).

Die Schleuse in Brunsbüttel liegt im Bereich der Brackwasserzone der Tideelbe. Der mittlere Salzgehalt dort beträgt in den letzten rund 20 Jahren etwa 4 PSU. Gezeitenbewegungen in der Brackwasserzone führen zu Schwankungen mit einem Tidemaximum von ca. 8 PSU und einem Tideminimum von etwa 2 PSU. Diese Werte hängen vom Oberwasserzufluss aus der Mittelelbe ab, weshalb das Salzgehaltsmaximum typischerweise im Sommer bei niedrigeren Zuflüssen auftritt.

Regelmäßige Messungen in der Kieler Förde, im Bereich der Schleuse Kiel-Holtenau ergeben für die Wasseroberfläche einen mittleren Salzgehalt von 16 PSU. Dabei kann es zu einer Schichtung kom-

men, bei der sich die höchsten Salzgehalte in Bodennähe befinden. Kurzfristige Änderungen im Salzgehalt sind entweder auf das Vorrücken von Fronten in der vorgelagerten Kieler Bucht zurückzuführen (Kortum, 2003) oder auf witterungsbedingte Auftriebsereignisse (Karstensen et al., 2014). Insgesamt stimmen die Salzgehalte in der Hörn, in Friedrichsort und in der Außenförde weitgehend überein. Daraus lässt sich schließen, dass der Wasserkörper der Förde insgesamt relativ homogen ist und den Bedingungen der Kieler Bucht entspricht (Kortum, 2003).

Die Salzgehalte in der Kieler Bucht wiederum werden durch zwei Hauptprozesse beeinflusst: Einerseits durch den Zustrom von Frischwasser aus dem Einzugsgebiet der Ostsee, andererseits durch den barotropen Wasseraustausch mit der Nordsee. Letzterer bringt in unregelmäßigen Abständen – unter bestimmten atmosphärischen Bedingungen – größere Mengen an Salzwasser in die Ostsee.

Die Transportprozesse der Wassermassen im NOK spielen eine entscheidende Rolle für die laterale Verteilung des Salzgehalts. Ein barotroper Transport im Kanal entsteht durch Wasserstandsunterschiede zwischen dem NOK und der Nord- bzw. Ostsee, insbesondere wenn eine oder beide Schleusen geöffnet sind oder wenn sich Restströme durch sogenannte Sunkwellen bilden. Die Art der Wasserbewirtschaftung beeinflusst dabei maßgeblich den Salzgehalt im Kanal: Wird z. B. nur über Brunsbüttel entwässert, verschiebt sich das salzhaltige Ostseewasser weiter westwärts.

Im NOK fungieren sowohl das salzhaltige Meerwasser als auch das Frischwasser als laterale Quellen. Ihre unterschiedlichen Dichten liefern eine potenzielle Energie, die, ähnlich wie ein ästuarinen Austauschstrom (Hansen und Rattray, 1966), einen dichtegetriebenen Austauschstrom antreiben kann. Dabei entsteht bei lateralen Dichteunterschieden zunächst eine Schichtung der Wassersäule. Erst durch eine kontinuierliche Durchmischung kommt es zu einem effektiven lateralen Transport ins Kanalinnere (Simson, 1981). Während in natürlichen Ästuaren meist die Gezeitenströme für die Durchmischung sorgen, übernimmt im NOK der Schiffsverkehr diese Funktion. Auch Windwellen können zur Durchmischung beitragen.

2.1.2 **Klimatische Entwicklung der Salzgehalte in der Kieler Förde und in der Elbemündung**

Bereits vor über 300 Jahren, am 6. Februar 1697, führte Christiana Albertina Samuel Reyher im Kieler Hafen ein „Experimentum Novum“ zur Bestimmung des Salzgehalts von Meerwasser durch (Kortum, 1994). Dieses erste dokumentierte Salzgehaltsexperiment ergab einen Wert von etwa 18 PSU. Ab dem Jahr 1868 wurden in der Kieler Förde regelmäßig, etwa monatlich, Salzgehalt- und Temperaturmessungen durchgeführt (Karsten, 1874; Wolf et al., 2021). Zwar liegen diese Messreihen nicht lückenlos bis in die Gegenwart vor, doch gibt es immer wieder Zeitabschnitte, in denen über mehrere Jahre hinweg Daten erhoben wurden. Durch die Einbeziehung von Zeitreihen anderer Beobachtungsstationen in der südwestlichen Ostsee (z. B. Lennartz et al., 2014) lassen sich vorhandene Lücken weitgehend schließen. Die Korrelation der Salzgehaltsdaten zwischen den verschiedenen Messorten ist ausreichend hoch, sodass sich mithilfe statistischer Verfahren Werte aus benachbarten Regionen – etwa aus der Eckernförder Bucht oder vom Leuchtturm Kiel in der Kieler Bucht – auf die Kieler Förde übertragen lassen.

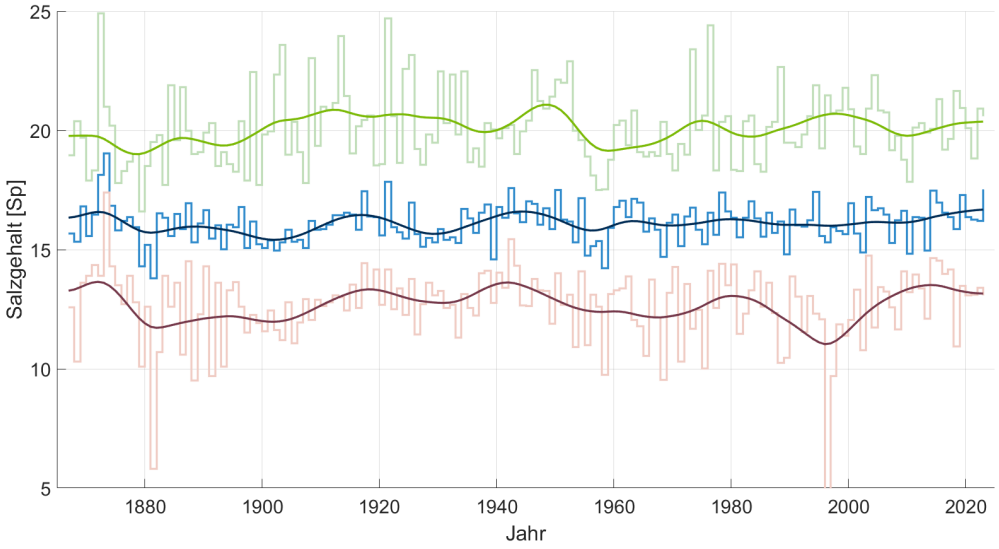


Abbildung 2-1: *Veränderungen der Salzgehalte in der Kieler Förde seit 1866. Dargestellt als Jahresmittelwerte (blau), sowie der höchste (grün) und niedrigste (rot) monatliche Mittelwert eines Jahres.*

Werden alle vorhandenen Daten zusammengefasst ergibt sich die Entwicklung der Salzgehalte in der Kieler Förde seit 1868 (Abbildung 2-1). Der vieljährige Mittelwert beträgt etwa 16 PSU, es lässt sich kein historischer klimatischer Trend erkennen. Mittels eines LOESS-Filters mit einer Filterbreite von 11 Jahren wird der nichtlineare Trend aufgezeigt. Dieser lässt eine multidekadische Variabilität in der Größenordnung von etwa 1 PSU erkennen. Viel größer ist die jährliche Amplitude der Monatsmittelwerte des Salzgehaltes, die etwa 6 PSU beträgt.

Die ersten Messungen des Salzgehaltes in der Elbemündung lassen sich bis ins 19. Jahrhundert zurückführen. Mehr oder weniger regelmäßige Beobachtungen beginnen etwa um 1950 und sind online verfügbar (Flussgebietsgemeinschaft Elbe, 2025), www.küstendaten.de). Abbildung 2-2 zeigt den historischen Verlauf der Salzgehalte bei Brunsbüttel und den Verlauf einer statischen Rekonstruktion der Salzgehalte auf Basis der Oberwasserzuflüsse. Es ist zu sehen, dass die Rekonstruktion den Verlauf insgesamt recht gut widerspiegelt, d.h. die erhöhten Salzgehalte der letzten Jahre sind auf die niedrigeren Abflüsse zurückzuführen.

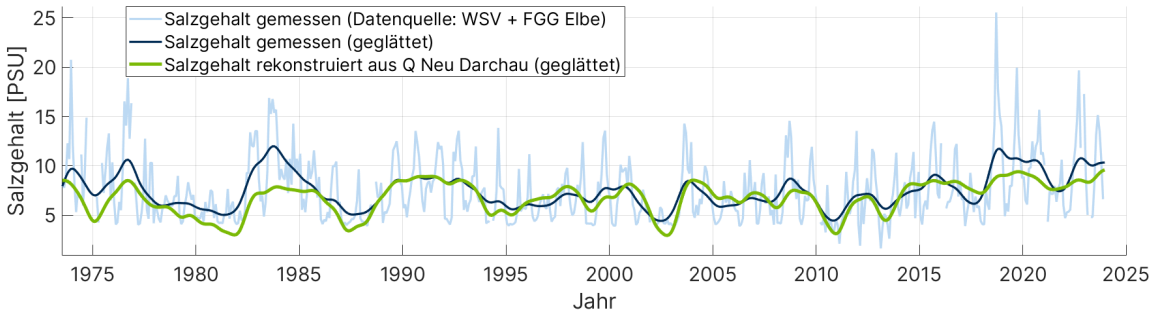


Abbildung 2-2: *Veränderungen der Salzgehalte in der Elbe bei Brunsbüttel seit etwa 1970.*

Wie für die Kieler Förde gibt es wieder zwei Gegenspieler, die auf lange Sicht die Salzgehalte der Elbemündung bestimmen, zunächst der Oberwassereintrag aus der Mittelelbe und zweitens der Meeresspiegelanstieg. Während der direkte Zusammenhang zwischen Oberwasserzufluss und Salzgehalt

sehr deutlich in Abbildung 2-2 zu erkennen ist, ist die Abhängigkeit des Salzgehalts vom Meeresspiegelanstieg nicht zu erkennen.

2.1.3 Entwicklung der Salinität im NOK 1895 bis 2023

2.1.3.1 *Historische Veränderung des Salzgehaltes entlang des NOK*

Über seine mittlerweile 130-jährige Geschichte hat sich die Bewirtschaftung und damit insbesondere die Entwässerung des NOK gewandelt. Dabei wurde die Bewirtschaftung graduell von einem offenen System mit einer reinen Entwässerung über die Schleuse in Brunsbüttel und offenem Zugang zur Ostsee in Kiel Holtenau auf ein geschlossenes System mit zunehmender Entwässerung auch über die Schleuse in Kiel Holtenau umgestellt (Gocke et al. 2008). Diese Veränderungen hatten einen klaren Effekt auf den Salzgehalt entlang des NOK.

Die Anfänge des NOK

Kurz nach seiner Eröffnung von 1896 bis 1898 war es üblich den NOK mit Salzwasser zu „spülen“ (Brandt 1897, Gocke et al. 2008), dabei wurde die Schleuse in Brunsbüttel bei Niedrigwasser geöffnet und bei Flut geschlossen, während die Schleusen in Kiel-Holtenau immer offengehalten wurden. Nur bei Wasserständen, die um maximal 0,5 m vom mittleren Wasserstand der Kieler Förde abwichen, wurde die Schleuse in Kiel Holtenau geschlossen. Diese „Spülung“ führte zu einem fast linearen Salzgradienten, der auf seinem Weg nur sehr langsam von den Zuflüssen verdünnt wurde (Abbildung 2-3 a).

Nach 1898 wurde diese „Spülung“ des Kanals eingestellt, jedoch wurde der Kanal weiterhin größtenteils über die Schleuse in Brunsbüttel entwässert, wobei auch eine Entwässerung über ein ca. 1913 errichtetes Entwässerungssiel, das sogenannte Auslassbauwerkt, möglich war. Der daraus resultierende geringe Durchfluss und die Tatsache, dass das Salzwasser nur noch während Schleusungen als Bodennaher Dichtestrom in den NOK gelangen konnte, führte zu einem stärkeren Einfluss der Frischwasserzuflüsse, wobei jedoch der lineare Salzgradient erhalten blieb (Abbildung 2-3 b).

Entwicklung 1938 bis 2001

Von den 1940er Jahren an wurde der NOK immer stärker über beide Schleusen entwässert. Diese Umstellung führte zu einem sattelförmigen Verlauf des Salzgehaltes mit einem Minimum zwischen NOK-km 20 bis 40 (Abbildung 2-3 c, d). Der erhöhte Salzgehalt an der Schleuse in Brunsbüttel ist darauf zurückzuführen, dass – wie bereits für die Schleuse in Kiel-Holtenau beschrieben – Salzwasser während der Schleusung als bodennaher Dichtestrom in den NOK eindringt. Der Salzgehalt des Wassers, dass über Brunsbüttel in den Kanal gelangt, ist stark von den Oberwasserabfluss der Elbe abhängig. Dadurch gelangt mal salzhaltigeres oder mal frischeres Wasser in den NOK. (Abbildung 2-3 c, d).

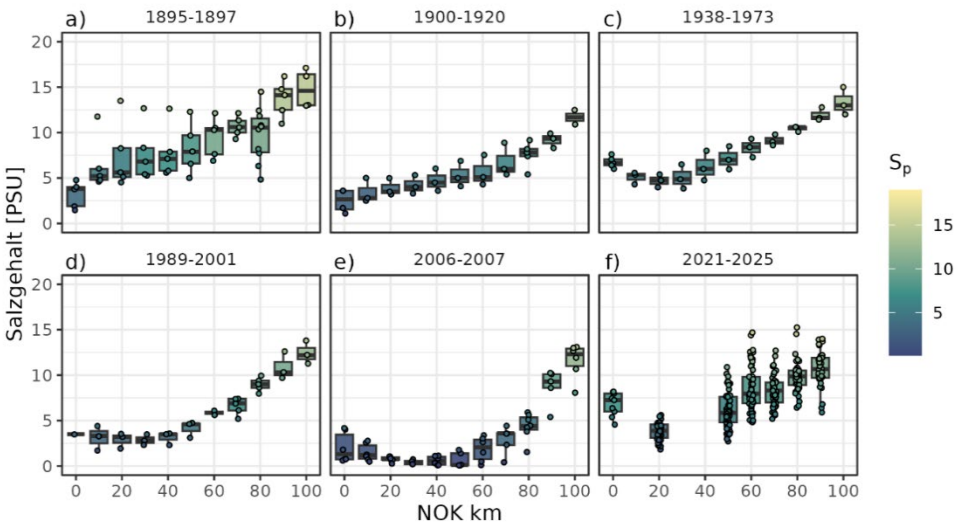


Abbildung 2-3: Boxplots des Salzgehaltes entlang des NOK gegliedert in sechs Zeitabschnitte. Da die Messungen der einzelnen Messkampagnen nicht immer am gleichen Ort durchgeführt wurden, wurden die Daten zur besseren Vergleichbarkeit in 10 km Blöcke zusammengefasst. Die Punkte sind die Werte der einzelnen Messungen, bzw. für die hochfrequenten daten ab 2021 monatliche Mittelwerte.

Anfang des 21. Jahrhundert (2006 / 2007)

In den Jahren 2006 und 2007 wurde die Entwässerung über das Objekt Auslassbauwerk Kiel-Holtenau (Wehranlage) weiter verstärkt. Ein Netto-Durchfluss in eine der beiden Richtungen ist wahrscheinlich nicht mehr feststellbar (Gocke et al. 2008). Von beiden Enden dringt Salzwasser über die Schleusen in den Kanal, wobei der Salzgehalt in Brunsbüttel aufgrund des Einflusses des Oberwasserabflusses der Elbe wesentlich geringer ausfällt als in Kiel Holtenau (Abbildung 2-3 e). Der sattelförmige Verlauf bleibt weiterhin bestehen, wobei jedoch der Salzgehalt zwischen NOK-km 20 bis 40 fast auf einen Salzgehalt von 0 PSU absinkt.

Seit dem Jahr 2021 stehen hochauflösende Dauermessungen zur Verfügung. Es ist zu erkennen, dass der Salzgehalt in Kiel Holtenau jetzt niedriger ist als noch 2006/7, der Salzgehalt im Rest des NOK jedoch deutlich angestiegen ist. Der sattelförmige Verlauf bleibt weiterhin bestehen (Abbildung 2-3 f). Dies kann teilweise mit einem geringeren Oberwasserabfluss in der Elbe in den Jahren 2014 bis 2023 erklärt werden. In diesem Zeitraum lag der Abfluss im Mittel 200 m^3/s niedriger als im Zeitraum 2000 bis 2013 (Daten der WSV).

Hochfrequente Messungen ab 2021

Seit 2021 werden minütliche Werte der Leitfähigkeit an vier amtlichen Pegeln innerhalb des NOK gemessen und ergeben so eine sehr detaillierte Übersicht der zwischen- und innerjährlichen Schwankungen des Salzgehaltes von 2021 bis heute (Abbildung 2-4).

Klar zu erkennen ist ein Anstieg des Salzgehaltes in den Sommermonaten und ein Absinken in den Wintermonaten. Ein solches zyklisches Verhalten lässt im ersten Moment einen klimatischen Einfluss durch höhere Niederschläge und damit höheren Zufluss von Frischwasser auf den Salzgehalt im NOK vermuten.



Abbildung 2-4: Minütliche Daten des Salzgehaltes an den Pegeln Brunsbüttel, Dükerswisch, Breiholz, Rendsburg und Königsförde.

Bei einer genaueren Untersuchung des Salzgehaltes und einem Vergleich der gemessenen Abflüsse am Pegel Hammer in der Eider für den Zeitraum Winter/Frühjahr 2021/2022 (Abbildung 2-5) zeigt sich, dass ein höherer Zufluss für das Absinken des Salzgehaltes verantwortlich sein kann. Bei dem Absinken des Salzgehaltes Ende 2022 konnte jedoch kein Zusammenhang zu den Abflussdaten festgestellt werden (Abbildung 2-5). Bezieht man jedoch den Wasserstand in die Analyse mit ein, kann man sehen, dass dieser trotz geringer Abflüsse im Zeitraum der Reduktion des Salzgehaltes merklich angestiegen ist (Abbildung 2-5 Mitte). Die Ursache für den Anstieg des Wasserstandes kann mit einer Schließung des NOK in diesem Zeitraum und gleichzeitigem, wenn auch leichtem, Zufluss in den NOK zusammenhängen. Bei einer solchen Bewirtschaftungssituation kann sich das Frischwasser von den östlich gelegenen Zuflüssen im Kanal ausbreiten, was sich in dem sukzessiven Absinken der Salzgehalte von Ost nach West widerspiegelt. Eine Bewertung, warum die Salzgehalte am Pegel in Dückerswisch, dem Pegel mit den niedrigsten Salzgehalten, nicht abskinken und auch wieder als erstes Ansteigen kann auf Basis der Daten nicht erklärt werden. Die Auswertung der hochfrequenten Daten zeigt also, das der Salzgehalt sehr stark von der jeweiligen Bewirtschaftung und klimatischen Faktoren abhängig ist.

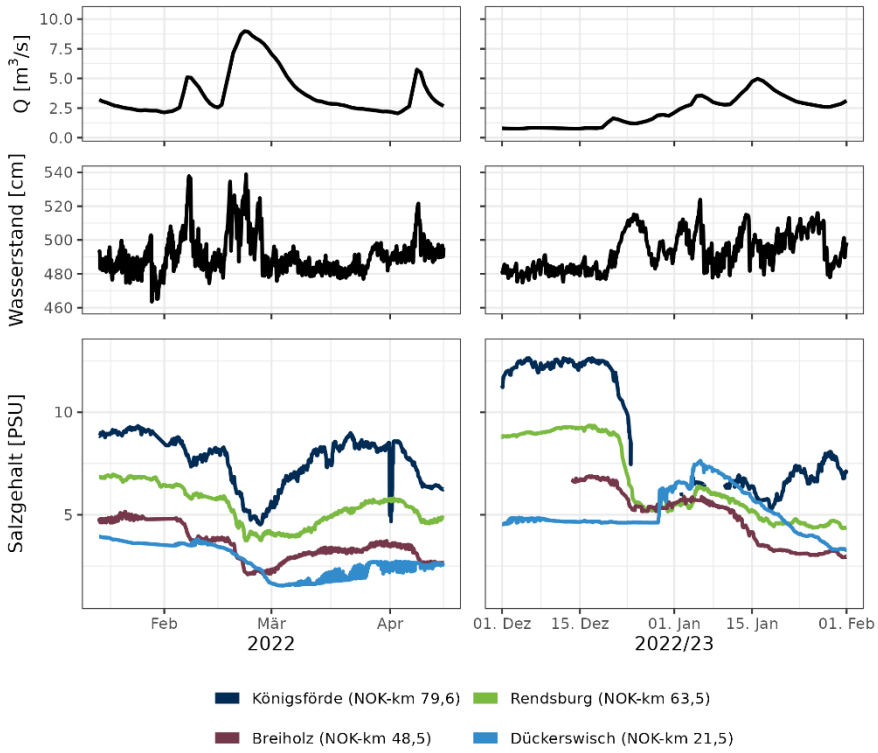


Abbildung 2-5: Zeitreihe des Abflusses am Pegel Hammer an der Eider (oben), des Wasserstandes im NOK (mitte) und Salzgehalt an den Pegeln Breiholz, Dükerswisch, Rendsburg und Königsförde (unten) für die Monate Januar bis April 2022 (links) und Dezember 2022 bis Ende Januar 2023 (rechts).

2.1.4 **Zukünftige Entwicklung zur Salinität in Kieler Förde und Elbmündung**

Die Veränderung der Salinität in der Zukunft in der Kieler Förde und in der Tideelbe basierend auf verschiedenen Klimaprojektionen wird mit ca. 2 PSU Zunahme des Salzgehalts abgeschätzt (www.DAS-Basisdienst.de, www.kuwik.baw.de). Um die Angaben abzusichern, wurde zusätzlich ein analytischer methodischer Ansatz gewählt (Siefert, 1996, MacCready, 1999, Savenije, 2005), mit dem der gemeinsame Effekt der Meeresspiegelveränderung und des Abflusses berechnet werden kann, bei gleichzeitiger Abschätzung der Unsicherheiten. Auch hier zeigt sich eine Zunahme des Salzgehaltes um ca. 2 PSU, so dass die Ergebnisse bestätigt werden.

Aufgrund der Lage der Kieler Förde und der zwei gegeneinander arbeitenden Prozesse – Salzwassereinbrüche aus der Nordsee, der Ostsee und dem Zufluss aus dem Einzugsgebiet – ist es schwierig die zukünftige Entwicklung zur Salzverteilung der Kieler Förde abzuschätzen. Klimamodelle zeigen eine Zunahme des Niederschlags im Einzugsgebiet der Ostsee (Meier et al., 2022). Der DAS-Basisdienst stellt Modellergebnisse zur Abschätzung der zukünftigen Salzgehalte im Bereich der Deutschen Ostseeküste bereit (https://das.bsh.de/). Hieraus ergibt sich eine Änderung von -1 P_S ± 2 PSU. Das verwendete Modell berücksichtigt jedoch nicht den Einfluss des Meeresspiegelanstieges auf die Salzgehalte. Insgesamt zeigen Klimamodelle zwar keine signifikante Veränderung der Häufigkeit der Salzwassereinbrüche, bei steigenden Meeresspiegelanstieg steigt jedoch das Wasservolumen des Austausches, was folglich zu einer Zunahme des Salzgehaltes führt (Meier et al., 2022, Hoidor et al., 2015). Ausgehend von Maier (2003), sowie Hoidor et al. (2015) d.h. mittels eines einfachen Transport- und Vermischungsansatzes lässt sich eine Zunahme des Salzgehaltes von 0.5 P_S – 1.5 PSU durch

die Volumenzunahme durch den Meeresspiegelanstieg abschätzen. Aufgrund der sehr großen Unsicherheiten in den Abschätzungen, den gegeneinander wirkenden Prozessen und der Tatsache, dass sich die Oberflächensalinität in der Kieler Förde in der Vergangenheit kaum verändert hat, ist es gegeben, für praktische Abschätzungen zunächst **keine Änderung** der Salzgehalte anzunehmen.

2.1.5 **Literatur**

Gocke, K., Lenz, J., Koppe, R., Rheinheimer, G. et al. (2008): *Hydrographisch-chemische und planktologische Untersuchungen im Nord-Ostsee-Kanal*, Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 52(5), 245–257.

Hein, B. (2013): *Processes of stratification and destratification in the Mekong ROFI – seasonal and intraseasonal variability*, Dissertation, Staats- und Universitätsbibliothek Hamburg Carl von Ossietzky.

Hansen, D.V. & Rattray, M. (1966): *Gravitational circulation in straits and estuaries*, Journal of Marine Research, 23, 104–122.

Wolf, F., Clemmesen, C. & Hiebenthal, C. (2021): *Water temperature, salinity and oxygen data from 2005–2019 in front of GEOMAR Pier, Kiel, Germany*, PANGAEA, https://doi.org/10.1594/PANGAEA.930974.

Kortum, G. (2003): *Die Kieler Förde in meereskundlicher Sicht*, Schriften des Naturwissenschaftlichen Vereins für Schleswig-Holstein, 68, 83–100.

Hein, H. (2019): *Zustandsbeschreibung der Hydrologie*, in: BfG (2019): Auswirkungsprognose nach HABAB (2017) zu Unterhaltungstätigkeiten im NOK von Kkm 30 bis Kkm 95. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, BfG-1993.

Petzoldt, L. & Konietzky, H. (2016): *Numerische CFD-DEM-Analyse von Schüttsteindeckwerken an Seeschifffahrtsstraßen*, Johann-Ohde-Kolloquium, BAW & TU Dresden, Karlsruhe, 1.–2. Juni 2016, Heft 99, 35–44.

Kösters, F., Uliczka, K., Böttner, C. U. & Kastens, M. (2017): *Wechselwirkung von Schiff und Wasserstraße im Küstenbereich – Ein Überblick wissenschaftlicher Methoden*, Forschungs- und Entwicklungsprojekte der BAW, 100, 147–169.

Gesing, C. (2018): *Ermittlung der hydraulischen Uferbelastungen aus Naturmessungen*, in: Technisch-biologische Ufersicherungen am Rhein – Chancen und Herausforderungen, 25–34.

Kortum, G. (1994): *Samuel REYHER (1635–1714) und sein „Experimentum Novum“*, Institut für Meereskunde, https://oceanrep.geomar.de/id/eprint/30367/

Karstensen, J., Liblik, T., Fischer, J., Bumke, K. & Krahmann, G. (2014): *Summer upwelling at the Boknis Eck time-series station (1982–2012) – a combined glider and wind data analysis*, Biogeosciences, 11(13), 3603–3617.

Karsten, G. (1873): *Die physikalischen Beobachtungen an den Stationen der deutschen Ostsee- und Nordsee-Küsten*, in: Jahresbericht der Kommission zur wissenschaftlichen Untersuchung der Deutschen Meere in Kiel, Band 1, Wiegandt, Hempel & Parey.

Karsten, G. (1874): *Beobachtungen über Wassertemperaturen bei der Expedition im Jahre 1871*, Wiegandt, Hempel & Parey.

Meier, H. E. M., Kniebusch, M., Dieterich, C., Gröger, M., Zorita, E., Elmgren, R. et al. (2022): *Climate change in the Baltic Sea region: a summary*, Earth System Dynamics, 13(1), 457–593.

Meier, H. E. M., Höglund, A., Almroth-Rosell, E. & Eilola, K. (2017): *Impact of accelerated future global mean sea level rise on hypoxia in the Baltic Sea*, Climate Dynamics, 49.

Hordoir, R., Axell, L., Löptien, U., Dietze, H. & Kuznetsov, I. (2015): *Influence of sea level rise on the dynamics of salt inflows in the Baltic Sea*, Journal of Geophysical Research: Oceans.

Meier, H. E. M. (2003): *Modeling decadal variability of the Baltic Sea: 2. Role of freshwater inflow and large-scale atmospheric circulation for salinity*, Journal of Geophysical Research: Oceans, 108(C11), 3368. https://doi.org/10.1029/2003JC001799Siefert, W. (1996): *Salzgehalt im Elbeästuar – Entwicklung, heutiger Stand, Perspektiven*, Wasser & Boden, 48(11), 10–16.

MacCready, P. (1999): *Estuarine adjustment to changes in river flow and tidal mixing*, Journal of Physical Oceanography, 29, 708–726.

Savenije, H.H.G. (2005): *Salinity and Tides in Alluvial Estuaries*, Elsevier.

Flussgebietsgemeinschaft Elbe (FFG Elbe) (2025): *Salzgehaltsdaten der Elbe* [Datensatz], abgerufen von https://www.fgg-elbe.de

Lennartz, S. T., Lehmann, A., Herrford, J., Malien, F., Hansen, H. P., Biester, H. & Bange, H. W. (2014): *Long-term trends at the Boknis Eck time series station (Baltic Sea), 1957–2013: does climate change counteract the decline in eutrophication?*, Biogeosciences, 11(22), 6323–6339.

BfG-2009, 2020: Wassermengenbewirtschaftung des NOK unter Klimawandel. Dr. Anna-D. Ebner von Eschenbach, Jochen Hohenrainer. Bericht der Bundesanstalt für Gewässerkunde. Projekt NOK Phase 1.

2.2 Gewässergüte + Salz

Teilprojektverantwortlichkeit: Dr. Tanja Bergfeld-Wiedemann, Dr. Annette Becker

2.2.1 **Hintergrund**

Die Gewässergüte umfasst den Sauerstoff- und Nährstoffhaushalt eines Gewässers sowie seinen trophischen Zustand. Dieser wird durch das Angebot an Pflanzennährstoffen eines Standorts geprägt, wobei der Chlorophyll a-Gehalt (als Äquivalent für die Algenbiomasse) als Bewertungsmaßstab dient. Darüber hinaus dienen das Biovolumen und die Artzusammensetzung des Phyto- und Zooplanktons als Indikator für die Gewässergüte. Daneben ist die Wassertemperatur ein prägender Faktor für den Sauerstoff- und Nährstoffhaushalt und das Planktonwachstum. Es wurden sechs Probestellen (km 2, km 7,3, km 43, km 62,5, km 80, km 92) in jeweils drei Wassertiefen (1 m, 3 m und 8 m) entlang des NOK untersucht, die Beprobung erfolgte von April bis September in den Jahren 2021 bis 2023 sechs Mal pro Jahr. Im Folgenden werden die Gewässergüte und Planktonentwicklung im Zusammenhang mit der Salzausbreitung in Ergänzung zum Sachstandsbericht BfG-2190 (Ebner von Eschenbach et al. (2024) dargestellt.

2.2.2 **Darstellung des Ist-Zustands der Gewässergüte**

Der Salzgehalt an den untersuchten 18 Probenahmeterminen hat im Zeitraum seit 2021 - wie in Kapitel 2.1.3 beschrieben - von Ost (NOK-km 92) nach West (NOK-km 2) deutlich abgenommen (Tabelle

2.2-1). Dies liegt in der aktuellen Bewirtschaftungsstrategie begründet (Hauptrichtung ist die Entwässerung über Brunsbüttel). Zudem wird das salzhaltige Wasser aus der Kieler Förde durch den Einstrom von Süßwasser in den Kanal zunehmend verdünnt (siehe Ausführungen in Kapitel 2.1.3). Im Jahresmittel hat der NOK einen Zufluss von ca. 17 m³/s mit einer Hauptfließrichtung von der Kieler Förde im Osten Richtung Elbe im Westen (siehe Kapitel 1.3.2). Es wurde nur eine geringfügige Schichtung im Salzgehalt am östlichen Kanalende erfasst.

Tabelle 2.2-1 zeigt die Entwicklung der Wassertemperatur und die übliche Erwärmung über die Sommermonate Juli bis August/ September bis über 20 Grad Celsius und die sich anschließende Abkühlung über den Winter bis zum Frühjahr (Bsp. April bis zu 8 Grad Celsius). Dabei zeigen die Messungen, dass aus der Kieler Förde kühleres Wasser in den NOK gelangt, das sich entlang des NOK mit seiner Hauptfließrichtung Richtung Westen erwärmt. Es wurde eine deutliche Temperaturerhöhung zwischen den beiden Messstellen km 92 und km 80 erfasst, die vor allem durch den Eiderzustrom bei km 85,8 verursacht wird. Es wurden bei den Tiefenprofilen der Wassertemperatur nur geringe Unterschiede gemessen, somit lag keine Temperaturschichtung vor.

Tabelle 2.2-1: Mittelwert von Salzgehalt, Wassertemperatur und Sauerstoffgehalt der Sondenmessungen in den Tiefen 1 m, 3 m und 8 m entlang des NOK 2021-2023. Markierung der Minima und Maxima anhand von Farbskalen. Daten der BfG.

		Salzgehalt [PSU]						Wassertemperatur [°C]						Sauerstoffgehalt [mg/L]					
	km	2	7,3	43	63	80	92	2	7,3	43	63	80	92	2	7,3	43	63	80	92
2021	Apr	3,4	3,1	4,2	6,0	9,1	14,1	8,9	9,3	8,8	8,5	8,3	7,3	10,3	11,1	13,5	15,5	10,7	10,7
	Mai	3,8	3,3	3,9	6,4	9,3	14,1	12,4	12,4	12,0	11,9	11,6	10,4	8,9	9,0	9,1	9,4	9,6	9,7
	Jun	3,8	3,5	4,5	6,9	9,7	13,6	18,8	18,8	18,5	18,2	18,1	16,8	7,8	8,1	9,9	8,8	9,3	9,2
	Jul	4,7	4,1	4,7	7,1	9,6	13,4	22,5	22,3	22,1	21,8	21,7	19,3	6,9	6,6	6,0	7,8	7,8	7,8
	Aug	3,9	3,4	5,0	6,9	9,4	13,2	20,6	21,1	21,0	20,8	20,5	18,0	7,4	7,4	7,2	7,2	7,5	7,2
	Sep	4,2	3,6	5,4	7,5	10,4	13,8	19,3	19,5	19,2	18,8	18,3	17,4	6,8	7,1	8,2	8,0	8,2	8,2
2022	Apr	3,2	2,7	3,4	5,1	6,9	11,3	11,0	11,1	10,9	10,9	10,2	8,9	9,5	9,9	10,2	10,6	10,3	10,3
	Mai	4,2	3,5	3,5	4,6	7,3	11,2	16,5	16,6	16,6	16,4	15,9	13,9	8,7	8,4	10,1	9,7	9,3	9,7
	Jun	5,9	5,2	3,9	5,9	9,1	13,5	19,4	19,4	19,1	18,6	17,8	15,7	8,5	8,4	11,0	9,5	9,9	8,6
	Jul	6,9	6,1	4,4	6,8	9,6	13,4	21,4	21,4	21,1	20,4	19,9	18,8	7,4	7,0	7,5	8,0	8,9	8,2
	Aug	8,1	7,2	5,4	7,6	10,8	15,0	22,7	22,6	22,7	22,0	21,7	20,3	6,9	6,5	7,5	7,5	8,1	7,6
	Sep	8,3	7,3	5,4	7,5	10,2	13,1	19,4	19,8	19,6	19,7	19,2	18,7	7,1	6,7	8,1	7,1	7,9	7,4
2023	Apr	2,8	3,0	4,5	6,6	9,1	12,1	10,4	10,7	10,4	10,5	10,3	9,7	9,7	10,2	10,1	9,4	10,1	10,1
	Mai	3,8	3,4	4,9	6,3	8,2	10,9	14,5	15,2	14,7	14,9	14,7	14,0	8,6	9,6	10,1	10,4	9,5	9,9
	Jun																		
	Jul	7,0	6,3	5,2	6,9	9,6	14,1	20,7	20,9	21,3	21,1	20,3	17,7	7,7	7,5	8,2	7,5	8,0	7,0
	Aug	7,2	6,7	6,2	9,1	11,7	16,4	20,2	20,1	19,8	19,3	18,9	17,6	7,2	6,9	7,2	7,3	8,1	7,8
	Sep	6,9	5,6	7,7	10,3	12,9	16,8	20,9	21,0	21,0	20,8	20,5	19,4	6,9	6,6	7,9	8,4	10,5	7,4

Der Sauerstoffgehalt schwankte an den 18 Beprobungsterminen tiefengemittelt zwischen 6,0 und 15,5 mg O2/L, die entsprechende Sauerstoffsättigung schwankte zwischen 71,6 und 137,8 % O2. Die drei Untersuchungsjahre unterschieden sich deutlich in ihren Wetterbedingungen, dies hat sich aber nicht im Sauerstoff niedergeschlagen. Der Sauerstoffhaushalt eines Gewässers wird durch den Temperaturhaushalt des Gewässers, Einmündungen und interne Stoffumsetzungen und durch Algenwachstum geprägt. Bei höheren Temperaturen sinkt die Löslichkeit von Sauerstoff, entsprechend sinken im Sommer saisonal bedingt die Sauerstoffgehalte. 2021 wurden Sauerstoffübersättigungen in der Kanalmitte im Frühjahr bei km 43 und km 63 erfasst, parallel zu den Maxima im Chlorophyll a-Gehalt (Tabelle 2.2-2). In der Regel lagen die niedrigsten Sauerstoffgehalte am westlichen Ende vor, aber zeigten im Messzeitraum keine kritischen Werte. Dies wurde auch von Neumann (1992) beschrieben. Kontinuierliche Sondenmessungen der BfG in der Schleusenanlage Kiel-Holtenau 2024 zeigten aber kritische Sauerstoffgehalte auf der Binnenseite und insbesondere auf der Fördeseite (Abbildung 2-6). Hier zeigte sich die Belastung der Kieler Förde bei Wassertemperaturen über 16 °C und

unabhängig vom Salzgehalt. Entsprechend wird ein verstärkter Einstrom von Ostseewasser in den NOK kleinräumig den Sauerstoffhaushalt belasten.

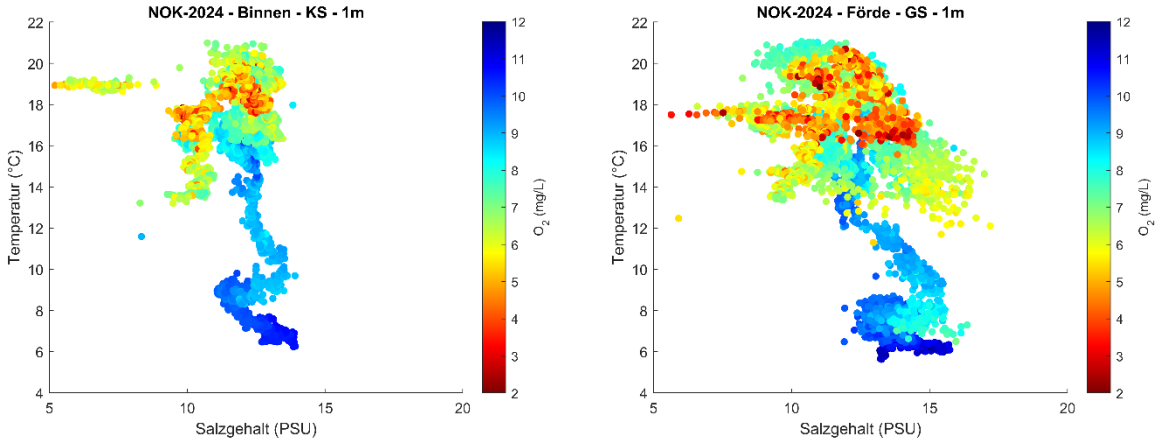


Abbildung 2-6: *Darstellung von 30-Minuten-Werten von Salzgehalt (x-Achse), Wassertemperatur (y-Achse) und Sauerstoffgehalt (Farbcodierung) berechnet aus 10-Minuten-Werten in 1 m Wassertiefe an der Messstelle Große Schleuse Kiel-Holtenau Binnen- und Förde-seitig im Messzeitraum 20.03.2024 bis 15.10.2024 (Daten von BfG).*

Die Nährstoffe Stickstoff und Phosphor nahmen 2021-2023 von Ost nach West mit der Hauptfließrichtung entlang des NOK zu (Tabelle 2.2-2). Diese Verteilung im Längsverlauf zeigte sich bereits bei Messungen verschiedener Nährstoffkomponenten 1978-1991, die höheren Werte werden mit saisonal unterschiedlichen Einschwemmungen aus dem landwirtschaftlich geprägten Einzugsgebiet begründet (Neumann 1992). Hier zeigt sich der deutliche Einfluss der Fließrichtung und damit auch der Wasserbewirtschaftung auf die Verteilung der Nährstoffe entlang des NOK.

Nährstoffe werden anhand ihres Jahresmittelwertes bewertet, hier wurde nur das Sommerhalbjahr April bis September beprobt. Zu diesem Zeitpunkt findet das meiste Algenwachstum statt, als Folge sind Nährstoffe zunehmend aufgezehrt und erreichen eher niedrige Werte. Die höchsten Nährstoffgehalte wurden im Messzeitraum in allen drei Jahren im April am Beginn der Vegetationsperiode gemessen. Dabei betrugen die höchsten Mittelwerte über das Sommerhalbjahr an Gesamt-Stickstoff 2,6 mg N/L bei km 7,3 und 2,8 mg N/L bei km 2. Für Gesamt-Stickstoff kann mit Blick auf den Schutz der Küstengewässer das von der LAWA empfohlene von 2,8 mg/L gesamt-Stickstoff angesetzt werden (LAWA 2014). Es ist davon auszugehen, dass diese Ziele im Jahresmittel zumindest im westlichen Teil des NOK überschritten werden. Ähnliches gilt für den Gesamt-Phosphor, der Orientierungswert nach LAWA (2015) für den Fließgewässertyp 23[8] beträgt 0,10 mg P gesamt/L, dieser Wert wurde bereits im Saisonmittel bei km 2 und km 7,3 überschritten.

Der Chlorophyll a (Chla)-Gehalt wird als Maß für die vorhandene Algenbiomasse in einem Gewässer verwendet, in Tabelle 2.2-2 ist der Mittelwert des Chla aus 1 m und 3 m Wassertiefe erfasst mit nasschemischen Methoden modifiziert nach DIN 38409-60:2019-12 dargestellt. Dabei entsprechen die gemessenen Chlorophyll a-Gehalte nicht der Algenproduktion, sondern der aus Algenwachstum und Wegfraß resultierenden Algenbiomasse. Das in den NOK einmündende Wasser strömt von Ost nach West. Entlang des NOK fand ein Anwachsen der Algenbiomasse bis in die Kanalmitte (km 63 und 43) statt, weiter westlich wurden niedrigere Algengehalte gemessen. Die detailliertere Darstellung der Ver-

[8] Rückstau- bzw. brackwasserbeeinflusste Ostseezuflüsse

teilung der Chla-Gehalte saisonal und entlang des NOK erlaubt ein differenzierteres Bild der Algenentwicklung als im Statusbericht BfG-2190 für die Jahre 2023 und 2024 (Ebner von Eschenbach, A. et al (2024): 2021 wurde ein deutliches Frühjahrsmaximum erfasst, 2022 und 2023 zeigte sich ein etwas späteres Algenmaximum im Mai und Juni. Der Saisonmittelwert 2021-2023 lag bei km 43 mit 14,7 µg Chla/L am höchsten, gleichzeitig lag der Maximalwert bei 55,4 µg Chla/L. Für den Fließgewässertyp 23[9] entspricht dies einem guten eutrophen Zustand (Mischke et al. 2022).

Tabelle 2.2-2: Mittelwert von Gesamt-Stickstoff-, Gesamt-Phosphor- und Chlorophyll a-Gehalt (nasschemisch, nur 1m und 3m) in den Tiefen 1 m, 3 m und 8 m entlang des NOK 2021-2023. Markierung der Minima und Maxima anhand von Farbskalen. Daten der BfG.

		N gesamt [mg/L]						P gesamt [mg/L]						Chlorophyll a [µg/L]					
	km	2	7,3	43	63	80	92	2	7,3	43	63	80	92	2	7,3	43	63	80	92
2021	Apr	4,5	3,9	3,2	1,8	1,4	0,9	0,40	0,21	0,09	0,05	0,05	0,05	9,2	24,1	55,4	52,0	3,7	1,2
	Mai	3,0	3,1	2,1	1,5	1,2	0,8	0,24	0,12	0,05	0,05	0,05	0,05	9,1	11,0	8,7	2,8	2,6	1,3
	Jun	3,0	2,3	1,7	1,1	0,9	0,7	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	7,8	7,6	24,2	4,9	3,6	2,8
	Jul	2,4	2,7	2,2	1,2	1,5	0,8	0,15	0,13	0,11	0,04	0,05	0,04	7,1	7,3	5,9	5,3	6,4	2,5
	Aug	2,3	2,2	1,5	1,0	0,8	0,6	0,15	0,15	0,07	0,05	0,05	0,05	9,6	8,8	9,4	5,9	6,7	3,0
	Sep	2,8	2,6	1,2	0,9	0,7	0,6	0,23	0,22	0,11	0,10	0,05	0,05	6,9	7,6	11,4	4,9	3,7	4,2
2022	Apr	4,3	3,7	3,5	2,6	1,9	1,2	0,29	0,14	0,09	0,05	0,05	0,05	4,1	3,0	6,1	5,5	2,8	2,4
	Mai	3,3	3,2	2,4	1,7	1,1	0,6	0,17	0,13	0,06	0,04	0,04	0,05	7,1	8,9	15,5	6,5	5,0	3,6
	Jun	2,4	2,4	1,9	1,2	0,8	0,7	0,15	0,09	0,06	0,05	0,05	0,06	12,4	9,8	35,4	12,6	15,4	3,3
	Jul	2,0	1,9	1,4	0,8	0,5	0,6	0,13	0,09	0,06	0,05	0,04	0,05	11,9	6,1	7,8	9,2	6,1	3,3
	Aug	1,8	1,9	1,2	0,8	0,6	0,5	0,16	0,12	0,10	0,07	0,06	0,06	3,0	1,2	3,3	2,1	0,9	2,7
	Sep	1,7	1,7	0,9	0,7	0,5	0,5	0,16	0,12	0,09	0,09	0,06	0,06	5,0	6,7	14,7	3,3	4,9	3,0
2023	Apr	4,3	3,3	2,8	1,9	1,4	1,0	0,26	0,10	0,06	0,07	0,04	0,04	14,3	10,7	6,0	2,6	1,5	2,5
	Mai	3,6	2,8	2,0	1,4	1,0	0,6	0,19	0,08	0,05	0,04	0,04	0,04	11,7	17,0	18,5	16,9	6,9	4,7
	Jun	3,0	2,9	1,8	1,4	0,9	0,7	0,16	0,14	0,07	0,06	0,06	0,06	7,2	7,6	14,9	4,6	7,7	1,7
	Jul	2,1	1,9	1,3	0,7	0,5	0,4	0,09	0,07	0,05	0,04	0,04	0,04	10,3	7,4	12,6	5,3	4,6	1,7
	Aug	2,1	1,8	1,5	0,9	0,7	0,5	0,08	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	9,6	6,5	6,1	4,1	3,8	3,2
	Sep	2,1	1,9	1,3	0,7	0,5	0,4	0,17	0,12	0,09	0,08	0,08	0,08	8,2	8,3	8,9	5,0	5,4	1,4

Mittlerweile liegen die Zählergebnisse der in 1 m Tiefe entnommenen Phyto- und Zooplanktonproben vor, es wurde die in Fischer (2020) beschriebene Methodik angewandt, die Analyse erfolgte durch AquaEcology GmbH & Co. KG im Auftrag der BfG. Während der Algenblüte im Frühjahr bzw. Frühsommer dominierten Bacillariophyceen (Kieselalgen) den NOK (Tabelle 2.2-3), sie können sich aufgrund ihrer schnellen Wachstumsrate und der geringen Konkurrenz am Anfang der Vegetationsperiode in Gewässern durchsetzen. Centrales und Skeletonema waren die häufigsten Gattungen.

Daneben zeigte sich eine deutliche Dominanz von Cyanobakterien (Blaualgen), diese wurden frühestens im Juni bis in den September in allen drei Untersuchungsjahren erfasst. Das Zusammenspiel aus warmen Sommern, länger anhaltenden Schönwetterperioden mit geringem Abfluss und Nährstoffbelastung sorgt dafür, dass sich Cyanobakterien im NOK entwickeln können. Das Vorhandensein von Cyanobakterien ist kein direktes Anzeichen für das Vorhandensein von Cyanotoxinen. Die Toxinproduktion hängt von den spezifischen Arten ab, die in einer Probe vorhanden sind, sowie von den Stämmen, die Toxine produzieren können. Die dominanten Gattungen im NOK waren Aphanocapsa und Planktothrix, für die es Berichte über Toxinproduktion in verschiedenen Gewässern gibt. Die BfG entwickelt derzeit eine Reihe von Informationsblättern zu schädlichen Algenarten, die ein hohes Auftrittsrisiko und erhebliche potenzielle Auswirkungen auf die Umwelt und aquatische Ökosysteme haben (Faréz Román et al. 2025). Sie werden im Mai 2026 auf der Internetseite der BfG veröffentlicht. In

[9] Rückstau- bzw. brackwasserbeeinflusste Ostseezuflüsse

absoluten Zahlen wurde bei NOK-km 80 am 12.09.2023 ein maximales Biovolumen von 1,5 mm³/L Cyanobakterien erfasst, der Chlorophyll a-Gehalt betrug 8,9 µg Chla/L und war damit eher niedrig.

Chlorophyceen (Grünalgen) waren im Kanal weniger ausgeprägt, Chlorococcales dominierten die Grünalgengemeinschaft. An Cryptophyceen war die Gattung Telaulax am stärksten vertreten, bei den Dinoflagellaten die Gattung Heterocapsa.

Tabelle 2.2-3: Anteil der verschiedenen Algengruppen am Biovolumen des Phytoplanktons in 1 m Tiefe entlang des NOK 2021-2023. Markierung der Minima und Maxima anhand von Farbskalen. Daten der BfG.

Bacillariophyceen

km	2	7,3	43	63	80	92
Apr	82%	85%	96%	99%	59%	88%
Mai	99%	84%	94%	46%	17%	22%
Jun	81%	68%	92%	39%	42%	96%
Jul	97%	95%	86%	91%	57%	7%
Aug	81%	68%	67%	11%	89%	60%
Sep	91%	26%	68%	84%	60%	91%
Apr	66%	62%	74%	2%	45%	48%
Mai	53%	59%	53%	32%	1%	12%
Jun	0%	47%	94%	69%	17%	89%
Jul	2%	49%	30%	42%	5%	39%
Aug						
Sep	79%	66%	59%	37%	61%	87%
Apr	100%	90%	52%	95%	76%	39%
Mai	84%	95%	97%	96%	56%	75%
Jun	25%	25%	66%	77%	13%	26%
Jul	58%	36%	38%	33%	10%	54%
Aug	12%	16%	12%	13%	45%	96%
Sep	3%	32%	39%	46%	27%	92%

Cyanobakterien

2	7,3	43	63	80	92
0%	1%	0%	0%	0%	0%
0%	1%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%
19%	30%	16%	3%	0%	0%
7%	63%	6%	0%	0%	0%
0%	0%	1%	0%	0%	0%
1%	0%	0%	0%	0%	0%
14%	11%	1%	0%	0%	0%
67%	12%	2%	0%	0%	0%
11%	25%	29%	1%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	1%	0%	0%	0%	0%
54%	36%	13%	0%	5%	0%
21%	19%	37%	1%	6%	8%
67%	36%	37%	11%	20%	0%
63%	33%	26%	8%	70%	0%

Chlorophyceen

2	7,3	43	63	80	92
0%	2%	0%	0%	9%	1%
1%	5%	3%	3%	6%	0%
0%	3%	1%	6%	0%	0%
2%	3%	10%	2%	0%	0%
0%	1%	13%	22%	0%	3%
1%	8%	17%	6%	0%	0%
20%	1%	2%	0%	0%	0%
2%	1%	1%	3%	0%	1%
13%	7%	2%	25%	63%	0%
7%	8%	8%	15%	0%	1%
6%	5%	8%	24%	0%	0%
0%	3%	0%	0%	0%	0%
0%	2%	0%	0%	0%	0%
16%	7%	3%	1%	2%	0%
9%	17%	14%	11%	10%	0%
17%	26%	14%	7%	2%	0%
32%	22%	29%	7%	0%	0%

Cryptophyceen

km	2	7,3	43	63	80	92
Apr	4%	3%	2%	1%	29%	8%
Mai	0%	7%	1%	29%	38%	66%
Jun	0%	0%	1%	1%	19%	2%
Jul	1%	1%	3%	5%	18%	45%
Aug	0%	0%	3%	24%	10%	16%
Sep	1%	3%	9%	7%	21%	1%
Apr	0%	27%	15%	65%	43%	39%
Mai	3%	2%	3%	28%	14%	57%
Jun	23%	20%	1%	1%	5%	8%
Jul	21%	27%	19%	26%	19%	28%
Aug						
Sep	2%	4%	4%	9%	8%	5%
Apr	0%	5%	4%	4%	13%	26%
Mai	1%	1%	1%	2%	32%	7%
Jun	0%	20%	15%	17%	62%	14%
Jul	10%	29%	10%	51%	33%	27%
Aug	4%	21%	36%	49%	8%	1%
Sep	2%	12%	5%	7%	0%	2%

Dinoflagellaten

2	7,3	43	63	80	92
15%	8%	2%	0%	2%	2%
0%	2%	1%	21%	37%	5%
3%	0%	1%	1%	38%	1%
0%	0%	0%	1%	24%	46%
0%	0%	0%	38%	0%	15%
0%	0%	0%	3%	18%	7%
14%	3%	1%	1%	1%	5%
0%	1%	11%	5%	0%	11%
50%	15%	2%	5%	15%	3%
3%	5%	15%	5%	74%	32%
1%	1%	0%	29%	31%	7%
0%	1%	2%	0%	8%	30%
0%	1%	0%	0%	10%	15%
6%	12%	3%	5%	18%	59%
2%	0%	0%	3%	39%	10%
0%	0%	0%	19%	24%	3%
0%	0%	1%	32%	3%	6%

Sonstige (v.a. Euglen.)

2	7,3	43	63	80	92
0%	1%	0%	0%	1%	1%
0%	1%	0%	2%	2%	7%
15%	29%	5%	52%	2%	0%
0%	0%	1%	1%	1%	2%
0%	0%	0%	1%	1%	5%
0%	0%	0%	0%	1%	0%
0%	7%	8%	32%	11%	8%
40%	38%	31%	31%	86%	19%
0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	26%	11%	1%	1%
1%	0%	0%	0%	1%	1%
0%	1%	41%	1%	3%	6%
16%	0%	1%	2%	2%	2%
0%	0%	0%	0%	0%	2%
0%	0%	0%	0%	3%	1%
0%	0%	0%	1%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%

Das untersuchte Zooplankton hatte pro Individuum eine Größe von maximal 55 µm. Da die einzelnen Tiere sehr unterschiedlich groß waren, ist das Frischgewicht und nicht die Individuendichte dargestellt (Tabelle 2.2-4). Das erfasste Frischgewicht des Zooplanktons entspricht wie beim Phytoplankton dem aus Wachstum, Wegfraß und Zustrom resultierenden Netto-Frischgewicht. Ein Zusammenhang zur gemessenen Phytoplanktonentwicklung ist nicht abzuleiten, was darauf hindeutet, dass Phytoplankton nicht die bevorzugte Nahrungsquelle war. Das größte Frischgewicht wurde im September 2022 und 2023 im östlichen Teil gefunden, zu den anderen Probeterminen wurden relativ geringe Zooplanktondichten gemessen. Die Gruppe der Copepoden (Kopffüßer) dominierte die Zooplanktonzusammensetzung durchgängig im westlichen Teil und zeitweise im Östlichen. Es waren die Gattungen Acartia und

Eurytemora dominant. Absolut gesehen wurde am 23.05.23 bei km 80 die höchste Copepodendichte von 60 Ind/L bzw. einem Frischgewicht von 1,31 mg/L gemessen. Rotatoria (Ruderfußkrebse) waren im östlichen Teil stark vertreten, dominiert von den Gattungen Ascomorpha und Asplanchna. Absolut gesehen wurde am 18.07.23 bei km 80 die höchste Rotatoriendichte von 467 Ind/L bzw. einem Frischgewicht von 1,28 mg/L gemessen. Daneben waren im östlichen salzigeren Teil Phyllopoda (Blattfußkrebse) mit der Gattung Podon zeitweise stark vertreten. Außerdem kamen saisonal bedingt verstärkt unbestimmte Muschellarven im Juni bei km 92 vor. Es herrschten auch Hydrozoa (Nesseltiere) im östlichen Teil im August und insbesondere September vor, dabei handelte es sich um unbestimmte Medusen. Durch das hohe Gewicht einer einzelnen Meduse wurde zu diesen Zeitpunkten 2022 und 2023 auch das höchste Frischgewicht an Zooplankton im Kanal gemessen. Das beschriebene Zooplankton wird durch die Salzgehaltsverteilung und die Schwankungen im Salzgehalt geprägt, so wurden nur im salzhaltigen östlichen Teil Medusen erfasst.

Tabelle 2.2-4: Frischgewicht des Zooplanktons und Anteil der verschiedenen Gruppen am Frischgewicht des Zooplanktons in 1 m Tiefe entlang des NOK 2021-2023. Markierung der Minima und Maxima anhand von Farbskalen. Daten der BfG.

Frischgewicht Zooplankton [mg/L]

	km	2	7,3	43	63	80	92
	Monat						
2021	Apr	0,62	0,50	0,39	0,12	0,03	0,01
	Mai	0,24	0,75	0,36	0,46	0,30	0,16
	Jun	0,14	0,14	0,31	0,25	0,71	0,46
	Jul	0,09	0,40	0,16	0,02	0,08	0,11
	Aug	0,05	0,09	0,32	0,07	0,29	0,16
	Sep	0,09	0,25	0,61	0,45	0,24	0,17
2022	Apr	0,14	0,33	0,59	0,57	0,21	0,10
	Mai	0,05	0,15	0,26	0,12	1,18	0,97
	Jun	0,02	0,03	0,68	0,14	0,09	0,16
	Jul	0,24	0,28	0,01	0,04	0,13	0,01
	Aug						
	Sep	0,03	0,48	0,22	3,53	5,32	0,14
2023	Apr	0,40	0,30	0,47	0,97	0,42	0,09
	Mai	0,15	0,25	0,25	0,43	1,56	0,56
	Jun	0,20	0,39	0,22	0,11	0,26	0,50
	Jul	0,17	0,85	0,53	0,56	2,19	0,45
	Aug	0,13	0,72	0,34	0,85	0,87	0,05
	Sep	0,20	0,46	1,05	4,28	1,99	0,45

Copepoda

	2	7,3	43	63	80	92
2021	76%	53%	2%	2%	12%	90%
	97%	97%	94%	91%	75%	51%
	92%	84%	63%	92%	94%	46%
	95%	100%	58%	74%	84%	47%
	52%	67%	80%	57%	58%	35%
	96%	78%	99%	100%	95%	29%
2022	97%	95%	98%	90%	93%	96%
	88%	92%	28%	98%	59%	47%
	91%	96%	98%	72%	37%	34%
	16%	100%	99%	59%	92%	37%
	96%	99%	73%	2%	2%	97%
2023	99%	86%	78%	99%	67%	71%
	98%	91%	98%	99%	91%	72%
	99%	99%	96%	76%	95%	4%
	96%	100%	90%	83%	41%	31%
	97%	100%	96%	57%	15%	75%
	94%	99%	58%	16%	28%	53%

Rotifera

	2	7,3	43	63	80	92
2021	1%	3%	3%	90%	83%	5%
	0%	0%	0%	6%	3%	23%
	7%	12%	37%	5%	0%	0%
	0%	0%	29%	4%	9%	20%
	0%	1%	0%	42%	41%	54%
	0%	7%	0%	0%	2%	70%
2022	1%	3%	1%	9%	6%	3%
	1%	3%	65%	1%	0%	0%
	6%	3%	0%	1%	58%	4%
	0%	0%	1%	0%	5%	2%
	0%	0%	0%	0%	0%	0%
2023	0%	9%	21%	1%	32%	21%
	0%	2%	2%	0%	0%	0%
	0%	0%	0%	0%	1%	21%
	0%	0%	0%	0%	58%	61%
	0%	0%	0%	0%	1%	1%
	0%	0%	4%	0%	0%	1%

Phyllopoda

	km	2	7,3	43	63	80	92
	Monat						
2021	Apr	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Mai	0%	2%	5%	4%	21%	14%
	Jun	0%	3%	0%	3%	6%	53%
	Jul	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Aug	0%	4%	0%	0%	0%	10%
	Sep	1%	12%	0%	0%	0%	0%
2022	Apr	1%	0%	0%	1%	0%	1%
	Mai	11%	5%	7%	1%	40%	53%
	Jun	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Jul	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Aug						
	Sep	0%	0%	0%	0%	0%	0%
2023	Apr	0%	2%	0%	0%	0%	1%
	Mai	2%	8%	0%	1%	8%	21%
	Jun	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Jul	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Aug	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Sep	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Bivalvia

	2	7,3	43	63	80	92
2021	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	1%	0%	1%	0%	0%	0%
	0%	0%	6%	20%	1%	5%
	6%	0%	2%	1%	0%	0%
	1%	0%	0%	0%	2%	0%
2022	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	0%	0%	1%	19%	4%	48%
	0%	0%	0%	0%	2%	3%
	0%	0%	0%	0%	0%	0%
2023	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	0%	0%	0%	0%	0%	7%
	0%	0%	1%	11%	3%	71%
	0%	0%	0%	0%	0%	1%
	0%	0%	0%	0%	1%	5%
	1%	1%	0%	0%	0%	0%

Hydrozoa

	2	7,3	43	63	80	92
2021	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	0%	0%	0%	0%	0%	0%
2022	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	0%	0%	0%	0%	1%	0%
	0%	0%	0%	8%	0%	0%
	0%	0%	0%	41%	0%	0%
	0%	0%	0%	98%	98%	0%
2023	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	0%	0%	0%	11%	0%	0%
	0%	0%	10%	16%	0%	6%
	0%	0%	0%	41%	81%	0%
	0%	0%	34%	83%	72%	40%

Insgesamt verhielten sich die betrachteten Größen der Gewässergüte unterschiedlich im Längsprofil des NOK. Die Wassertemperatur wird durch das Wetter und die Wasserbewirtschaftung geprägt, mit der Hauptfließrichtung fließt kühleres Wasser aus der Kieler Förde Richtung Westen und erwärmt sich dabei, sprunghaft durch den Einstrom der Eider. Der Sauerstoffgehalt hängt generell von internem Stoffumsatz, vom Algenwachstum, aber auch den Zuflüssen aus dem Einzugsgebiet und der Bewirtschaftung des Kanals ab. Die Nährstoffgehalte zeigten ein Maximum am westlichen Ende des NOK,

auch durch Einträge aus dem Einzugsgebiet in den NOK. Das Phytoplankton hatte in der Regel sein Maximum in der Kanalmitte, das Zooplankton (Größe bis 55 µm) kam in geringen Mengen im Kanal vor, höhere Mengen traten insbesondere am östlichen, salzhaltigeren Ende durch Muschellarven und Medusen auf.

2.2.3 **Zukünftige Entwicklung der Gewässergüte**

Es wurden verschiedene Aspekte der Gewässergüte untersucht, die sehr unterschiedliche Steuergrößen haben. Der Fokus des vorliegenden Berichts liegt auf den Auswirkungen von Änderungen im Salzgehalt im NOK auf die Gewässergüte.

Die Erhöhung der Nährstoffgehalte entlang des NOK ist nicht vom Salzgehalt abhängig, sondern von der Hauptfließrichtung im Kanal und dem Eintrag aus dem Einzugsgebiet. Da eine zukünftige Bewirtschaftung der landwirtschaftlichen Flächen nur schwer abzuschätzen ist, wird davon ausgegangen, dass sich die Nährstoffgehalte im NOK nicht verändern.

Der Chlorophyll a-Gehalt als Maß für die vorhandene Algenbiomasse war in der Kanmitte am höchsten. Dieses größte Algenmaximum wird am Pegel Breiholz im Rahmen von Zukunft NOK kontinuierlich mit Multiparametersonden gemessen, außerdem der Chlorophyll a-Gehalt in Kiel-Holtenau, um die Eutrophierung entlang des NOK zu erfassen. Der Salzgehalt beeinflusst die Artzusammensetzung des Phyto- und Zooplanktons. Für die Kieler Förde wird eine Erhöhung um 2 PSU basierend auf Klimaprojektionen abgeschätzt (Kap. 2.1.4). Dabei ist das Plankton an schwankende Salzgehalte angepasst, die prognostizierte zusätzliche Erhöhung um maximal bis zu 2 PSU liegt in einer Größenordnung, die die Artzusammensetzung im NOK nicht merklich verändern wird, weshalb die Planktonzusammensetzung nicht weiter untersucht wird.

Ein möglicherweise zunehmender Einstrom von Wasser aus der Kieler Förde wird den Sauerstoffhaushalt im NOK belasten, da in der Kieler Förde zeitweise kritische Sauerstoffgehalte unter 4 mg/L gemessen werden. Durch die Erwärmung als Folge des Klimawandels wird die Löslichkeit des Wassers für Sauerstoff sinken, was mögliche kritische Situationen weiter fördert. Für den vorliegenden Bericht wurde die Gewässergüte an sechs Probestellen (km 2, km 7,3, km 43, km 62,5, km 80, km 92) in jeweils drei Wassertiefen (1 m, 3 m und 8 m) an 18 Terminen 2021-2023 untersucht. Die messtechnische Begleitung im Fortsetzungsprojekt Zukunft NOK insbesondere von Wassertemperatur und Sauerstoff erfolgt in Kiel-Außen (km 98,1), Kiel-Binnen (km 97,8) und Breiholz (km 48,5) mit Multiparametersonden, um mögliche Veränderungen mit diesmal kontinuierlichen Messungen zu erfassen. Durch das Algenmaximum in der Kanalmitte werden in Breiholz Multiparametersonden zur Erfassung des Chlorophyll a-Gehalts installiert, die auch den Sauerstoffverlauf messen. Durch die zweite Messstelle in Breiholz kann der krititsche Sauerstoffgehalt am Pegel Kiel für den NOK eingeordnet werden.

2.2.4 **Literatur**

Ebner von Eschenbach, A., Bergfeld-Wiedemann, T., Frank, D., Fuchs, E., Hein, H., Hohenrainer, J., Krahe, P., Meißner, D., Promny, M., Radny, D., Scheufen, T., von Landwüst, C., Wetzel, M. (2024): NOK Phase 2 - Wasserbewirtschaftung, Gewässerkunde, Ökologie. Sachstandsbericht, BfG-2190

Fárez Román V., Fischer H., Kleinteich J., Frassl M. (2025): Fact sheets on harmful phytoplankton species in large temperate freshwater rivers. Abstract available in section “Poster” A02 Extremereignisse und globaler Wandel at: https://www.dgl-jahrestagungen.de/assets/dgl-2025----book-of-abstracts-2025-10-02.pdf

Fischer, H. (2020): Das Phytoplankton des Rheins 2018. Hrsg: Internationale Kommission zum Schutz des Rheins, IKSR-Bericht Nr. 273, 17 Seiten.

Mischke, U., Riedmüller, U., Hoehn, E. (2022): Verfahrensanleitung für die Bewertung von planktondominierten Flüssen und Strömen mit Phytoplankton gemäß EG-Wasserrahmenrichtlinie. PhytoFluss On-line Version 5.1.x. Stand 30. November 2022. 31 S. inkl. Anhang.

Neumann, M. (1992): Beschreibung der Wasserbeschaffenheit des Nord-Ostsee-Kanals (NOK) als Beitrag für eine Umweltverträglichkeitsuntersuchung zum NOK-Ausbau im Bereich Rendsburg-Ost, km 61.674 – km 65.850. Labor für Biologische Gewässeruntersuchung, Kiel. Bericht im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde, 45 Seiten.

2.3 Kanal + Salz

Teilprojektverantwortlichkeit: Dr. Markus Promny, Dr. Anna Ebner von Eschenbach

2.3.1 **Hintergrund**

Wasser mit unterschiedlichem Salzgehalt zeichnet sich durch verschiedene Dichten aus. Mit steigendem Salzgehalt nimmt auch die Dichte zu. In Gewässern mit geringer Strömungsgeschwindigkeit bilden sich bei Vorhandensein von Wasser unterschiedlichen Salzgehaltes Dichteströmungen sowie vertikale Schichtungen aus. Dies trifft auf den NOK zu.

Das Wasser im Kanal wird von mehreren Süßwasserzuflüssen sowie Schöpfwerken entlang der Kanalstrecke gespeist. Zusätzlich wird durch die Schleusungsvorgänge an den beiden Kanalenden Wasser in den Kanal eingetragen. Dieses Wasser wird bei den aktuell ca. 20.000 Schleusungsvorgängen pro Jahr teilweise in den Kanal eingetragen und stellt damit die Quelle für die vorhandene Salzkonzentration im NOK dar. Über die Verhältnisse der Salzkonzentration im NOK liegen Messdaten (Längsfahrten, Tiefenprofile) aus mehreren Jahren (jeweils zeitlich begrenzte Kampagnen) vor. Dauermessungen liegen erst seit kurzem und nur sehr lokal vor. Die Konzentration ist im östlichen Kanalbereich deutlich höher als im Mittelteil und im westlichen Kanalabschnitt (siehe Abbildung 2-9). Eine vertikale Schichtung mit zunehmendem Salzgehalt mit der Wassertiefe ist im östlichen Kanalbereich zeitweise vorhanden (Abbildung 2-7, GOCKE ET AL., 2008). Die Salzverteilung im Kanal ist mit gegenwärtigem Kenntnisstand auch von der Entwässerungssteuerung in Brunsbüttel / Kiel-Holtenau abhängig zu sein. Dies belegen historische Auswertungen von Salinitätsdaten (GOCKE ET AL, 2008).

Aufgrund der Fragestellungen der WSV ist es notwendig, die vorhandenen Salzkonzentrationen im NOK im aktuellen Ist-Zustand sowie für Bewirtschaftungsszenarien und Prognosezustände (baulich: Kanalvertiefung, hydrologisch: Meeresspiegelanstieg infolge Klimawandel) modelltechnisch abzubilden.

2.3.2 **Vorgehen**

Um die Frage nach dem Einfluss von a) verschiedenen Entwässerungsszenarien, b) baulichen Veränderungen im Kanal und c) einer angepassten Bewirtschaftung des Kanals unter Klimawandel auf Salzverteilung im Kanal beantworten zu können, ist eine numerische Modellierung erforderlich beantworten. Hierfür musste ein Modell (Delft 3D) aufgebaut und kalibriert / validiert werden; da es keine bestehenden Modelle zur Beantwortung der Fragestellungen für das Untersuchungsgebiet gibt.

Die Messdatenbasis ist für Kalibrierung und Validierung ist hinreichend gut. Die oberirdischen Zuflüsse zum Kanal sind messtechnisch zwar flächendeckend nicht erfasst, können jedoch über eine Wasserhaushaltsmodellierung (mit HydPy-L-NOK, siehe hierzu auch Kapitel 1.2.3) abgeschätzt werden. Die unterirdischen Zuflüsse zum Kanal sind von untergeordneter Bedeutung und für den Kalibrierungszeitraum nicht hinreichend bekannt.

Die Verteilung des Salzgehaltes im NOK wird von 3D-Phänomenen beeinflusst. Diese in Modellen mit weniger als drei räumlichen Dimensionen abzubilden, erfordert einen erhöhten Abstraktionsgrad und Parametrisierungsaufwand. Weiterhin ist fraglich, inwiefern solche Modelle für Szenarien mit geänderten Bedingungen (geänderte Schleusen- bzw. Kanalgeometrie, geänderte Randbedingungen infolge Klimawandel) prognosefähig wären. Daher ist es angezeigt, zur Beantwortung eingangs genannten Fragestellungen der WSV auf 3D-Modellierungen zu setzen.

Um die Auswirkungen der geplanten und bereits begonnenen Maßnahmen zum Ausbau der Oststrecke sowie einer möglichen Kanalvertiefung auf den Salzgehalt zu untersuchen, wurden 3D hydrodynamische numerische Modelle von drei baulichen Situationen erstellt:

- Istzustand vor Ausbau der Oststrecke (Modell Istzustand)
- Zustand nach Ausbau der Oststrecke (Modell Ausbau)
- Zustand nach Ausbau der Oststrecke und Kanalvertiefung von 11 auf 12 m (Modell Ausbau und Vertiefung)

Anders als ursprünglich geplant erstrecken sich jedoch die Modelle bereits über den gesamten Kanal und nicht nur als Pilotmodelle über die Oststrecke. Das gewählte Vorgehen begründet sich vor allem aus der Schwierigkeit, die für ein Teilmodell notwendigen Randbedingungen in der Kanalstrecke zu definieren. Mit dem letztendlich gewählten Ansatz wurde dieses Problem umgangen und die Aussagekraft der Modelle sogar erheblich erweitert.

Die erstellten Modelle erlauben erstmals eine modelltechnische Abbildung der dreidimensionalen Vorgänge, die den Salzhaushalt des NOK beeinflussen. Der Fokus liegt auf dem gewässerkundlichen Systemverständnis, sodass einige Vereinfachungen möglich und nötig waren: So werden die Schleusenvorgänge nicht einzeln explizit abgebildet, sondern mittels einer externen vereinfachten Seeschleusenformulierung, welche die tatsächlichen Kammergeometrien und Schiffsbewegungen berücksichtigt und zeitlich mittelt, um die Randbedingungen für den Salzaustausch zwischen Schleusen und Kanal zu ermitteln. Weitere Vereinfachungen betreffen die Abbildung des westlichen Kanalabschnittes, da der Schwerpunkt der Untersuchungen auf den für den Salzhaushalt wesentlichen Ostteil des Kanals ab ca. km 80 gelegt wurde.

Die Erstellung der Modelle wurde im Rahmen einer Vergabe durch das Büro HKV (NL) durchgeführt. Die Anwendung des Modells in Szenarienrechnungen erfolgt sowohl beim Auftragnehmer als auch auf dem High-Performance-Rechencluster (HPC) der BfG.

2.3.3 **Ergebnisse zur Abbildung der Salzverteilung im NOK im Modell**

Als eine wesentliche Literaturquelle wurde die Abbildung der gemessenen Salzverteilungen in Gocke et al. (2008) mit den Modellergebnissen vergleichend betrachtet. Abbildung 2-7 zeigt links die Ergebnisse der Messungen und rechts die im Modell berechneten Salzgehalte für jeweils vergleichbare Zeitpunkte als Längsschnitte in Kanalmitte. Die Verteilungen sind sehr ähnlich, jedoch nicht identisch, was sowohl an Unsicherheiten der Daten als auch an Modellannahmen und -vereinfachungen liegt.

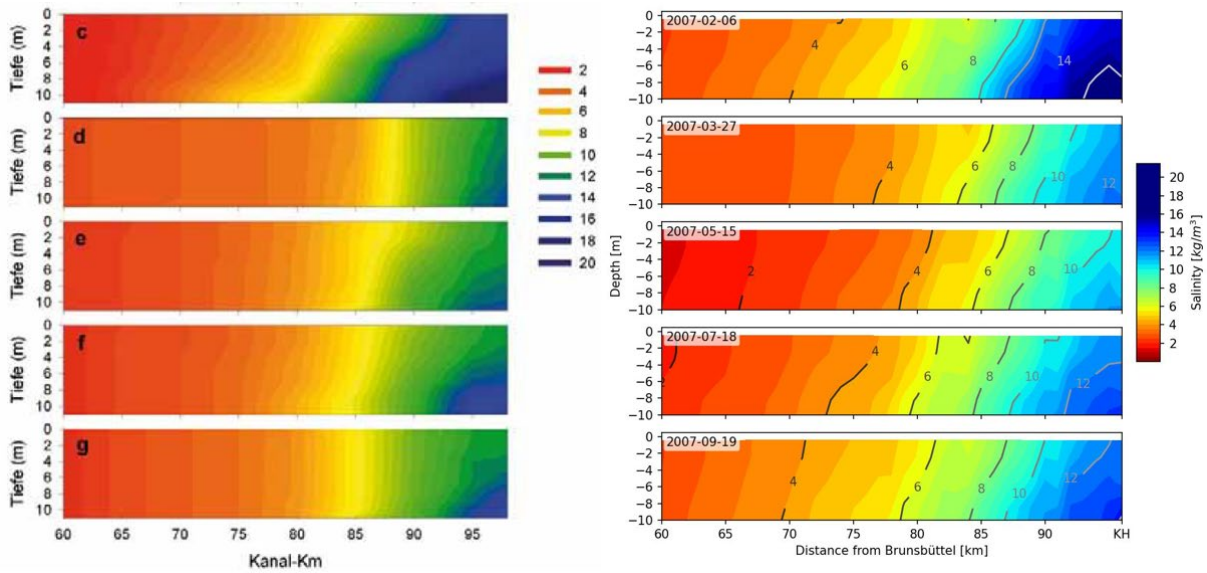


Abbildung 2-7: Salzverteilung entlang des Kanals gemäß Gocke et al. (2008) und Ergebnis der Modellierung für jeweils gleiche Zeitpunkte in 2006/2007 (siehe auch Kapitel 2.1).

2.3.4 Einflüsse auf die Salzverteilung im NOK

Im Ergebnis der Modellierungen wurden mehrere teils bereits bekannte Einflüsse auf die Salzverteilung im NOK bestätigt und erstmals genauer quantifiziert. So wurde gezeigt, dass die Zuflüsse von Süßwasser entlang des Kanals jeweils entscheidenden Einfluss auf die Verhältnisse haben. Insbesondere an der Eidermündung bei km 85,8 ist eine deutliche Veränderung der Salinität im Kanalverlauf erkennbar.

Ebenfalls konnte gezeigt werden, dass der Wind, insbesondere die Windrichtung bei Sturm einen spürbaren Einfluss auf die Intrusion von Salz sowie Salzverteilung im Kanal haben. Wind entlang des Kanals in Richtung der Schleusen bewirkt eine Strömung in Längsrichtung an der Kanaloberfläche, welche in eine Gegenströmung an der Kanalsohle resultiert. Diese wiederum verstärkt die gleichgerichtete Dichteströmung des in der Tiefe infolge der Schleusungen eindringenden Salzwassers. Abbildung 2-8 zeigt am Beispiel der Monate Januar bis März 2007, wie sich die Salzkonzentration entlang des Kanals infolge des Windeinflusses verändert. In Zeiten westlicher Winde (rote Linienabschnitte im oberen Diagramm) erhöht sich die mittlere Salzkonzentration im östlichen Kanalabschnitt (rote Töne im unteren Diagramm).

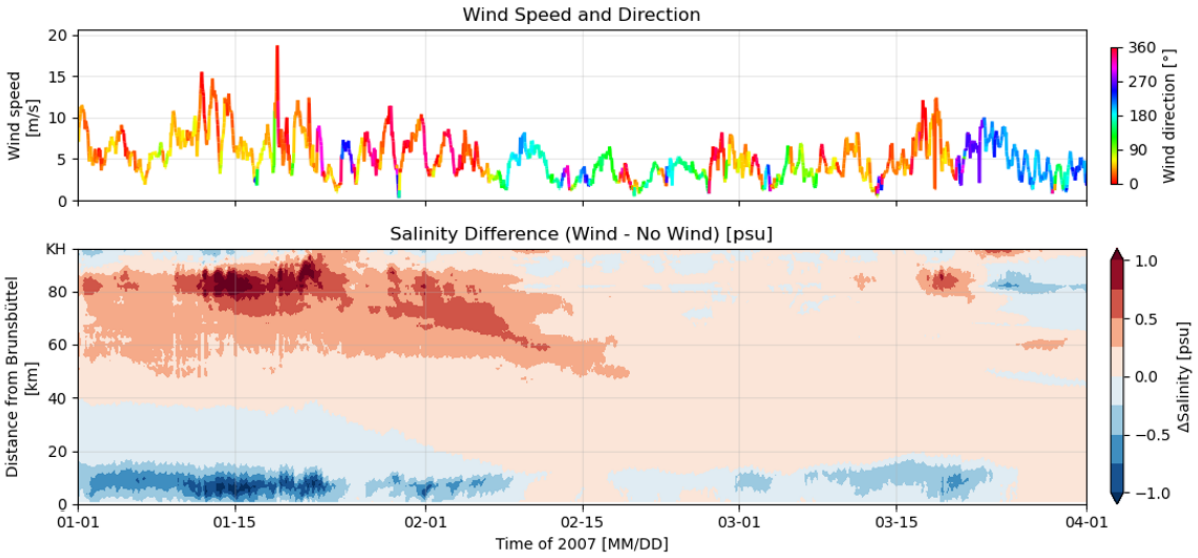


Abbildung 2-8: Zeitliche Verläufe während der Monate Januar bis März 2007 von Windgeschwindigkeit und Windrichtung (oben, 0° bedeutet Wind aus West) und die aus dem Windeinfluss resultierende Erhöhung (rot) bzw. Verringerung (blau) der mittleren Salzgehalte entlang des NOK (unten).

Die Verteilung der Entwässerung auf die Standorte Brunsbüttel und Kiel Holtenau hat ebenfalls einen erheblichen Einfluss auf die Salzverteilung im Längsschnitt. Die noch im Zeitraum 2006/2007 vorhandene Aufteilung der Entwässerung von jeweils ca. 50 % in Richtung Ost und West bewirkte eine deutlich höhere mittlere Fließgeschwindigkeit in Richtung Kiel, welche dem dortigen Eintrag von Salzwasser entgegenwirkte. In der Folge kam es jahreszeitlich sogar zur Aussüßung in weiten Bereichen. Die spätestens seit 2011 und auch heute eher zutreffende Aufteilung der Entwässerung von ca. 80 % über Brunsbüttel und nur ca. 20 % über Kiel bewirkt hingegen, dass infolge der geringeren Längsströmung in östliche Richtung der Salzkeil deutlich weiter in den Kanal eindringt als im Vergleichszeitraum 2006/2007. In Abbildung 2-9 ist exemplarisch der Vergleich der Längsschnitte der Salzverteilungen für die Monate Januar der Jahre 2007, 2012 und 2024 gezeigt. Die Verteilung im Jahr 2007 weicht deutlich von den anderen beiden Zeiträumen ab, was nach Analyse der Modellergebnisse der Aufteilung der Entwässerung zugeschrieben werden kann.

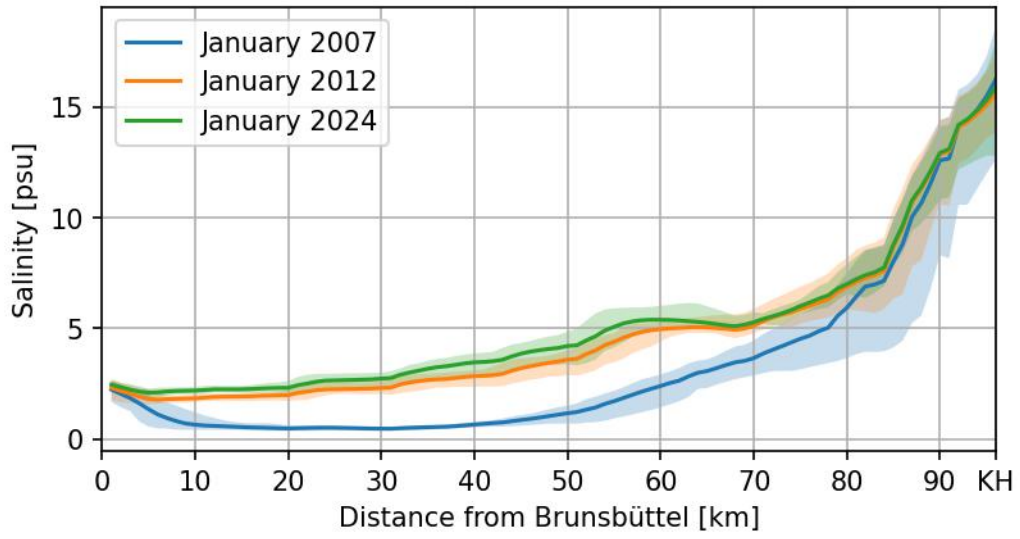


Abbildung 2-9: Salzgehalte entlang des NOK für jeweils die Monate Januar der Jahre 2007, 2012 und 2024. Dargestellte sind die zeitlichen Mittelwerte (dickere Linien) sowie die jeweiligen Bandbreiten der Salzgehalte entlang der Kanalstrecke.

2.3.5 Quantifizierung des Einflusses der Verbreiterung und Vertiefung auf die Salzverteilung

Sowohl infolge der Verbreiterung (Ausbau der Oststrecke) als auch infolge der geplanten Kanalvertiefung von 11 auf 12 m kommt es zu Änderungen der Salzverteilung im NOK. Während infolge der Verbreiterung die mittlere Salinität gemäß der Modellierung um ca. 0,5 PSU (orangene Linien in Abbildung 2-10) steigt, beträgt der mittlere Anstieg infolge von Verbreiterung und Vertiefung ca. 1 bis 2 PSU (grüne Linien), wenn alle anderen Randbedingungen gleichbleiben. In Zeiten mit stärkerer Entwässerung über Kiel, bei der die absoluten Salzgehalte im NOK geringer sind (hier am Beispiel der hydrologischen Randbedingungen vom Januar 2007 gezeigt), ist die Erhöhung der Salinität gegenüber dem Istzustand am deutlichsten ausgeprägt. Der räumliche Schwerpunkt der Erhöhungen liegt im Bereich der Ausbaustrecke, während an den Modellrändern infolge der gleichbleibenden Randbedingungen die Änderungen gegen Null gehen.

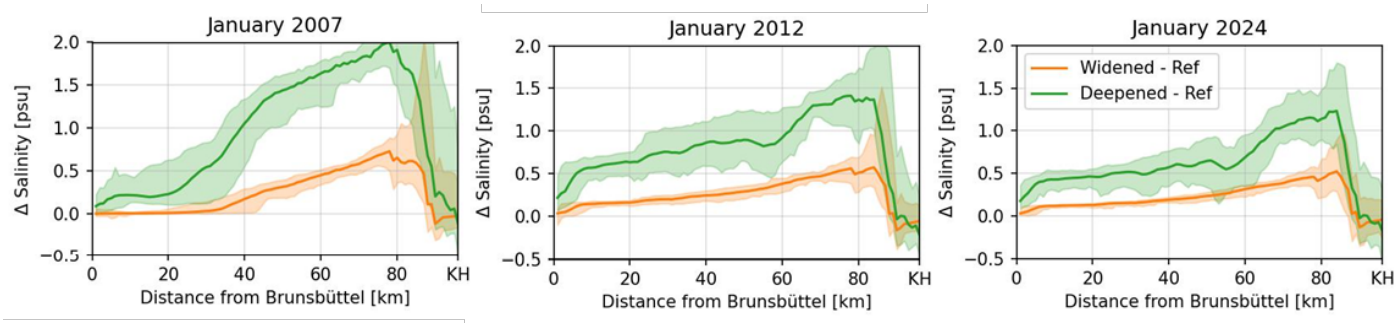


Abbildung 2-10: Änderung der Salzgehalte entlang des NOK für jeweils die Monate Januar der Jahre 2007, 2012 und 2024 entlang der Kanalstrecke infolge des Ausbaus der Oststrecke (orangene Linien) sowie summarische Wirkung von Ausbau der Oststrecke und Vertiefung (grüne Linien).

2.3.6 Quantifizierung des Einflusses des Meeresspiegelanstieges auf die Salzverteilung

Es wurden Simulationen mit hydrologischen Randbedingungen aus drei vergangenen Zeiträumen durchgeführt, in denen von Meeresspiellagen ausgegangen wird, die um 1 m über dem heutigen Niveau erhöht sind. Die Entwässerung der Modelle erfolgt dann nahezu zu 100 % über Brunsbüttel. Dabei treten Zeitabschnitte auf, in denen ein Halten der Kanalwasserstände innerhalb der Bewirtschaftungslamelle nicht mehr möglich ist (siehe Kapitel 1.4 und vgl. Abbildung 2-11). Die Salzgehalte entlang des NOK sind in allen Szenarien mit Meeresspiegelanstieg erhöht, wobei lokal bis zu ca. 5 PSU Differenz auftreten. Die stärksten Erhöhungen treten im Szenario 2007 auf, bei dem ursprünglich eine starke Entwässerung in Richtung Kiel vorherrschte, welche im Szenario mit Meeresspiegelanstieg so nicht mehr möglich ist.

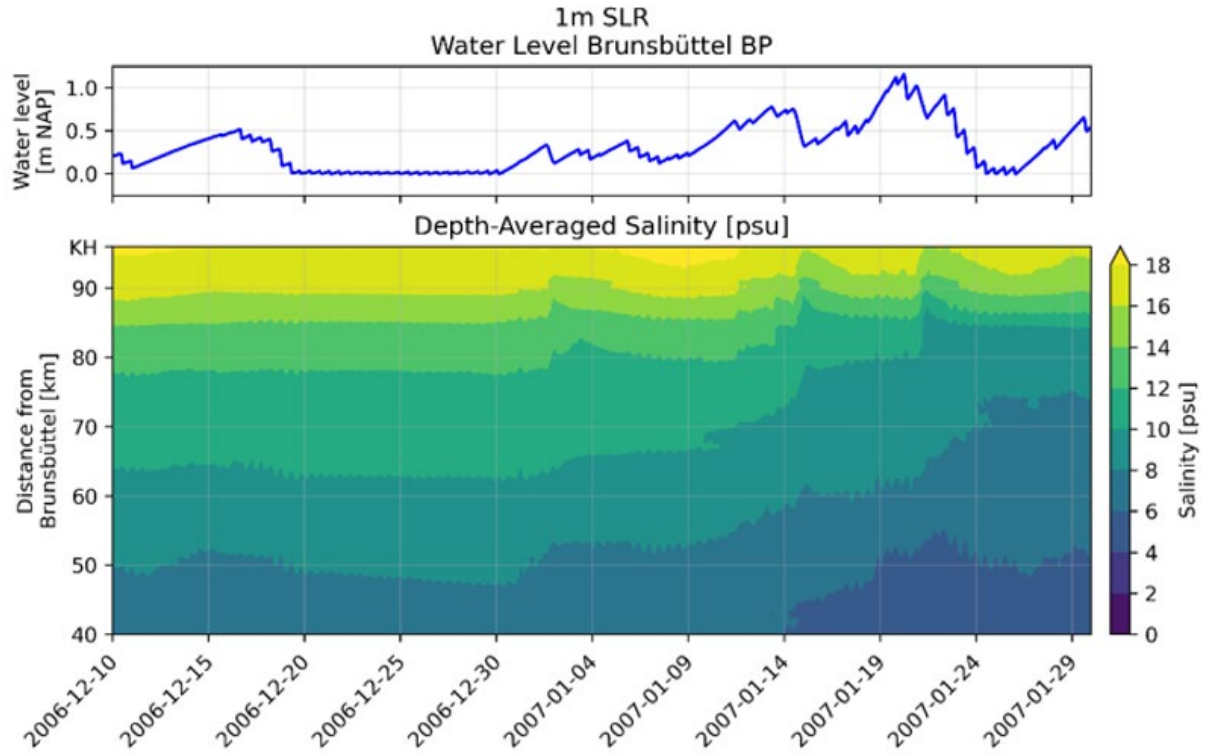


Abbildung 2-11: zeitliche Verläufe der Kanalwasserstände in einem Szenario mit 1 m höherem Meeresspiegel (oberes Diagramm) und mittlere Salzgehalte entlang des NOK (unteres Diagramm)

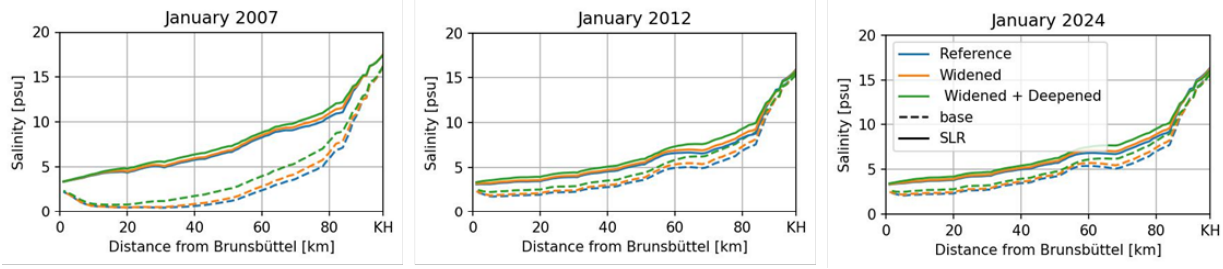


Abbildung 2-12: Längsschnitte der Salzgehalte entlang des NOK für den Istzustand (blaue Linien), den Zustand nach Verbreiterung (orangene Linien) und den Zustand nach Verbreiterung und Vertiefung (grüne Linien) jeweils für den aktuellen Meeresspiegel (gestrichelt) sowie für einen um 1 m höheren Meeresspiegel (durchgezogen).

2.3.7 **Literatur**

Gocke et al. (2008) Hydrographisch-chemische und planktologische Untersuchungen im Nord-Ostsee-Kanal, Hydrologie und Wasserwirtschaft, Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 5, 2008

2.4 Boden-Vegetation + Salz

Teilprojektverantwortlichkeit: Dr. Elmar Fuchs, Dr.-Ing. Dirk Radny

2.4.1 **Hintergrund**

Zu den möglichen Auswirkungen zukünftiger Wasserbewirtschaftung und/oder veränderter Salzgehalte im NOK auf die Ökologie werden neben der aquatischen Seite auch mögliche Wirkungen auf die (semi)terrestrische Ökologie im Umfeld des Kanals analysiert.

Salz im Grundwasser, Boden und vor allem in der Vegetation ist ein Produkt einer mittel- bis langfristig ablaufenden Wirkungskette. Das Salz kann dabei als konservativer, gut darstellbarer Tracer genutzt werden. In den küstennahen Marschenböden können beispielsweise Salzgehalte zwischen 0,2 % bis fast 3 % den Salzeinfluss indizieren. Salz im Boden wirkt sich grundsätzlich ungünstig auf die Gefügestabilität aus, verändert das Verhältnis austauschbarer Kationen in der Bodenmatrix untereinander und führt gegebenenfalls zur Tonverlagerung. Die Bedingungen für das Pflanzenwachstum verschlechtern sich, ein erhöhtes osmotisches Potenzial im Bodenwasser kann die Wasseraufnahme durch Pflanzenwurzeln beeinträchtigen. Bei einer dauerhaft erhöhten Salinität kann es zur Ansiedlung von Arten kommen, die an hohe Salzgehalte angepasst sind, die sogenannten Halophyten.
Da die Kanalsohle des NOK nicht gedichtet ist, ist ein hydraulisches Potenzial für influente Verhältnisse in Richtung Grundwasser insbesondere in denjenigen Gebieten vorhanden, bei denen der Kanal über Umgebungsgelände liegt (z. B. Marschen) und nicht als Vorfluter fungiert, sondern die Entwässerung durch die Schöpfwerke des NOK erfolgt. Erhöhte Salzgehalte im kanalnahen Grundwasser und Böden können dazu als Indikatoren herangezogen werden. Finden sich Salzzeiger in der Artenverteilung der Vegetation, ist die Indizienkette für Salz in den (semi)terrestrischen Habitaten komplettiert.

In diesem Wirkungskomplex müssen folgende Leitfragen beantwortet werden:

i. Kann man einen potenziellen Salzeffekt im Grundwasser, im Boden oder gar in Pflanzen im Kanalumfeld indikatorisch darstellen?

ii. Gib es einen Austragspfad kanalbürtiger Salzgehalte in das Umfeld außerhalb des Kanals?

iii. Wie weit reicht ein landseitiger Einfluss des NOK?

iv. Sind gefundene Effekte mit der Kanalbewirtschaftung und den Salzgehalten im Kanal in Zusammenhang zu bringen?

v. Wie wirken sich veränderte Randbedingungen (Wasserbewirtschaftung des NOK, Salzgehalt, Temperatur, Vertiefung, Klimawandel) am NOK auf Grundwasser, Boden und Vegetationshabitate aus?

Zur Beantwortung dieser Leitfragen war zunächst eine grundlegende Informationssammlung zu aktuellen Salzgehalten im oberflächennahen Grundwasser, im Boden und in der Vegetation des Kanalumfeldes erforderlich. Die Bestandsrecherche erfolgte durch den externen Auftragnehmer HYDOR Consult GmbH. Dieser wurde damit beauftragt, auf Grundlage der Informationssammlung eine Synopse der Wahrscheinlichkeit der Ausbreitung von Salz aus dem NOK in die Umwelt zu erstellen.

Nachfolgend werden wesentliche Sachverhalte aus dem Abschlussbericht „Bestandsaufnahme zur landseitigen Ausbreitung von Salz am Nord-Ostsee-Kanal über den Wirkungspfad Kanalwasser-Grundwasser - Boden – Vegetation“ (HYDOR 2024) dargestellt. Für detailliertere Ausführungen zu den jeweiligen Punkten wird auf HYDOR (2024) verwiesen.

2.4.2 **Methodik**

Wesentliche Grundlage der Bearbeitung war eine umfassende Datenrecherche zu verfügbaren Informationen bei datenvorhaltenden und -liefernden (Landes)Institutionen.

Informationen zum Grundwasser konnten neben den beim WNA NOK geführten Grundwassermessstellen (GWM) an der Oststrecke des Hügellands vor allem das Landesamt für Umwelt Schleswig-Holstein (LfU SH) und das Umweltportal SH (umweltportal.schleswig-holstein.de) liefern. Diese Daten bezogen sich auf umfangreich gemessene Grundwasserstände, hydrochemische Daten von oberflächennah verfilterten GWM und Daten der dem NOK zuströmenden Fließgewässern.

In Summe konnten Daten zu über 1.000, im Teufenbereich des NOK verfilterten GWM gesichtet werden, für die ein Selektionsalgorithmus zur Identifizierung einer potentiellen salinaren Beeinflussung durch den NOK entwickelt wurde (HYDOR 2024). Im Ergebnis dieser Selektion verblieben noch 193 GWM, nach Berücksichtigung der Grundwasserstände nur noch 40 GWM, bei denen eine hydraulische Verbindung zwischen NOK und GWM als nicht auszuschließen bewertet wurden (Abbildung 2-138). Für diese 40 Standorte wurden nachfolgend Beschaffenheitsdaten, insbesondere der Leitfähigkeit und Chlorid-Konzentration, akquiriert.

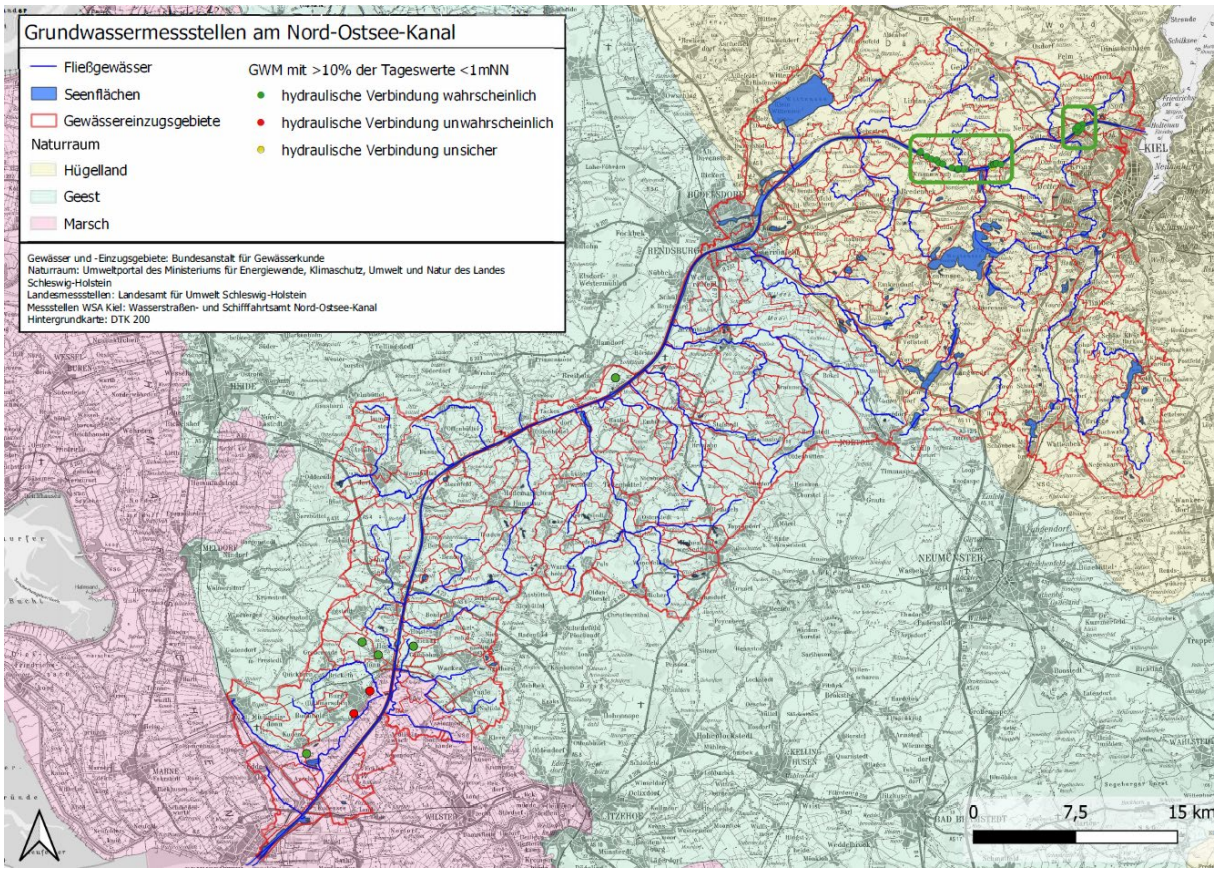


Abbildung 2-13: Selektion der Messstellen entlang des NOK (Abstand max. 3 km). Eine hydraulische Verbindung zwischen NOK und den Grundwassermessstellen wird als wahrscheinlich angenommen, wenn mehr als > 10% der Wasserstandstageswerte unter 1mNHN liegen (aus HYDOR 2024; weitere Erläuterungen s. dort).

Informationen zum Boden wurden aus dem Umweltportal Schleswig-Holstein gezogen (umweltportal.schleswig-holstein.de). Aufgrund der kleinen Maßstäblichkeit (1:250.000 und kleiner) sind flächige Bodenkarten für das direkte Kanalumfeld für die hier betrachtete Thematik schwer bis gar nicht interpretierbar.

Informationen zur Vegetation wurden im Landschaftsinformationssystem Schleswig-Holstein Lanis-SH, dem Geoportal SH (www.gdi-sh.de) und dem Umweltportal Schleswig-Holstein (umweltportal.schleswig-holstein.de) recherchiert. Kleinräumige Ausweisung von NOK-nahen Arten, die auf eine Salzeinfluss hinweisen können, sind mit den kleinen Kartiermaßstäben nicht möglich.

2.4.3 **Beispiele der Interaktion zwischen NOK und Grundwasser**

Dauerhaft effluente[10] Verhältnisse des Grundwassers in den NOK

Bei 89% der Messstellen liegen die Grundwasserstände dauerhaft und deutlich über dem Niveau des NOK, sodass geohydraulisch effluente Verhältnisse bestehen, sodass hier ein advektiver Austrag von hochsalinarem Wasser aus dem NOK in den Grundwasserleiter nicht möglich ist. Dies bestätigen auch die Werte der Leitfähigkeit und der Chlorid-Konzentration im Grundwasser. Die Leitfähigkeit liegt durchgängig unterhalb der rangstatistisch ermittelten Hintergrundwerte in der Geest von 690 µS/cm bzw. 832 µS/cm (vgl. Tabelle 2.4-1). Die Chlorid-Konzentrationen lagen einmalig im Jahr 1990 mit 80,6 mg/L leicht über der Hintergrundkonzentration von 60,6 mg/L bzw. 78,1 mg/L und sonst darunter. Das Grundwasser ist hier eindeutig nicht salinar beeinflusst.

Tabelle 2.4-1: Hintergrundwerte (Obergrenzen) im Grundwasser im Einzugsgebiet des Nord-Ostsee-Kanals (Quelle: BGR 2024)

Naturraum	Chlorid [mg/L]	Leitfähigkeit [µS/cm]
Hügelland	60,6	1020
Geest	60,6 bis 78,1	690 bis 832
Marschen	1940	10400

Dauerhaft keine Salinität im Östlichen Hügelland trotz temporär influenter[11] Verhältnisse

Die Wasserstände der GWM 43/1 an der Oststrecke des NOK deuten auf temporäre hydraulische Bedingungen hin, die einen advektiven Salzaustrag aus dem NOK ins Grundwasser ermöglichen könnten. Findet ein solcher Transport von Salz statt, ist eine Erhöhung der Leitfähigkeit im Grundwasser über den Hintergrundwert im Hügelland von 1020 µS/cm (BGR 2024) zu erwarten. Die Leitfähigkeiten zeigen konstant Werte weit unter diesem Hintergrundwert. Damit ist das Grundwasser im betrachteten Zeitraum von 2019 bis 2023 unbeeinflusst von den hohen Salzgehalten im NOK. Ein Grund dafür könnte eine Unterbrechung einer hydraulischen Verbindung zum NOK durch bindige Schichten sein, die durch die Auswertung der Bohrprofile nicht eindeutig zu belegen ist. Deutlich wird, dass die alleinige Betrachtung der hydraulischen Bedingungen keine verlässliche Vorhersage über den Transport von Salz liefern kann und keine hinreichende Bedingung darstellt.

Grundwasserabsenkung mit salinarem Einbruch im Grundwasser

Die GWM 06/1 des WNA NOK an der Oststrecke des NOK liegt 80 m nördlich des NOK. Die Filterstrecke erschließt den Tiefenbereich -2,2 m NHN bis -4,2 m NHN. Im Ausbauprofil der GWM 06/1 liegt eine 1,6 m mächtige wasserleitende Schicht in der Tiefe von -2,2 m NHN bis -3,8 m NHN und damit in der Tiefe des NOK (etwa 0 m NHN bis -11 m NHN). Der nur sehr geringmächtige Wasserleiter ist von einer etwa 10 m mächtigen bindigen Schicht aus Geschiebemergel und Schluff bedeckt. Für die GWM

[10] Effluent: Zustrom Grundwasser in den NOK
[11] Influent: Abstrom von Kanalwasser in das Grundwasser

06/1 wurde die hydraulische Verbindung als wahrscheinlich eingeschätzt, weil bei einem hydraulischen Gradienten vom NOK zum Grundwasser das Wasser des NOK durch den geringmächtigen Wasserleiter zur Messstelle fließen könnte.

Der Grundwasserstand an der GWM 06/1 liegt von 2019 bis Juni 2022 oberhalb des Wasserstands im NOK Abbildung 2-14. In der zweiten Hälfte des Jahres 2022 schwanken die Wasserstände innerhalb des Soll-Wasserstands im NOK. Die Leitfähigkeit bleibt jedoch weit unterhalb des Hintergrundwertes von 1020 µS/cm. Von Juni bis August 2023 wird das Grundwasser im Kontext mit dem Ausbau der Osttrecke des NOK auf unter -1,5 m NHN abgesenkt. Schon im März 2023 ist ein kurzzeitiger Peak in der Leitfähigkeit von etwa 2000 µS/cm zu sehen. Die Leitfähigkeit fällt im Anschluss wieder auf das Niveau wie zuvor. Anfang Juni sinken die Leitfähigkeitswerte leicht. Es folgt eine Datenlücke von Juni bis August 2023. Im September steigt die Leitfähigkeit bis auf 6000 µS/cm und fällt zum Ende des Monats auf 1500 µS/cm. Danach fällt sie langsam weiter.

Der Peak im September 2023 kann als direkte Auswirkung der Grundwasserabsenkung interpretiert werden, welche ein Einströmen von salzhaltigem Wasser aus dem NOK ins Grundwasser zur Folge hatte. Im September steigt der Grundwasserstand dann steil von etwa -1,5 m NHN auf 0 m NHN an, liegt jedoch bis Mitte September (Peak der Leitfähigkeit) unterhalb des Wasserspiegels des NOK. Der anschließende Abfall der Leitfähigkeit hängt mit der erneuten Umkehr des hydraulischen Gradienten zusammen, diesmal vom Grundwasser zum NOK: Das Grundwasser strömt von Norden aus dem Einzugsgebiet Richtung NOK und verdünnt somit das zuvor eingedrungene Salz im Grundwasserleiter.

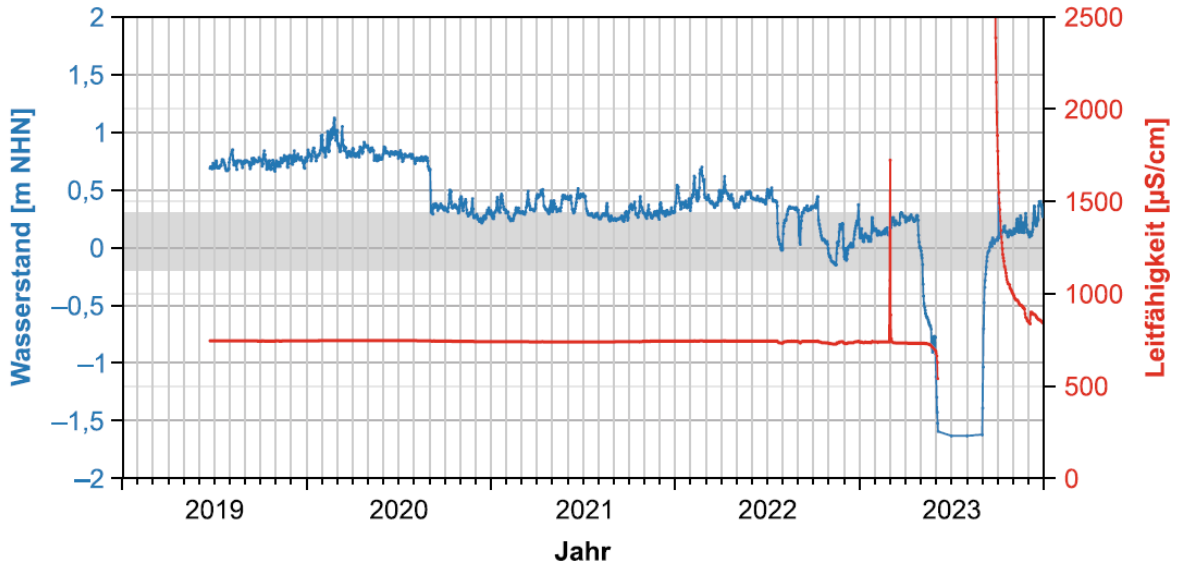


Abbildung 2-14: Grundwasserganglinie und Leitfähigkeit der GWM 06/1 an der Oststrecke des NOK im Hügelland; in grau hinterlegt: der für die Aufrechterhaltung des Schiffsverkehrs im NOK erforderliche Soll-Pegelstand; zwischen Juni bis August 2023 wird das Grundwasser im Kontext mit dem Ausbau der Oststrecke des NOK auf unter -1,5 m NHN abgesenkt und der Gradient ist vom NOK in Richtung Grundwasser gerichtet.

Influente Grundwasserverhältnisse in der Marsch

GWM in der Marsch zeigen allein schon aufgrund des tief liegenden Geländes oftmals Werte, die unterhalb der Sohle des NOK liegen. Bei gegebener hydraulischer Verbindung zwischen Kanal und der GWM können hier dauerhaft influente Verhältnisse herrschen, und ein advektiver Salzaustrag aus dem NOK in das Grundwasser kann stattfinden. Da im Datenbestand zumeist keine Informationen zur

Chlorid-Konzentration oder Leitfähigkeit vorliegen, ist letztlich die Prüfung einer potenziellen Versalzung nicht möglich. Zudem führt die große Vielfalt der hydrogeologischen Lagerungsbedingungen in der Marsch nicht zu gleichmäßig hoher Salinität im Grundwasser.

2.4.4 **Salinare Beeinflussung des Bodens durch den NOK**

In der für die Studie verwendeten Literatur sowie gemäß fachbehördlicher Hinweise gibt es keine Anzeichen einer Bildung salzhaltiger Böden im kanalnahen Bereich. Es muss darauf hingewiesen werden, dass die verwendeten Kartenmaßstäbe für diese Analyse unzureichend detailliert waren und dass lokale Einzelstudien nicht recherchiert werden konnten.

2.4.5 **Salinare Beeinflussung der uferbegleitenden Vegetation durch den NOK**

Bei einem dauerhaften advektiven Transport von Salz aus dem Wasserkörper NOK über das Grundwasser in seine Umgebung, kann es u.a. zu einer (oberflächennahen) Anreicherung von Salz im Bodenbereich, also den oberen zwei Metern der ungesättigten Zone kommen. Wäre dies der Fall, könnten sich Halophyten an diesen Standorten ansiedeln. Typische Anzeiger in Salzwiesen Schleswig-Holsteins sind u.a. *Salicornia spec*. (Queller), (Englisches Schlickgras) oder auch *Puccinellia maritima* (Andel).
Erwartungsgemäß wurden landesweit diverse Halophyten in Biotopen an der Küste auskartiert. Nach der im Umweltportal hinterlegten Datenbank des LfU SH wurden in Auswertung der vorhandenen Biotoptypenkartierungen im gesamten Einzugsgebiet des NOK jedoch keine Halophyten nach 2014 kartiert.

Auf einigen wenigen Spülfelder für Baggergutunterbringung aus der Unterhaltungsbaggerei im NOK ist temporär z.B. *Aster tripolium* (Strandaster) kartiert, was auf einen Salzeintrag durch das eingespülte NOK-Baggergut hinweist.

2.4.6 **Synopse**

Als synoptische Analyse werden die wesentlichen Ausbreitungswege von Salz aus dem NOK in die benachbarte Umgebung des Kanals in einem Wortmodell dargestellt (s. Abbildung 2-15).
In der Gesamtschau zeigt sich, dass im Hügelland (etwa NOK-km 65 bis km 98) und der Geest (etwa NOK-km 20 bis km 65) temporär, in der Marsch (NOK-km 0 bis km 20) lokal auch dauerhaft - influente Verhältnisse bestehen, also ein Stoffeintrag in das oberflächennahe Grundwasser erfolgen kann, da die hydraulischen Potentiale des Grundwassers zeitweise oder dauerhaft tiefer als diejenigen des NOK liegen. Diese Erkenntnis basiert auf der Auswahl von insg. 40 GWM im Ergebnis eines mehrstufigen Selektionsalgorithmus.

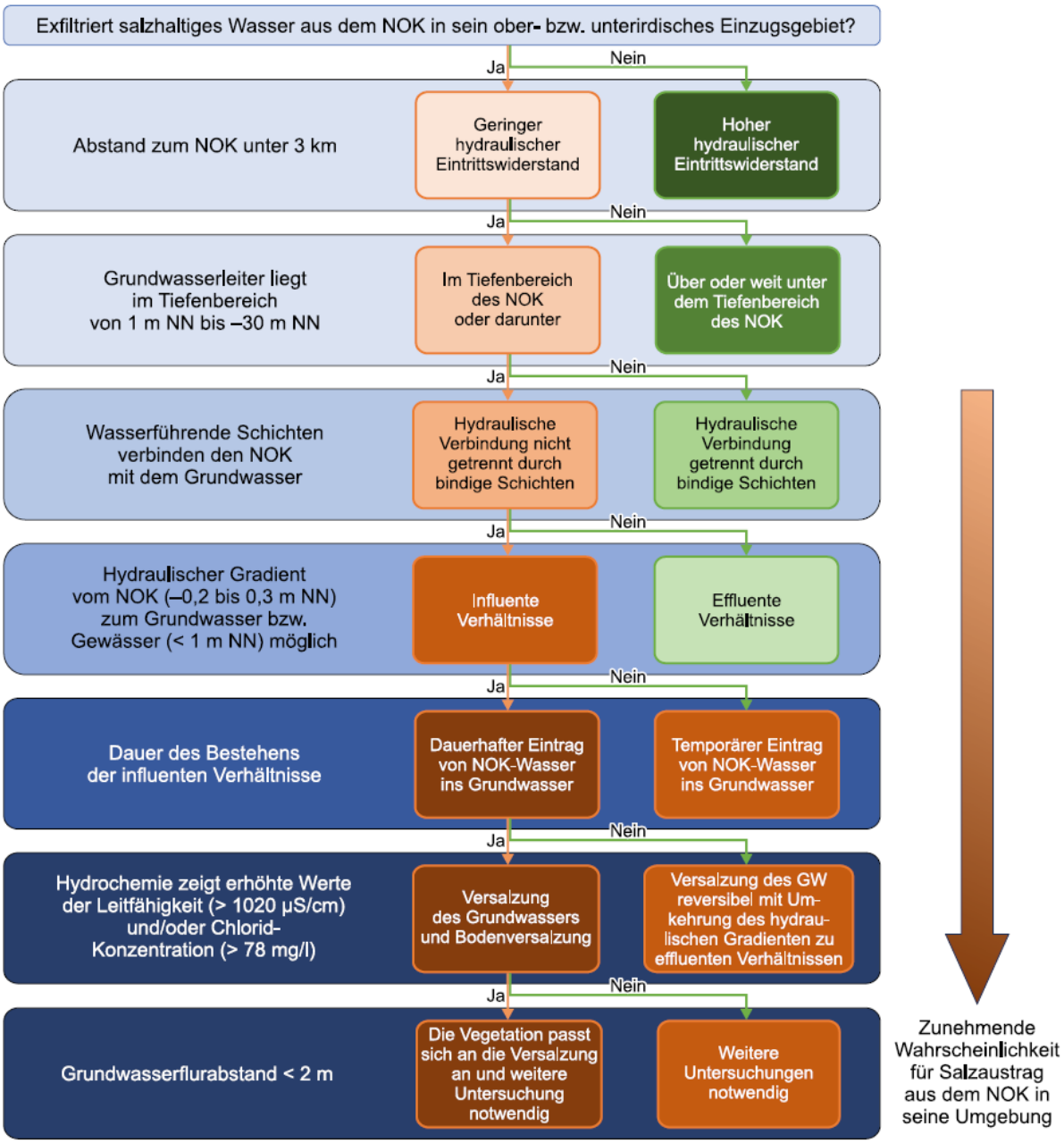


Abbildung 2-15: Synopse der Wahrscheinlichkeit der Ausbreitung von Salz aus dem NOK in die Umwelt

In Bezug zu den eingangs genannten Leitfragen kann nach Abschluss der aktuellen Projektphase festgehalten werden:

i. Kann man einen potenziellen Salzeffekt im Grundwasser, im Boden oder gar in Pflanzen im Kanalumfeld indikatorisch darstellen?

Zunächst und vornehmlich erfolgt ein Salzaustrag aus dem NOK in umgebende Kompartimente in der Wasserphase. Dieser Austrag ist an eine hydraulische Verbindung zwischen NOK und dem Grundwasser bzw. Oberflächenwasser geknüpft. Zudem braucht es für einen Salzaustrag einen vom NOK in Richtung der umgebenden Kompartimente gerichteten hydraulischen Gradienten.
Als Indikator können die Messung des NOK-Pegels, der NOK-nahen Grundwasserstände sowie die Chlorid- und Leitfähigkeitsmesswerte im NOK sowie der betroffenen GWM dienen.

ii. Gib es einen Austragspfad kanalbürtiger Salzgehalte in das Umfeld außerhalb des Kanals?

Die Bestandsaufnahme in Bezug zur Interaktion zwischen NOK und Grundwasser ergab, dass unter den aktuellen Randbedingungen bei 40 kanalnahen (< 3 km Entfernung) Messstellen im Einzugsgebiet im Hügelland und der Geest temporär und in der Marsch lokal auch dauerhaft influente Verhältnisse bestehen können, also ein Stoffeintrag in das Grundwasser erfolgen kann. Die hydraulischen Potentiale des Grundwassers liegen hier zeitweise oder dauerhaft tiefer als diejenigen des NOK.
Im Hügelland wurde bei zwei Messstellen ein salinarer Stoffeintrag identifiziert, der jedoch durch den baulichen Ausbau der Oststrecke verursacht ist.

In der Marsch zeigen Landesmessstellen des LfU SH auch rein geogen bedingte erhöhte Salzkonzentrationen im Grundwasser.

iii. Wie weit reicht ein landseitiger Einfluss des NOK?

Dies hängt maßgeblich von der hydraulischen Durchlässigkeit (i.e. dem geologischen Aufbau) des geologischen Untergrundes ab, den der NOK quert, sowie vom hydraulischen Gradienten zwischen NOK und umgebenden Grundwasser. Im Zuge der Bestandsaufnahme wurden GWM bis 3 km Entfernung zum NOK berücksichtigt. Es zeigen sich lokal Einflüsse des NOK.

iv. Sind gefundene Effekte mit der Kanalbewirtschaftung und den Salzgehalten im Kanal in Zusammenhang zu bringen?

Die im Zuge der Bestandsaufnahme identifizierten landseitigen, allerdings nur lokal und kleinräumig begrenzten Einflüsse im Grundwasser lassen sich auf Salzgehalte im Kanal zurückführen und gelten für den Zustand der derzeitigen Bewirtschaftungsweise. Bei Einhaltung der jetzigen Bezugswasserstände im NOK wird hier der beobachtete Effekt beibehalten. Jede Änderung der Kanalbewirtschaftung, die Wasserstände, Wasserzu- und -abfuhr ändert und mögliche nachfolgende Änderungen der Salzfahnen nach sich zieht, wird sich mittel bis langfristig als beobachtbare Wirkung quantitativ und qualitativ auswirken.

v. Wie wirken sich veränderte Randbedingungen (Kanalbewirtschaftung, Salzgehalt, Temperatur, Vertiefung, Klimawandel) am NOK auf Grundwasser, Boden und Vegetationshabitate aus?

Änderungen in den Randbedingungen haben dann einen Effekt, wenn sie eine Änderung des hydraulischen Gradienten zwischen NOK und dem umgebenden Grundwasser nach sich ziehen. Die notwendige hydraulische Anbindung bleibt anzunehmender Weise gleich

Der Gradient ist in seiner Höhe durch Änderungen des Wasserspiegels im NOK und andererseits durch die mittel- bis langfristigen landseitigen Grundwasserstände geprägt. Sinken die Grundwasserstände z.B. durch verlängerte trockene Phasen aufgrund des Klimawandels, erhöht sich der Gradient zwischen Grundwasser und NOK, und ein Risiko zum Austrag aus dem NOK in das landseitige Grundwasser wird höher. In der Wasserphase werden dann Salzgehalte, die ggfs. durch eine notwendig werdende alternative Bewirtschaftungsform verändert werden, mit in das landseitige Grundwasser getragen, mit nachfolgenden Effekten auf kanalnahe Böden und die darauf wachsende Vegetation. Eine Quantifizierung der Effekte ist auf Grundlage der von HYDOR (2024) verwendeten Datengrundlage bisher jedoch nicht möglich.

2.4.7 **Empfehlung**

Insbesondere im mittleren (Geest) und westlichen (Marsch) Streckenverlauf des NOK wäre zur Erhöhung der Aussagekraft in Bezug zur räumlichen und zeitlichen Verteilung eines (temporären) Salztransports vom NOK in Richtung Grundwasser die Errichtung weiterer kanalbegleitender, oberflächennah im Teufenbereich des Wasserkörpers des NOK verfilterter, temporärer Grundwassermessstellen von Vorteil. Die Messstellendichte muss keineswegs die gleiche wie auf der Oststrecke sein, die Abstände der Messstellen untereinander können im Kilometerbereich, die Distanzen zum NOK sollten jedoch deutlich darunter liegen. Ideal wäre zudem die Anlage von Transsekten tangential zur Achse des NOK bis in drei Kilometer Entfernung.

Auch zur weiteren Analyse möglicher Wirkungen auf Boden und Vegetation sind weitere Recherchen und auf regionaler oder lokaler Ebene empfehlenswert und ggfs. durch in situ Kartierungen und/oder Messungen zu validieren.

2.4.8 **Literatur**

BGR (2024): Hintergrundwerte im Grundwasser von Deutschland, © Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.

HYDOR (2024): Bestandsaufnahme zur landseitigen Ausbreitung von Salz am Nord-Ostsee-Kanal über den Wirkungspfad Kanalwasser- Grundwasser - Boden – Vegetation. HYDOR Consult GmbH, Berlin, 167 S.

Hinweis: Die in HYDOR (2024) dokumentierten Arbeiten flossen in Auszügen in eine Fachpublikation ein: Hannappel, S. & Radny, D.: Potentieller Salzwassereintrag aus dem Nord-Ostsee-Kanal in das oberflächennahe Grundwasser in Schleswig-Holstein. Manuskript nach einem peer review für eine Veröffentlichung in der Fachzeitschrift Grundwasser (Verlag Springer Nature) akzeptiert.

2.5 Makrozoobenthos + Salz

Teilprojektverantwortlichkeit: PD Dr. habil. Markus Wetzel / Dr. Susanne Worischka

2.5.1 **Hintergrund und Methodik**

Die aquatische Wirbellosenfauna am Gewässergrund des NOK (Makrozoobenthos, MZB) ist dem Einfluss mehrerer starker Stressoren ausgesetzt. Als künstlicher, durch zwei Schleusen begrenzter Wasserkörper und extrem stark befahrene Schifffahrtsstraße ist der Kanal im Vergleich zu anderen Fließgewässern ein sehr strukturarmes Habitat mit geringer Strömungsdiversität und häufigen Störungen durch Schiffswellen und Trübung (Gocke et al. 2008). Darüber hinaus liegen speziell im NOK besondere chemische Umweltbedingungen in Bezug auf dem Salzgehalt vor. Jedoch sind diese für die benthische Fauna weniger problematisch als die hydromorphologischen bzw. physikalischen Stressoren. Der Grund dafür ist, dass der NOK dauerhaft nur von Arten besiedelt werden kann, die ein breiteres Salzgehalts-Spektrum tolerieren. Brackwasserhabitate sind generell viel artenärmer als Meerwasser- und Süßwasserhabitate (Remane, 1934), da ihre „mittleren“ Salzgehalte an sich physiologisch ungünstig für Organismen sind und zusätzlich in der Regel stark schwanken; letzteres gilt insbesondere für Übergangsgewässer mit Gezeiteneinfluss. Beides verlangt den dort lebenden Tieren einen hohen Energieaufwand für die Anpassung ab. Solche Arten müssen daher entweder sehr mobil oder besonders tolerant gegenüber variablen Salzgehalten, also euryhalin, sein (Cognetti et al. 2000). Diese Eigenschaften treffen auch auf viele aquatische invasive Neozoen (gebietsfremde Tierarten) zu, die in

ihren Herkunftsgebieten, wie z. B. der Pontokaspis, ähnlich variablen Umweltbedingungen unterworfen sind. Oft sind diese invasiven Arten zugleich auch relativ robust gegenüber anthropogenen Belastungen wie z. B. den oben genannten hydromorphologischen Stressoren. Daraus ergibt sich, dass der NOK aufgrund seiner Nutzung, geografischen Lage und chemischen Charakteristika ein Korridor und ein geeignetes Habitat für invasive Neozoen ist. Das Elbe-Ästuar unterliegt einer besonders intensiven biologischen Invasion (Nehring, 2006) und ist damit die Hauptquelle für Neozoen im NOK.
Der im NOK vorliegende Salinitätsgradient von minimal 2–6 PSU (oligohaline Bedingungen, Westteil bis ca. Mitte) bis maximal 9–15 PSU (mesohaline Bedingungen, Schleuse Ostteil Kiel-Holtenau) bewirkt dennoch eine teilweise unterschiedliche Besiedlung, da die Arten trotz ihrer hohen Toleranz verschiedene Präferenzen in Bezug auf den Salzgehalt haben.

Für den vorliegenden Bericht wurde eine Recherche durchgeführt, um auf Basis von MZB-Daten aus bisherigen Probenahmen, Bewertungen im Vorfeld von Baumaßnahmen und Literatur zu MZB und Brackwasser eine Prognose der potenziellen Veränderungen im MZB des NOK zu ermöglichen.



Abbildung 2-16: MZB-Arten, die geringere Salzgehalte bevorzugen: links: Zebramuschel (Dreissena polymorpha), ein invasives Neozoon aus der Pontokaspis. Rechts: Kolonie des heimisches Moostierchens Plumatella repens mit einer Donauassel (Jaera sarsi, ebenfalls aus der Pontokaspis) in der Bildmitte. Fotos: Dr. Susanne Worischka



Abbildung 2-17: Links: Große Pfeffermuschel (Scrobicularia plana), eine heimische Muschelart der Ostsee, die im Ostteil nahe der Schleuse Kiel-Holtenau vorkommt. Rechts: der Keulenpolyp (Cordylophora caspia) Foto: Ian Reach, Copyright: Joint Nature Conservation Committee (JNCC).

2.5.2 **Istzustand**

Für den NOK als Gewässer des Sondertyps 77 (also: Schifffahrtskanäle mit Bezug zur EG-Wasserrahmenrichtlinie) liegt hinsichtlich des MZB keine Datenbasis aus standardisierten faunistischen Erfassungen vor, sondern aus einmaligen, lokal begrenzten Probenahmen in größeren Zeitabständen. Dennoch lassen sich aus diesen Erfassungen sowohl räumliche als auch zeitliche Muster ableiten.

Im Längsverlauf ändert sich die relative Artenzusammensetzung des MZB: von Brunsbüttel bis etwa Kkm 40 dominieren Brackwasserarten mit einer Präferenz für geringe Salzgehalte oder brackwassertolerante Süßwasserarten. Der Anteil von Neozoen an der Gesamtartenzahl ist in diesem Bereich mit ca. 50 % sehr hoch (Lieberum & Bock, 2018), relativ häufig sind z.B. die Schlickkrebs-Art *Chelicorophium curvispinum* oder die Neuseeländische Zwergdeckelschnecke (*Potamopyrgus antipodarum*). Die heimische Fauna wird hier v.a. durch sedimentbewohnende Borstenwürmer (Oligochaeta, Polychaeta) und Zuckmückenlarven (Chironomidae) vertreten, aber auch das auf Hartsubstraten siedelnde Moostierchen *Plumatella* spp. oder die Schlickkrebsart *Corophium lacustre*. Nach Westen zu steigt ab ca. Kkm 50 der relative Anteil von Arten mit Präferenz für etwas höhere Salzgehalte allmählich an, bis die Gemeinschaft der der Ostsee in der Kieler Bucht sehr ähnlich wird. Hier dominieren z.B. die Muschelarten *Mytilus edulis* und *Cerastoderma edule.* Gleichzeitig nimmt der relative Anteil der gebietsfremden Arten bis auf ca. 10 % ab (Lieberum & Bock, 2018). Trotz dieser relativen Unterschiede sind etliche Arten über die ganze Länge des Kanals zu finden, z. B. die Seepocke *Amphibalanus improvisus* oder der gebietsfremde Borstenwurm *Marenzelleria viridis*. Die Artenzahl nimmt von Ost nach West relativ gleichmäßig ab.
In den vergangenen Jahrzehnten hat sich die Artenzusammensetzung des MZB dahingehend geändert, dass insbesondere der Anteil an Neozoen kontinuierlich gestiegen ist, sowohl in Bezug auf die Artenzahl als auch auf die Individuendichte.
Eine Besonderheit stellt das Vorkommen der heimischen Großen Pfeffermuschel *Scrobicularia plana* an der Schleuse Kiel-Holtenau dar (WSV, 2019). Diese eigentlich euryöke Art zeigt einen Bestandsrückgang in der südlichen Ostsee (Zettler, 2000). Sie ist in der „Roten Liste der bodenlebenden wirbellosen Meerestiere“ (RACHOR et al. (2013) mit dem Gefährdungsgrad „1“ (vom Aussterben bedroht) eingestuft. In der Ostsee ist die Art nach HELCOM (2013a) als „vulnerable“ gelistet. Sie toleriert ein breitetes Salzgehaltsspektrum, bevorzugt jedoch Salzgehalte oberhalb der im NOK herrschenden (Jaeckel, 1952).

2.5.3 **Zukünftige Entwicklung**

Betrachtet man die prognostizierte Entwicklung der Salzgehalte im NOK (siehe Kap. 2.3), lassen sich keine Hinweise auf Veränderungen in der MZB-Besiedlung, wie der gänzliche Wegfall von Arten oder deutliche Verschiebungen in den grundsätzlichen Dominanzmustern ableiten. Die kurzfristigen Schwankungen im Jahres- und Tagesverlauf sind mit ca. 6 PSU in der gleichen Größenordnung oder sogar insgesamt höher als der unter Klimawandel-Bedingungen projizierte langfristige Anstieg bis zu 2 PSU und müssen bereits jetzt von den Organismen toleriert werden. Leichte räumliche Verschiebungen in der relativen Dominanz sind aufgrund der unterschiedlichen Präferenzen der Arten durchaus möglich, ein grundlegender Umbau des Artenspektrums wäre erst bei deutlich größeren Änderungen des Salzgehalts zu erwarten. Neben dem Salzgehalt sind auch andere Umwelteinflüsse auf das MZB zu berücksichtigen. Hier sind insbesondere Temperatur, Turbulenz, Trübung und Nährstoffbelastung zu nennen, von denen die Turbulenz durch den intensiven Schiffsverkehr vermutlich den stärksten Stressor darstellt und das Vorkommen empfindlicher Arten einschränkt. Aber auch eine Kombination aus langfristig steigenden Wassertemperaturen und Nährstoffbelastung könnte perspektivisch zu stärkeren Schwankungen im Sauerstoffgehalt führen (siehe Kap 2.2.3). Derzeit sind die mittleren Werte

von 8 – 9,5 mg/ L im guten bis moderaten Bereich, was auch auf die turbulente Durchmischung infolge des Schiffsverkehrs zurückzuführen ist. Neben den abiotischen Umweltfaktoren müssen auch biotische Effekte berücksichtigt werden. Aufgrund der beobachteten Entwicklung in den angrenzenden Gewässern ist mit der Einwanderung weiterer Neozoen in den NOK zu rechnen. Dieser Prozess ist schwer vorhersagbar und kann unterschiedlich starke Auswirkungen auf die vorhandene Gemeinschaft haben (Gallardo, 2016). Nicht auszuschließen, aber wahrscheinlich von geringer Bedeutung, sind indirekte Effekte der Salzgehaltsänderungen, z. B. infolge von stärkerem/schwächerem oder selektiven Fraßdruck durch eine veränderte Zusammensetzung der Fischfauna (siehe Kap. 2.6).

2.5.4 **Literatur**

BfG 2005. Bericht 1423. Umweltrisikoeinschätzung und FFH-Verträglichkeitseinschätzung für Projekte an Bundeswasserstraßen. Anpassung der Oststrecke des Nord-Ostsee-Kanals zwischen Kkm 80,0 - Kkm 93,5.

Clarke, K.R. and Warwick, R.M. (1994) Changes in Marine Communities: An Approach to Statistical Analyses and Interpretation. Natural Environment Research Council, Plymouth.

Gallardo, B., Clavero, M., Sanchez, M. I., & Vila, M. (2016). Global ecological impacts of invasive species in aquatic ecosystems. Global Change Biology, 22(1), 151-163. https://doi.org/10.1111/gcb.13004

Gocke, K., Lenz, J., Koppe, R., Rheinheimer, G., & Hoppe, H. G. (2008). Hydrographisch-chemische und planktologische Untersuchungen im Nord-Ostsee-Kanal. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 52, 245-257.

Jaeckel, S., 1952: Zur Ökologie der Molluskenfauna in der westlichen Ostsee. - Schr. Naturwiss. Ver. Schleswig-Holstein 26: 18-50.

HELCOM, 2013a: HELCOM Red List of Baltic Sea species in danger of becoming extinct. – Baltic Sea Environment Proceedings No. 140, 106 S.

Lieberum, C., & Bock, G. (2018). Neobiota im Nordostsee-Kanal: eine Bestandsaufnahme 2016. Vortrag auf dem LLUR Minisymposium 06.03.2018

UBA (2025) https://www.gewaesser-bewertung.de/index.php?article_id=422&clang=1, zuletzt abgerufen am 26.10.2025

Nehring, S. (2006). Four arguments why so many alien species settle into estuaries, with special reference to the German river Elbe. Helgoland Marine Research, 60(2), 127-134. https://doi.org/10.1007/s10152-006-0031-x

Rachor, E.; Bönsch, R.; Boos, K.; Gosselck, F.; Grotjahn, M.; Günther, C.-P.; Gusky, M.; Gutow, L.; Heiber, W.; Jantschik, P.; Krieg, H.-J.; Krone, R.; Nehmer, P.; Reichert, K.; Reiss, H.; Schröder, A.; Witt, J. & Zettler, M.L. (2013): Rote Liste und Artenlisten der bodenlebenden wirbellosen Meerestiere - 4. Fassung, Stand Dezember 2007, einzelne Aktualisierungen bis 2012. - Naturschutz und Biologische Vielfalt 70 (2): 81-176.

Remane, A. (1934) Die Brackwasserfauna. Verhalten Deutsch Zoologisch Gesellshaft 36, 34–180

WSV (2019) Planfeststellungsverfahren für den Ersatz der beiden Kleinen Schleusenkammern und Anpassung der Vorhäfen in Kiel-Holtenau, 4.2 Fachbeitrag Flora-Fauna

Zettler, M. L., R. Bönsch & F. Gosselck, 2000: Verbreitung des Makrozoobenthos in der Mecklenburger Bucht (südliche Ostsee) - rezent und im historischen Vergleich. - Meereswissenschaftliche Berichte 42: 144.

2.6 Fische + Salz

Teilprojektverantwortlichkeit: Christian von Landwüst

2.6.1 **Einleitung und Methoden**

Seit seiner Eröffnung im 19. Jahrhundert stand der NOK in zunächst überwiegend berufsfischereilichem, später dann überwiegend angelfischereilichem Interesse. Aus diesem Grund wurden seit Bestehen des Kanals zahlreiche fischereiwissenschaftliche Untersuchungen durchgeführt, die u. a. auch den Einfluss des Salzgehaltes auf Vorkommen, Verbreitung und Wanderbewegungen der im NOK vorkommenden Fischarten zum Ziel hatten (z. B. Fiedler & Kils 1990, Czerny 1996, Kafemann 2004).

Für die Beschreibung des derzeitigen und zukünftigen Vorkommens von Fischen des NOK in Abhängigkeit vom Salzgehalt hat die Arbeit von Kafemann (2004) besondere Bedeutung, weil sie einen sehr langen Untersuchungszeitraum mit intensiven Fischbestandserhebungen im gesamten Längsverlauf des NOK, d. h. bei unterschiedlichen Salzgehalten, umfasst. Die Daten von Kafemann (2004) wurden für diesen Bericht analysiert und mit einer Literaturauswertung kombiniert, um Salzgehaltsspannen zu ermitteln, bei denen Fischarten des NOK angetroffen werden können. Dazu wurden Daten von Frühjahrsbefischungen (April/Mai) und Herbstbefischungen (September/Oktober) der sieben Jahre von 1995 bis 2001 verwendet, die an den 12 Weichen/Begegnungsstellen des NOK mittels eines Schleppnetzes durchgeführt worden waren (Öffnungsbreite Netz: 5,1 x 1,9 m; Maschenweite im Steert: 4 mm, d. h. fängig ab Fischlängen von ca. 2 cm; je Fangstelle und Termin zwei Probenahmen/Netzzüge von im Mittel 920 m Länge, entsprechend 0,47 ha befischter Fläche pro Netzzug). Jedem Doppelhol wurden Salzgehaltsmesswerte aus Oberflächen- und Sohlnähe zugeordnet, die aus Abbildungen in Kafemann (2004) auf ca. ± 0,1 ‰ bzw. PSU genau abgelesen wurden (Rohdaten der Salzgehaltsmesswerte dazu waren nicht mehr verfügbar). Es wurden die Mittelwerte des jeweiligen Oberflächen- und Tiefenmesswertes verwendet, da die Schleppnetzbefischungen sowohl sohlnahe (überwiegend) als auch oberflächennahe Wasserschichten abgedeckt hatten. In den Jahren 1995 bis 2001 waren die Unterschiede der Salzgehalte zwischen Oberfläche und Sohle allerdings meist nur gering ausgeprägt, wobei die größten Unterschiede mit bis zu 1,9 PSU höheren Werten in Sohlnähe an den östlichsten Probestrecken gemessen wurden. Dort bzw. bei hohen angegebenen mittleren Salzgehalten ist es daher möglich, dass aus der Ostsee einwandernde Meeresfische nur sohlnah bei etwas höheren Salzgehalten als in Anhang 1 angegeben vorkamen und umgekehrt Süßwasserfische nur oberflächennah bei etwas geringeren Salzgehalten als angegeben.

Die Reproduktion bzw. die erfolgreiche Befruchtung und Entwicklung von Eiern sowie das Vorkommen frisch geschlüpfter Larven von Fischen ist oft an einen engeren Salzgehaltsbereich gebunden als das Vorkommen von Jungfischen und Adulten. Dazu liegen aus dem NOK selbst nur vereinzelt Hinweise vor. Deshalb wurden im Rahmen einer Literaturrecherche entsprechende Angaben aus Untersuchungen anderer Gewässersysteme und aus experimentellen Untersuchungen genutzt.

2.6.2 **Ist-Zustands-Beschreibung**

Nach aktuellen Zusammenstellungen der Hegegemeinschaft Gewässersystem Nord-Ostsee-Kanal sind bisher 95 Fischarten im NOK nachgewiesen worden (Tabelle A9 im aktuellen fischereilichen Hegeplan für den Nord-Ostsee-Kanal gemäß § 21 LFischG Schleswig-Holstein 2022). Ursache für den

hohen Artenreichtum sind die innerhalb des Kanals von West nach Ost zunehmenden Salzgehalte (siehe Abbildung 2-9), welche das Vorkommen von Süßwasser-, Brackwasser- und Meeresfischarten (siehe Tabelle 2.6-1) ermöglichen sowie die Verbindung zu Küstengewässern der Nord- und Ostsee sowie Zuflüssen und Seen im NOK-Einzugsgebiet, aus denen die unterschiedlichsten Fischarten zeitweilig oder permanent in den Kanal vordringen können.

Aufgrund der monotonen Gewässerstruktur und der Beeinträchtigungen durch den starken Schiffsverkehr bilden jedoch nur wenige Arten größere, regelmäßig nachweisbare Bestände im Kanal aus. Von Kafemann (2004) wurden insgesamt 30 Arten erfasst, von denen 14 in mittleren Dichten (Fangmengen in n/ha (= Individuen/ha)) von mehr als 1 Individuum je Hektar nachgewiesen wurden (Abbildung 2-18). Seit etwa 2009 ist zudem die erstmals 2006 im NOK nachgewiesene Schwarzmundgrundel, eine gebietsfremde invasive Art, in allen Bereichen des Kanals in hohen Dichten präsent und möglicherweise jetzt die häufigste Fischart (Rohdaten von Fischbestandsaufnahmen 2021 von Neukamm, Landesanglerverband Schleswig-Holstein e. V. (LAV SH)). In den Bestandsaufnahmen von Kafemann (2004) waren noch heimische Grundelarten (Sand- und Strandgrundel) sowie der Hering die häufigsten Arten (Abbildung 2-18). Von fischereilicher Bedeutung sind insbesondere Hering, Zander, Brassen, Flussbarsch, Flunder, Rotauge und Aal.

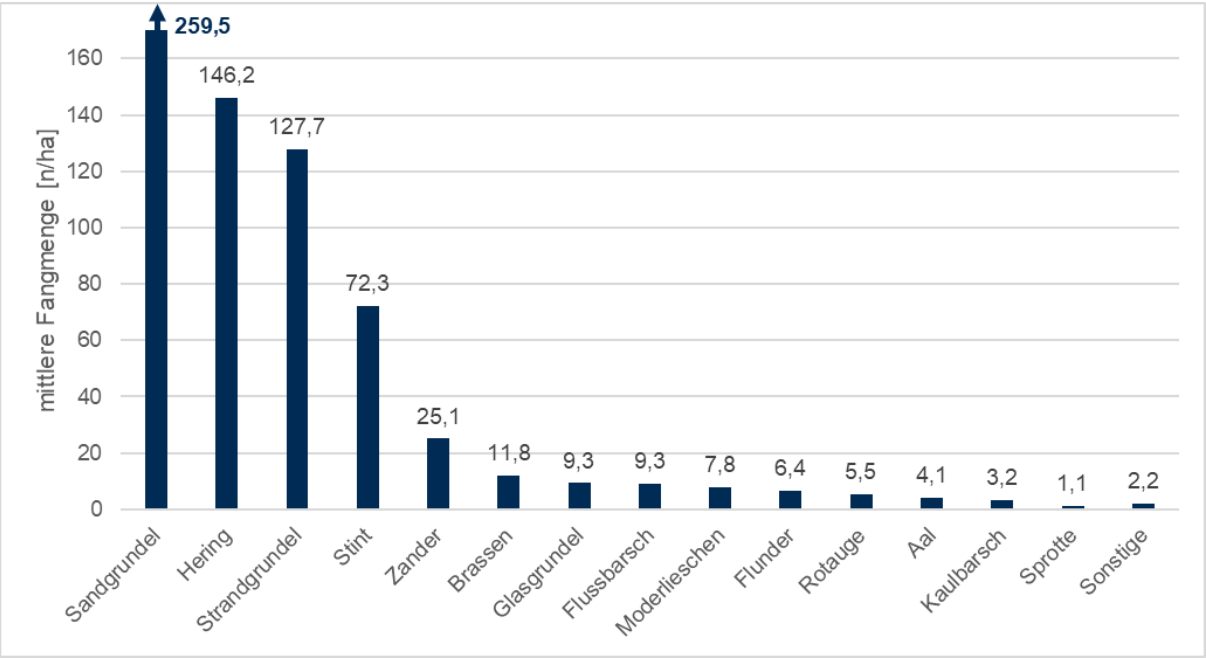


Abbildung 2-18: Mittlere Fangmengen der von Kafemann (2004) im Frühjahr und Herbst 1995-2001 an den 12 Weichen/Begegnungsstellen des NOK gefangenen Fischarten (Sonstige Arten mit mittleren Fangmengen von jeweils < 1 n/ha: Dreistachliger Stichling, Dorsch, Wittling, Seezunge, Karpfen, Zwergstichling, Güster, Kleine Seenadel, Schwarzgrundel, Finte, Aalmutter, Flussneunauge, Gründling, Aland, Große Maräne, Steinbeißer).

Um bei unterschiedlichen Salzgehalten leben zu können, verfügen Fische über komplexe osmoregulatorische Fähigkeiten (z. B. Bone & Marshall 1985). Über ihre Körperoberflächen stehen sie insbesondere im Bereich der Kiemen im ständigen Austausch mit dem umgebenden Wasser, welches entweder niedrigere (Süßwasser) oder höhere (Meerwasser) Salzgehalte als der Fisch bzw. sein Blutplasma und Gewebswasser aufweist. Isoosmolarität, d. h. übereinstimmende Salzgehalte zwischen Fisch und Wasser ist i. d. R. im mesohalinen Bereich (n. Caspers 1959 entspricht das Salzgehalten von 5 bis <

18 PSU) erreicht, wobei Süßwasserfische meist eine geringere Osmolarität aufweisen als Meeresfische.

Im Süßwasser sowie im Brackwasser geringerer Osmolarität als derjenigen im Fisch führt der Gradient der Salzkonzentration zu einem permanenten Wassereinstrom und Ionenaustritt aus dem Fischkörper. Dem begegnet der Fisch mit dem Ausscheiden großer Mengen verdünnten Harns und einem sehr effizienten Salzaufnahmesystem der Kiemen. Im Meerwasser sowie im Brackwasser höherer Osmolarität als derjenigen im Fisch stehen die Fische hingegen vor dem Problem eines permanenten Wasserausstroms und Ioneneintritts, so dass die Fische große Mengen Meerwasser trinken und gleichzeitig Ionen über spezialisierte Prozesse in den Kiemen ausscheiden (Bone & Marshall 1985). Die meisten Fische sind bei diesen Vorgängen entweder auf Süßwasserverhältnisse oder marine Verhältnisse spezialisiert und können nicht zwischen einer Osmoregulation in hypo- und hyperosmolarer Umgebung umschalten. Daher sind die Ausbreitungsmöglichkeiten von Süß- und Seewasserfischen in das Brackwasser hinein begrenzt und erfordern zudem einen erhöhten energetischen Aufwand. Nur relativ wenige Arten können als speziell angepasste Brackwasserorganismen relativ problemlos zwischen hypo- und hyperosmolaren Gewässerbereichen wechseln. Dies sind charakteristische Brackwasserarten wie die im NOK vorkommenden Grundelarten sowie diadrome, d. h. zur Vermehrung vom Meer ins Süßwasser - oder umgekehrt - wechselnde Arten wie Stint und Aal.

Entsprechend ihres Auftretens bei unterschiedlichen Salzgehalten - ggf. saisonal und für verschiedene Altersstadien unterschiedlich - können die im NOK auftretenden Fische unterschiedlichen Gilden, d. h. Artengruppen mit diesbezüglich ähnlichen Anforderungen zugeordnet werden (BioConsult 2006 in Anlehnung an Elliott & Dewailly 1995). Die Zuordnung der von Kafemann (2004) gefangenen Arten zu diesen Gilden sowie deren Vorkommen in den von Caspers (1959) definierten Salinitätszonen, mit ihren jeweils charakteristischen Artengemeinschaften, kann Tabelle 2.6-1 entnommen werden. Die zugrundeliegenden Detailinformationen und Quellenangaben finden sich in Anhang 1.

*Tabelle 2.6-1: Vorkommensschwerpunkte der im NOK von Kafemann (2004) erfassten Arten (plus neu eingewanderter Schwarzmundgrundel) in verschiedenen **Salzgehaltszonen n**. Untersuchungsergebnissen aus dem NOK (gem. Kafemann 2004) und Literaturrecherche (Anhang 1) (X = Adulte und Juvenile; R = Reproduktion (Eier, Larven) - sofern Informationen zur bevorzugten Spannbreite an Salzgehalten vorlagen; (X)(R) = nur für Brackwasserherkünfte belegt; Gilde, d. h. Artengruppe mit ähnlichen Ansprüchen an den Salzgehalt n. BioConsult 2006 bzw. eigener Einschätzung für die Schwarzmundgrundel, Reihung der Arten innerhalb jeder Gilde in abnehmender Häufigkeit).*

Art / Gilde	**Salinitätszonen n. Caspers (1959) & entsprechende Salzgehalte in PSU**					
	limnisch	**oligohalin**	**β-mesohalin**	**α-mesohalin**	**polyhalin**	**euhalin**
	< 0,5	**0,5 - < 5**	**5 - < 10**	**10 - < 18**	**18 - < 30**	**≥ 30**
limnisch						
Zander	XR	XR	X	X		
Brassen	XR	XR	X			
Flussbarsch	XR	XR	X(R)	(X)		
Moderlieschen	XR	XR	X			
Rotauge	XR	XR	X			
Kaulbarsch	XR	XR	X(R)			
Karpfen	XR	XR	X			
Zwergstichling	XR	XR	X	X		
Güster	XR	XR	X			
Gründling	XR	X				
Aland	XR	XR	X	(X)		
Steinbeißer	XR	X				
ästuarin						
Schwarzmundgrundel	XR	XR	XR	XR	XR	
Sandgrundel		X	X	XR	XR	XR

Strandgrundel	X	X	XR	XR	XR	XR
Glasgrundel			X	X	X	X
Kleine Seenadel		X	X	X	X	X
Schwarzgrundel			X	X	X	X
Aalmutter		X	X	X	X	X
ästuarin-diadrom						
Stint	XR	X	X	X	X	X
Flunder	X	X	X	XR	XR	XR
Finte	XR	X	X	X	X	X
Große Maräne	XR	XR	XR	X	X	
diadrom						
Aal	X	X	X	X	X	XR
Dreist. Stichling	XR	XR	XR	XR	XR	XR
Flussneunauge	XR	X	X	X	X	
marin-juvenil						
Hering		X	XR	XR	XR	XR
Dorsch			(X)	X(R)	XR	XR
Wittling				X	X	X
Seezunge		X	X	X	X	X
marin-saisonal						
Sprotte		X	X	X	X	X

Der **limnischen Gilde** (Süßwasserarten) sind die meisten (12) der 30 von Kafemann (2004) gefangenen Arten zuzuordnen, von denen Zander, Brassen, Flussbarsch, Moderlieschen, Rotauge und Kaulbarsch mit Fangmengen > 1 n (Individuum) je Hektar auftraten (Abbildung 2-18). Verbreitungsschwerpunkt sind limnische (< 0,5 PSU) und oligohaline (0,5 - < 5 PSU) Kanalabschnitte. Die meisten Arten dringen auch noch in β-mesohalines Wasser (5 - < 10 PSU), einige wenige auch in α-mesohalines Wasser (10 - < 18) vor. Letzteres gilt für Zander und Zwergstichling sowie eventuell auch für Flussbarsch und Aland, wenn diese an hohe Salzgehalte speziell angepasst sind, wie es für einzelne Bestände im Ostseebereich belegt ist (vgl. Anhang 1 und dort genannte Literatur). Zur Vermehrung sind die limnischen Arten in aller Regel auf Salzgehalte < 5 PSU angewiesen (z. B. Schöfer 1979, Klinkhardt & Winkler 1989); für Flussbarsch und Kaulbarsch wird für in Brackwassergebieten lebende Bestände auch von erfolgreicher Reproduktion bis in den β-mesohalinen Bereich hinein berichtet. Entsprechend des Salzgehaltsgradienten im NOK besiedeln limnische Arten vorwiegend den westlichen Kanalabschnitt. Für die Vermehrung sind sie dort auf flache Seitenbereiche und insbesondere Zuflüsse wie die Haaler Au angewiesen (Kafemann 2004, Kafemann et al. 1998). Vermutlich erfolgt auch eine Einwanderung aus der Tideelbe, in der Arten wie Zander und Kaulbarsch in relativ hohen Bestandsdichten vorkommen (Eick & Thiel 2014).

Arten der **ästuarinen Gilde** (Brackwasserarten) sind im NOK insbesondere durch verschiedene Grundelarten vertreten, die alle im Mesohalinikum (5 bis > 18 PSU) sowie auch höheren Salzgehalten in großen Bestandsdichten angetroffen werden können. Sand-, Strand- und Schwarzmundgrundel sind auch im Oligohalinikum und z. T. auch noch in limnischen Bereichen häufig. Zur Reproduktion sind die meisten Grundelarten auf mesohaline Gewässerabschnitte angewiesen. Die Schwarzmundgrundel reproduziert auch im Süßwasser und Oligohalinikum. Alle Grundeln benötigen zur Eiablage Hartsubstrate in Form von Muschelschalen oder Steinen. Die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Vermehrung sind in den Steinschüttungen der Kanalböschungen in großem Umfang gegeben, was ein Grund für die große Häufigkeit dieser Arten im gesamten NOK sein dürfte. Als massenhaft vorkommende Kleinfische sind die Grundeln eine wichtige Nahrungsgrundlage für Raubfische wie den Zander (Hempel et al. 2016) und vermutlich auch für einige fischfressende Vogelarten.

Arten der **ästuarin-diadromen Gilde** sind Brackwasserarten, die zur Eiablage ins Süßwasser oder umgekehrt ins Meer wandern. Abgesehen von Eiern und Larven, tolerieren diese Arten eine sehr

große Spanne an Salzgehalten von reinem Süßwasser bis hin zur reinem Seewasser. Häufigste Art dieser Gilde war bei den Untersuchungen von Kafemann (2004) der Stint, die mit Abstand häufigste Fischart der Tideelbe. Die Stinte des NOK wandern vermutlich über die Schleusen Brunsbüttel in den Kanal ein und verteilen sich dort über dessen gesamte Länge bzw. alle vorkommenden Salzgehaltszonen. Im Kanal selbst sowie in seinen Zuflüssen findet vermutlich keine Reproduktion statt. Ebenso wie die Grundeln (und der Hering) stellt der Stint vermutlich eine wichtige Nahrungsgrundlage für Raubfische und fischfressende Vögel dar. Zweithäufigste Art dieser Gilde ist die Flunder, die in großer Menge Ästuare und Teile der Ostsee besiedelt. Während Juvenile und Adulte bis in das Süßwasser vordringen, findet die Reproduktion im Euhalinikum (≥ 30 PSU) der Nordsee bzw. in der Ostsee auch in weniger salzhaltigen Bereichen statt. Die Flundern des NOK können sowohl über die Brunsbütteler als auch über die Holtenauer Schleusen in den Kanal einwandern, den sie als Nahrungsgebiet nutzen. Anglerfänge sind nach Czerny (1996) im östlichsten Kanalviertel am häufigsten, was darauf hindeutet, dass Flundern entsprechender (angelfähiger) Größe sich bevorzugt in α-mesohalinen Kanalabschnitten aufhalten. Jungfische präferieren nach Kerstan (1991) limnische und oligohaline Gewässer, d. h. im NOK vermutlich die westlichen Kanalabschnitte. Eine weitere, im NOK fischereilich wichtige ästuarin-diadrome Art ist die Große Maräne/Ostseeschnäpel, deren Bestand seit 2008 durch regelmäßigen Besatz gestützt wird, da im NOK offenbar nur eine geringe, erfolgreich verlaufende Reproduktion in Seitenbereichen wie dem Flemhuder See stattfindet, wenn dort während der Laichzeit zumindest in Teilbereichen die Salzgehalte unter 10 PSU liegen (Hempel & Neukamm 2023).

Arten der **diadromen Gilde** haben ihre Hauptnahrungsgebiete im Meer (inklusive Brackwasser der Ostsee) und ihre Laichgebiete im Süßwasser - oder umgekehrt. Die im NOK häufigste Art dieser Gilde ist der Aal, dessen Reproduktionsgebiete in der Sargassosee liegen, von der ausgehend die Larven bis an die europäischen Küsten driften. Die heranwachsenden Aale wandern weiter in Flüsse hinein, verbleiben z. T. aber auch in Ästuaren und Küstengewässern. Im NOK werden Aale in allen Abschnitten, d. h. in allen Salzgehaltsbereichen etwa gleich häufig geangelt (Czerny 1996). Vor dem Hintergrund eines stark rückläufigen Larven-/Jungaalaufkommens an der Küste, erfolgt im NOK seit 2006 ein umfangreicher Besatz (Neukamm et al. 2021).

Von der **marin-juvenilen und juvenil-saisonalen Gilde** (Meeresfische, bei denen Jungfische bzw. älter Fische saisonal zur Nahrungssuche in wenig salzhaltiges Wasser vordringen) ist im NOK der Hering die häufigste Art. Der Hering hat dort zudem eine relativ hohe berufs- und angelfischereiliche Bedeutung. Bereits kurz nach Fertigstellung hat sich der NOK zu einem der wichtigsten Laichplätze des Herings in der westlichen Ostsee entwickelt. Nach Kils (1992) wandern alljährlich von März bis Mai mehrere Millionen Heringe über die Schleusen Kiel-Holtenau bis zu den Laichgebieten mit geeigneten Salzgehalten ≥ 5 PSU (1992 etwa zwischen Kanal-km 50 und 80), um an den dortigen Steinschüttungen bzw. den darauf wachsenden Fadenalgen ihre Eier abzulegen und anschließend in die Ostsee zurückzukehren. Die Wasserbewegungen durch den Schiffsverkehr führen zu einer guten Sauerstoffversorgung der Eier, so dass die Schlupfraten höher als in vielen anderen bekannten Laichgebieten der Ostseeheringe ausfallen. Die Jungheringe ernähren sich im Kanal vorrangig von Copepoden (Kleinkrebsen, Kap. 2.2.2), bis sie diesen von Sommer bis Herbst in Richtung Ostsee verlassen.

2.6.3 Zukünftige Entwicklung

Wie in Kap. 2.3 erläutert, ist zukünftig aufgrund verschiedener Faktoren mit einer Zunahme der Salzgehalte um lokal mehrere PSU zu rechnen. Zu- und Abnahmen in vergleichbaren oder höheren Größenordnungen treten im Kanal regelmäßig in Zusammenhang mit saisonal unterschiedlichen Abflüssen aus dem Einzugsgebiet und unterschiedlichen Zu-/Abflüssen über die Brunsbütteler und Kieler Schleusen auf. Bei ausreichender Salzgehaltstoleranz verbleiben die Fische dann an Ort und Stelle; ansonsten suchen sie vom Salzgehalt her geeignetere Bereiche im Kanal oder seinen Zuflüssen auf.

Änderungen der mittleren Salzgehalte können sich auf die Arten bzw. Gilden unterschiedlich auswirken.

Für Süßwasserfische (**limnische Gilde**) ist langfristig mit einer weiteren Einschränkung der insbesondere östlichen Kanalabschnitte als geeigneter Lebensraum zu rechnen. Gleiches gilt für die Tideelbe, so dass von dort möglicherweise weniger Süßwasserfische wie z. B. Zander in den NOK einwandern. Eine möglichst gute Vernetzung des Kanals mit Süßwasserzuflüssen als Rückzugsgebiet bei vorübergehend erhöhten Salzgehalten sowie zur Reproduktion wird zum Erhalt dieser Arten noch mehr an Bedeutung gewinnen. Vor diesem Hintergrund ist aus fischökologischer Sicht z. B. zu empfehlen, den Hauptabfluss der oberen Eider über einen Fischpass in den Südzipfel des Flemhuder Sees zu leiten, so dass Süßwasserarten sich bei Bedarf dorthin oder ggf. weiter in die Eider hinein zurückziehen können.

Arten der **ästuarinen und ästuarin-diadromen Gilden** (Grundelarten, Stint, Flunder, Große Maräne/Ostseeschnäpel, etc.) tolerieren zunehmende Salzgehalte oder profitieren im westlichen, für einige Arten dieser Gilden bisher zu wenig salzhaltigem Kanalabschnitt davon. Die aufgrund ihres massenhaften Vorkommens im Nahrungsnetz wichtigen Arten dieser Gilden wie insbesondere Grundeln und Stinte werden voraussichtlich keine Bestandseinbußen erfahren. Für den Ostseeschnäpel, der weniger als 10 PSU Salzgehalt für eine erfolgreiche Reproduktion in seinen Laichgebieten (Seen, Kanalaufweitungen) benötigt, ergeben sich hingegen weitere Einschränkungen der Reproduktionsmöglichkeiten, so dass diese fischereilich genutzte Art Bestandseinbußen erfahren könnte (zumindest wenn diese nicht durch Besatz kompensiert werden). Zu Aufrechterhaltung/Verbesserung der Reproduktionsmöglichkeiten ist die oben bereits angesprochene Einleitung eines Großteils des Eiderabflusses in den Flemhuder See zu empfehlen, so dass sich dort ein Salzgehaltsgradient bildet, in dem der Schnäpel (sowie auch andere Fischarten) gezielt ihnen zusagende Salzgehaltszonen zur Vermehrung (oder zum Aufenthalt) aufsuchen können.

Für die **diadromen Arten** (im NOK insbesondere Aal) ergeben sich bei zunehmenden Salzgehalten keine Einschränkungen der Siedlungsmöglichkeiten.

Unter den **marin-juvenilen und marin-saisonalen Arten** bevorzugt der Hering Salzgehalte > 5 PSU zur Vermehrung. Bei zunehmenden Salzgehalten ist eine Verschiebung bevorzugter Laichareale gen Westen möglich. Voraussichtlich wird sich dies nicht negativ auf die Bestandsgröße auswirken. Denkbar ist auch, dass bisher sehr seltene marine Arten wie Wittling und Seezunge bei zunehmenden Salzgehalten zukünftig etwas häufiger im Kanal auftreten werden.

Ein weiterer Einflussfaktor, der die Fischartenzusammensetzung des NOK zukünftig verändern kann, ist die Wassertemperatur (z. B. Janc et al. 2024). Aufgrund zukünftig im NOK (sowie Nordsee/Tideelbe und Ostsee) zunehmenden Temperaturen können Arten, die ihre südliche Verbreitungsgrenze in Deutschland erreichen, im NOK seltener werden oder ganz verschwinden. Dies betrifft z. B. die - allerdings auch bisher nur selten nachgewiesenen - Arten Dorsch und Aalmutter. Umgekehrt können Arten, die in Deutschland ihre nördliche Verbreitungsgrenze erreichen oder zumindest eher warme Gewässer bevorzugen, zukünftig häufiger oder erstmals auftreten, z. B. Seezunge und verschiedene Meeräschen-Arten.

2.6.4 **Synopse**

Zukünftig projizierte Änderungen der Salzgehalte in NOK, Nordsee/Tidelbe und Ostsee werden sich auf Vorkommen und Häufigkeit von Fischarten des NOK auswirken. Süßwasserfische werden voraussichtlich Verkleinerungen ihrer Verbreitungsgebiete und Bestandsgrößen erfahren, während bei einigen Meeresfischen und einem Teil der ästuarinen Arten Vergrößerungen der Verbreitungsgebiete und Bestandsgrößen zu erwarten sind. Die meisten ästuarinen Arten, zu denen die massenhaft vorkommenden und daher im Nahrungsnetz wichtigen Grundelarten zählen, werden vermutlich weitgehend

gleiche Bestandsgrößen wie bisher aufweisen. Gleiches gilt für Hering und Aal Die Reproduktionsmöglichkeiten für den in Aufweitungen/Seen des östlichen Kanalabschnitts bei unter 10 PSU laichenden Ostseeschnäpel werden sich verschlechtern. Zur Minderung der negativen Auswirkungen auf Süßwasserfische und Ostseeschnäpel ist eine möglichst gute Vernetzung zwischen Zuflüssen und NOK besonders wichtig; beispielsweise durch die Einleitung der oberen Eider (oder eines großen Abflussanteils) über einen Fischpass in das Südende des Flemhuder Sees. Unabhängig vom Salzgehalt wirken zukünftig auch höhere Wassertemperaturen auf die Fischfauna des NOK ein. Die Folge ist ein Rückgang von Kaltwasserarten wie Dorsch und Aalmutter sowie eine Zunahme/Neueinwanderung von Warmwasserarten wie Seezunge und verschiedenen Arten von Meeräschen.

2.6.5 **Literatur**

Arnold, A. & Längert, H. (1995): Das Moderlieschen *Leucaspius delineatus*. Biologie, Haltung und Artenschutz. Die Neue Brehm-Bücherei 623, 121 S.

Backiel, T & J. Zawisza (1968): Synopsis of biological data on common bream. FAO Fisheries Synopsis, 36, Rome

Barus, V., Penaz, M. & K. Kohlmann (2001): *Cyprinus carpio* (Linnaeus, 1758). In Banarescu, P. & H.-J. Paepke (eds.): The Freshwater Fishes of Europe 5/III Carassius to Cyprinus. Aula-Verlag, Wiebelsheim, 85-179

BioConsult (2006): Fischbasiertes Bewertungswerkzeug für Übergangsgewässer der norddeutschen Ästuare. Gutachten im Auftrag der Länder Niedersachsen und Schleswig-Holstein, 95 S.

BioConsult (2023): Zeitliche und räumliche Verteilung von Fintenlaichprodukten in der Tideelbe. Zwischenbericht Monitoringzeitraum 2021 – 2022. Gutachten im Auftrag des Wasserstraßen- und Schifffahrtsamtes (WSA) Elbe-Nordsee, 137 S.

Bone, Q. & N. B. Marshall (1985): Biologie der Fische. Gustav Fischer Verlag. Stuttgart, New York, 236 S.

Brandhorst, W. (1956): Über Laichen und Aufwuchs des Frühjahrsherings im Nord-Ostsee-Kanal. Aus dem Institut für Meereskunde der Universität Kiel, 186-199

Brown, J. A., Moore, W. M. & E. S. Quabius (2005): Physiological effects of saline waters on zander. Journal of Fish Biology 59, 1544–1555

Cabral, H. & M. J. Costa (1999): Differential use of nursery areas within the Tagus estuary by sympatric soles, *Solea solea* and *Solea senegalensis*. Environmental Biology of Fishes 56, 389–397

Venice System“). Int. Rev. ges. Hydrobiol 44, 313-316

Christensen, E. A. F., Skovrind, M., Olsen, M. T., Carl, H., Gravlund, P. & P. R. Møller (2016): Hatching success in brackish water of *Perca fluviatilis* eggs obtained from the western Baltic Sea. Cybium 40 (2), 133-138

Christensen, E. A. F., Grosell, M. & J. F. Steffensen (2019): Maximum salinity tolerance and osmoregulatory capabilities of European perch *Perca fluviatilis* populations originating from different salinity habitats. Conservation Physiology 7, 1-5

Czerny, D. (1996): Vorkommen, Verbreitung und Häufigkeit der Fische und Neunaugen im Nord-Ostsee-Kanal. Fischökologie 9. 1-14

Dolbeth, M., Martinho, F., Leitao, R., Cabral, H. & M. A. Pardal (2007): Strategies of *Pomatoschistus minutus* and *Pomatoschistus microps* to cope with environmental instability. Estuarine, Coastal and Shelf Science 74 (1-2), 263-273

Dorow, M. & J. Frankowski (2023): Aktuelle Entwicklung des Aalbestands in den Küstengewässern Mecklenburg-Vorpommerns. Zeitschrift für Fischerei 3, 1-14

Eick, D. & R. Thiel (2014): Fish assemblage patterns in the Elbe estuary: guild composition, spatial and temporal structure, and influence of environmental factors. Marine Biodiversity 44 (4), 559-580

Elliott, M. & F. Dewailly (1995): The structure and components of european estuarine fish assemblages. Netherlands Journal of Aquatic Ecology 29 (3-4), 397-417

Fiedler, M. & U. Kils (1990): Fischereibiologische Untersuchungen im Nord-Ostsee-Kanal. Institut für Meereskunde an der Universität Kiel, 392 S.

Froese, R. & D. Pauly (2025): FishBase. World Wide Web electronic publication.www.fishbase.org, (04/2025)

Green, L., Griful Dones, M. & C. Kvarnem (2024): Reproductive dysfunction in seawater provides an environmental barrier to the range expansion of the invasive *Neogobius melanostomus* in-to the North Sea. Biol Invasions 26, 4301–4315

Härmä, M., Lappalainen, A. & L. Urho (2008): Reproduction areas of roach (*Rutilus rutilus*) in the northern Baltic Sea: potential effects of climate change. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 65 (12), 2678-2688

HELCOM Red List Fish and Lamprey Species Expert Group (2013a): Species Information Sheet *Gobio gobio*. - https://helcom.fi/wp-content/uploads/2019/08/HELCOM-Red-List-Gobio-gobio.pdf

HELCOM Red List Fish and Lamprey Species Expert Group (2013b): Species Information Sheet Cobitis taenia. - https://helcom.fi/wp-content/uploads/2019/08/HELCOM-Red-List-Cobitis-taenia.pdf

Hempel, M. (2017): Ecological niche of invasive round goby *Neogobius melanostomus* (Pallas, 1814) in the Kiel Canal and adjacent section of the Elbe River. Dissertation, Universität Hamburg, 123 S.

Hempel, M., Neukamm, R. & R. Thiel (2016): Effects of introduced round goby (*Neogobius melanostomus*) on diet composition and growth of zander (*Sander lucioperca*), a main predator in European brackish waters. Aquatic Invasions 11 (2), 167–178

Hempel, M. & R. Neukamm (2023): Ausbau der Oststrecke des Nord-Ostsee-Kanals. Fischereibiologisches Monitoring Flemhuder See - Stellnetzbefischungen Ostseeschnäpel -. Zwischenbericht 2022. Gutachten der Hegegemeinschaft Gewässersystem Nord-Ostsee-Kanal, 9 S.

Hölker, F. & R. Thiel (1998): Biology of ruffe (*Gymnocephalus cernuus* (L.)) - a review of selected aspects from European literature. J. Great Lakes Res. 24(2),186-204

Hufgard, H, Adam, B. & U. Schwevers (2015): Ergebnisse des Aufstiegsmonitorings an Europas größter Fischaufstiegsanlage an der Elbe in Geesthacht.

N. Cabral (2024): Fish distribution shifts due to climate change in the North-east Atlantic: Using a hierarchical filtering approach on marine-estuarine opportunist species. Estuarine, Coastal and Shelf Science 310, 1-15

Kafemann, R., Thiel, R., Finn, J. E. & R. Neukamm (1998): The role of freshwater habitats for the reproduction of common bream *Abramis brama* (L.) in a brackish water system. Pol. Arch. Hydrobiol. 45 (2), 225-244

Kafemann, R. (2004): Langzeitstudie: Fischgemeinschaft im Nord-Ostsee-Kanal. Betrachtungszeitraum: 1995-2002. Gutachten im Auftrag der Universität Hamburg, Institut für Fischereiwissenschaften, der Hegegemeinschaft Nord-Ostsee-Kanal, vertreten durch den Landessportfischerverband

Schleswig-Holstein e. V. und der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, vertreten durch das Wasser- und Schifffahrtsamt Kiel-Holtenau, 80 S. + Anhang

Kerstan, M. (1991): The importance of rivers as nursery grounds for 0- and 1-group flounder (*Platichthys flesus* L.) in comparison to the Wadden Sea. Netherlands Journal of Sea Research 27 (3/4), 353-366

Kijewska, A., Kalamarz-Kubiak, H., Arciszewski, B., Guellard, T., Petereit, C. & R. Wenne (2016): Adaptation to salinity in Atlantic cod from different regions of the Baltic Sea. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 478, 62–67

Kils, U. (1992): Untersuchungen zum Einfluß der Stein-Schüttungen und des Schiffsverkehrs im Nord-Ostsee-Kanal auf die Laich-Biologie des Herings, *Clupea harengus*. Institut für Meereskunde Kiel, 20 S.

Klinkhardt, M. B. & H. M. Winkler (1989): Einfluß der Salinität auf die Befruchtungs- und Entwicklungsfähigkeit der Eier von vier Süßwasserfischarten Plötz (*Rutilus rutilus*), Barsch (*Perca fluviatilis*), Kaulbarsch (*Gymnocephalus cernua*) und Zander (*Stizostedion lucioperca*). Wiss. Z. Universität Rostock – N-Reihe 38 (5), 23-30

Lehtonen, H., Hansson, S. & H. Winkler, H. (1996): Biology and exploitation of pikeperch, *Stizostedion lucioperca* (L.), in the Baltic Sea area. Annales Zoologici Fennici 33, 525–535

Lillelund, K. (1961): Untersuchungen über die Biologie und Populationsdynamik des Stintes *Osmerus eperlanus eperlanus* [LINNAEUS 1758], der Elbe. Archiv für Fischereiwissenschaft 12 (1. Beiheft), 127 S.

Marohn, L. Jakob, E., & R. Hanel (2013): Implications of facultative catadromy in *Anguilla anguilla*. Does individual migratory behaviour influence eel spawner quality? Journal of Sea Research 77, 100–106

Nellen, W. (1963): Fischereibiologische und faunistische Brackwasseruntersuchungen in der Schlei, einer Ostseeförde Schleswig-Holsteins.- Inaugural-Dissertation, Universität Kiel

Neudecker, T. (1975): Untersuchungen über die Entwicklung von Eiern und Larven des Karpfens (*Cyprinus carpio*) in Wasser verschiedenen Salzgehaltes. Diplomarbeit Universität Göttingen

Neukamm, R., Hempel, M. & M. Behrens (2021): Der Einfluss von Aalbesatzmaßnahmen auf die Bestandsstruktur in den Gewässersystemen Nord-Ostsee-Kanal und Elbe-Lübeck-Kanal. Zwischenbericht Jahr 2020. Hegegemeinschaft Gewässersystem Nord-Ostsee-Kanal vertreten durch den Landessportfischerverband Schleswig-Holstein e. V. (Hrsg.), 50 S.

Neumann, M. (2002): Die Süßwasserfische und Neunaugen Schleswig-Holsteins – Rote Liste. Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein (Hrsg.), 58 S.

Paepke, H.-J. (1983): Die Stichlinge. Die Neue Brehm-Bücherei 10, 144 S.

Paepke, H.-J. (2001): *Gasterosteus aculeatus* Linnaeus, 1758. In Banarescu, P. & H.-J. Paepke (eds.): The Freshwater Fishes of Europe 5/III Carassius to Cyprinus. Aula-Verlag, Wiebelsheim, 209-256

Poirier, M. (2015): Local adaptation in Atlantic herring (*Clupea harengus*) - Interaction of salinity, pathogen and parents origin. Master Thesis, GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel, 49 S.

Power, M. & M. J. Attrill (2003): Long-term trends in the estuarine abundance of Nilsson's pipefish (*Syngnathus rostellatus* Nilsson). Estuarine, Coastal and Shelf Science 57, 325–333

Rebl, A., Schmachtl, F., Brunner, R. M., Kühn, C., Swirplies, F. & T. Goldammer (2025): More than just a pinch of salt? The impact of increasing salinity on maraena whitefish in different husbandry systems. Aquaculture Reports 42, 1-11

Miller, P.J. (2004): *Pomatoschistus microps* (Krøyer, 1838). In: P.J. Miller: The Freshwater Fishes of Europe, Vol. 8/II. Gobiidae 2, 293-330.- Aula-Verlag, Wiebelsheim

Nellen, W. (1965): Beiträge zur Brackwasserökologie der Fische im Ostseeraum. Kieler Meeresforsch. 21, 192–198

Neukamm, R. (pers. Mitt. 2023): Rüdiger Neukamm, Landesangelverband Schleswig-Holstein e. V.

Schöfer, W. 1979. Untersuchungen zur Fortpflanzungsfähigkeit der Plötze (*Rutilus rutilus* L.) im Brackwasser. Arch. Hydrobiol. 86, 371-395

Scott, D. M., Wilson, R. W. & J. A. Brown (2007): The osmoregulatory ability of the invasive species sunbleak *Leucaspius delineatus* and topmouth gudgeon *Pseudorasbora parva* at elevated salinities, and their likely dispersal via brackish waters. J. Fish Biol. 70 (5), 1606-1614

Skovrind, M., Olsen, M. T., Vieira, F. G., Pacheco, G., Carl, H., Thomas, M., Gilbert P. & P. R. Møller (2016): Genomic population structure of freshwater-resident and anadromous ide (*Leuciscus idus*) in north-western Europe. Ecology and Evolution 6(4), 1064–1074

Shikano, T., Ramadevi, J. & J. Merila (2010): Identification of Local- and Habitat-Dependent Selection: Scanning Functionally Important Genes in Nine-Spined Sticklebacks (*Pungitius pungitius*). Mol. Biol. Evol. 27(12), 2775–2789

Thiel R. & R. Thiel (2015): Atlas der Fische und Neunaugen Hamburgs, 170 S.

Vetemaa, M. & T. Saat (1996): Effects of salinity on the development of fresh-water and brackish-water ruffe *Gymnocephalus cernuus* (L.) embryos. Annales Zoologici Fennici 33 (3/4), 687-691

Zakhartsev, M. V., De Wachter, B., Sartoris, F. J., Pörtner, H. O. & R. Blust (2003): Thermal physiology of the common eelpout (*Zoarces viviparus*). J. Comp. Physiol. B.173 (5), 365-378

2.7 Avifauna + Salz

Teilprojektverantwortlichkeit: Dominic Neumann

2.7.1 **Einleitung und Methoden für den Ist-Zustand**

In diesem Arbeitspaket soll der Ist-Zustand der Avifauna am NOK beschrieben werden. Hierfür wurden Daten vom WNA NOK, dem Landesamt für Umwelt des Landes Schleswig-Holstein sowie Daten aus dem bundesweiten Monitoring für den Atlas deutscher Brutvogelarten (ADEBAR) von 2005 bis 2009 verwendet.

Die Daten von letzterem Projekt wurden aus dem Zweiten Brutvogelatlas von Schleswig-Holstein (Koop & Berndt, 2014) entnommen und liegen als DTK 25 Rasternachweise vor. Da dieser Datensatz konsistent und flächendeckend aus einem klar definierten Zeitraum vorliegt, wird dieser als Hauptbestandteil der Auswertung angesehen. Bei den Daten des WNA NOK und des Landesamtes SH handelt es sich um punktgenaue GPS-Daten, die in der Regel in abgegrenzten Flächen und teilweise mit begrenztem Artenspektrum erfasst wurden. Diese Daten sollen genutzt werden, um punktuelle Besonderheiten und potenzielle Entwicklungstrends des Bestandes besser darstellen können.

2.7.2 **Untersuchungsgebiet**

Der NOK mit einer Gesamtlänge von 98,7 km durchfließt alle drei großen Naturräume von Schleswig-Holstein. Etwa 70% der Fläche von Schleswig-Holstein sind Agrarlandschaften, wovon etwa 32% Dauergrünland sind. Gerade das Dauergrünland und die darin enthaltenen extensiven Feuchtwiesen sind von besonderer Bedeutung für die Avifauna in Schleswig-Holstein, denn das Bundesland stellt die bundesweit zweitgrößten Bestände von Wiesen-Limikolen. Extensive Feuchtwiesen sind insbesondere in den Flussniederungen des Bundeslandes zu finden. (Koop & Berndt, 2014)

Die vogelkundliche Bedeutung des NOK ist im Vergleich zu naturnahen Flüssen deutlich geringer. Dennoch stellen der NOK und die angrenzenden Naturräume wichtige Lebensräume für Brut- und Rastvögel dar.

Eine vogelkundlich bedeutsame Besonderheit sind ehemalige Spülflächen, die zum Teil der Sukzession überlassen wurden. Hier sind Lebensräume entstanden, die je nach Zeitpunkt der letzten Aufspülung seltene temporäre Lebensräume für unterschiedliche Artengemeinschaften zunächst offener, dann halboffener und letztlich bewaldeter Landschaften bilden (Berndt, 2016).

Es befinden sich sechs Vogelschutzgebiete (NSG Ahrensee und nordöstlicher Westensee, Staatsforsten Barlohe, Haaler Au-Niederung, NSG Kudensee, Binnendünen- und Moorlandschaft im Sorgetal, Eider-Treene-Sorge-Niederung) direkt an oder in der Nähe des NOK. Da an Wasser gebundene Zugvogelarten größere Landmassen bei ihren Zugbewegungen meiden, spielt der NOK als Zugroute für solche eine wichtige Rolle.

Zur Erfassung des Ist-Zustandes der Avifauna am NOK wurden 34 DTK 25 Rasterviertel ausgewählt, welche fast den kompletten Verlauf des NOK von km 2,3 bis km 98,6 und dessen nähere Umgebung einschließen (siehe Abbildung 2-19). Die Rasterviertel bei NOK-km 0 bis 2,3 wurden nicht in die Bewertung aufgenommen, da diese den NOK nur am Rande tangieren und somit überwiegend den Uferbereich des Elbeästuars beinhalten. Da mögliche Auswirkungen eines steigenden Salzgehaltes im NOK auf die Avifauna untersucht werden sollen, könnte der schwankende Salzgehalt in diesem Bereich der Elbe die Ergebnisse potenziell verfälschen.

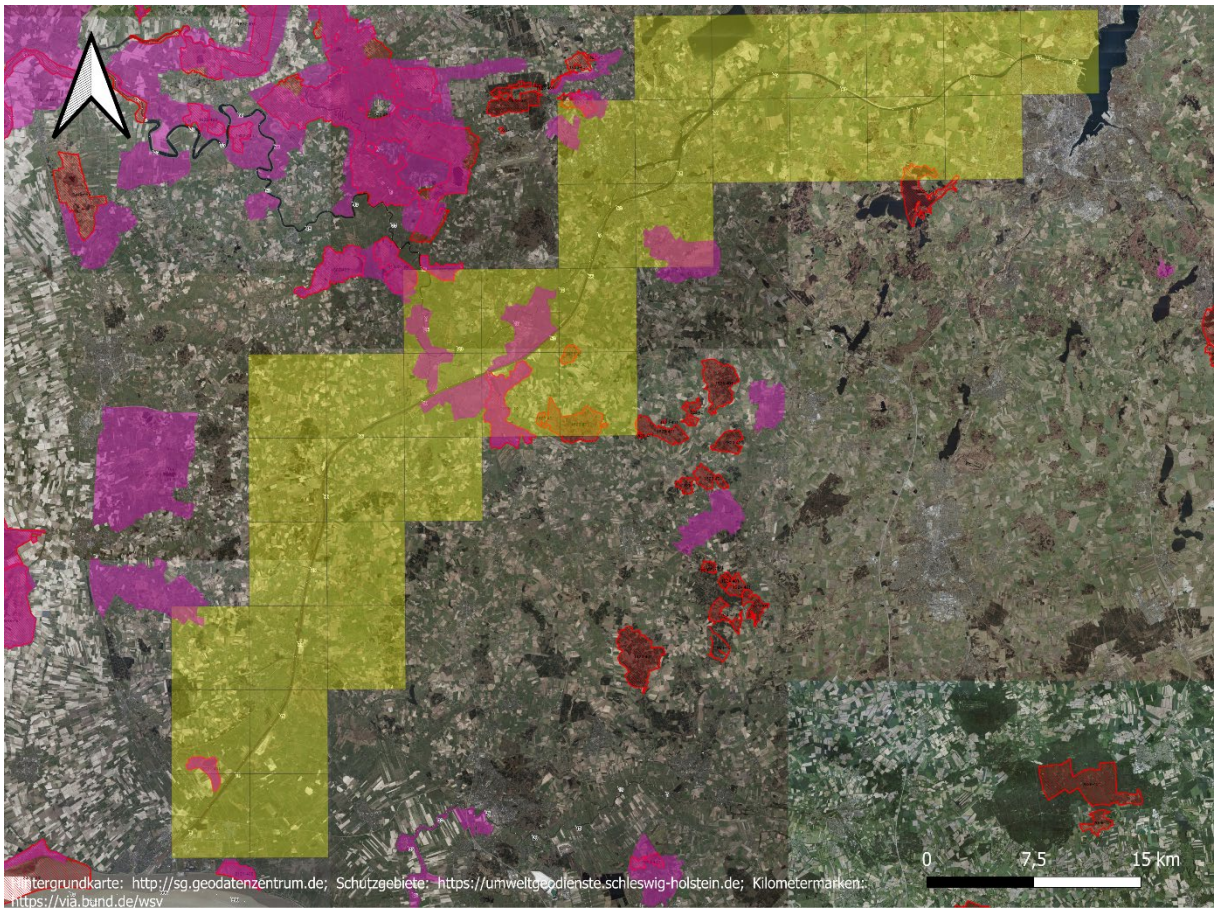


Abbildung 2-19: Betrachtungsraum für Brutvögel: 34 DTK25 Rasterzellen-Viertel (gelbe Kacheln) à ca. 5,5 x 5,5 km Seitenlänge. In rosa dargestellt: Wiesenvogelkulisse. Rot dargestellt: Vogelschutzgebiete.

2.7.3 **Verbreitung der Brutvögel**

Die aktuelle Rote Liste der Vögel von Schleswig-Holstein (Kiekbusch et al., 2021) wird als Referenzartenliste genutzt. Sie gibt aktuell an, welche Arten tatsächlich Brutvögel sind und welche Arten nur Durchzügler oder Irrgäste. Das macht im Gegensatz zu anderen Artengruppen Sinn, weil eine Art tatsächlich nur dort vorkommend gilt, wenn sie in dem Gebiet brütet. Ein Bezug zum Gefährdungsstatus wird nicht hergestellt. In der Rote Liste Vögel von Schleswig-Holstein werden 216 Arten als regelmäßige Brutvögel im Bundesland eingestuft. Die nachfolgende Tabelle 2.7-1 listet die Brutvogelarten im Untersuchungsgebiet nach dem Datensatz des Projektes Adebar von 2005 bis 2009 auf (Koop & Berndt (2014)). Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden hier nur ausgewählte wertgebende Arten der Flüsse und Flussauen aufgelistet. Die vollständige Artenliste ist diesem Bericht angehängt (Anhang 2).

Tabelle 2.7-1: Ausgewählte Liste der nachgewiesenen Brutvogelarten während des bundesweiten Projektes ADEBAR von 2005 bis 2009. Angegeben sind die Einstufung nach Vogelschutzrichtlinie (Anh. I: gelistet in Anhang I, Art. 4(2): Zugvogelart/Zielart, sonst. Zugvogel: 4(2) sonstige gefährdete Zugvogelart), Schutzstatus nach BNatSchG (§: besonders geschützt, §§: streng geschützt, §§§: streng geschützt nach EG-Artenschutzverordnung), die Anzahl der Raster mit Nachweisen im Untersuchungsgebiet mit dem prozentualen Anteil im Vergleich zur Gesamtanzahl der untersuchten Raster (Rasterfrequenz).

Deutscher Artname	Wissenschaftlicher Artname	VSR	BNatSchG	Anzahl Raster	Rasterfrequenz
Entenvögel	***Anseriformes***				
Singschwan	*Cygnus cygnus*	Anh. I	§§	1	2,94%
Schnatterente	*Anas strepera*	Art. 4(2): Rast	§	12	35,29%
Krickente	*Anas crecca*	Art. 4(2): Rast	§	12	35,29%
Stockente	*Anas platyrhynchos*	Art. 4(2): Rast	§	34	100,00%
Knäkente	*Anas querquedula*	Art. 4(2): Rast	§§§	4	11,76%
Löffelente	*Anas clypeata*	Art. 4(2): Rast	§	9	26,47%
Gänsesäger	*Mergus merganser*	Art. 4(2): Rast	§	5	14,71%
Mittelsäger	*Mergus serrator*	Art. 4(2): Rast	§	2	5,88%
Lappentaucher	***Podicipediformes***				
Zwergtaucher	*Tachybaptus ruficollis*	Art. 4(2): Rast	§	21	61,76%
Haubentaucher	*Podiceps cristatus*	Art. 4(2): Rast	§	20	58,82%
Rothalstaucher	*Podiceps grisegena*	Art. 4(2): Rast	§§	9	26,47%
Kormorane	***Phalacrocoraciformes***				
Kormorane	*Phalacrocorax carbo*	Art. 4(2): Rast	§	1	2,94%
Reiher	***Ardeiformes***				
Rohrdommel	*Botaurus stellaris*	Anh. I	§§	8	23,53%
Graureiher	*Ardea cinerea*	sonst. Zugvogel	§	4	11,76%
Störche	***Ciconiiformes***				
Weißstorch	*Ciconia ciconia*	Anh. I	§§	13	38,24%
Kranichvögel	***Gruiformes***				
Kranich	*Grus grus*	Anh. I	§§§	4	11,76%
Wasserralle	*Rallus aquaticus*	Art. 4(2): Brut	§	18	52,94%
Wachtelkönig	*Crex crex*	Anh. I	§§	4	11,76%
Teichhuhn	*Gallinula chloropus*	Art. 4(2): Rast	§§	33	97,06%
Blässhuhn	*Fulica atra*	Art. 4(2): Rast	§	34	100,00%
Regenpfeiferartige	***Charadriiformes***				
Säbelschnäbler	*Recurvirosta avosetta*	Anh. I	§§	1	2,94%
Kiebitz	*Vanellus vanellus*	Art. 4(2): Rast	§§	31	91,18%
Flussregenpfeifer	*Charadrius dubius*	Art. 4(2): Rast	§§	14	41,18%

Deutscher Artname	Wissenschaftlicher Artname	VSR	BNatSchG	Anzahl Raster	Rasterfrequenz
Sandregenpfeifer	*Charadrius hiaticula*	Art. 4(2): Rast	§§	7	20,59%
Großer Brachvogel	*Numenius arquata*	Art. 4(2): Rast	§§	10	29,41%
Uferschnepfe	*Limosa limosa*	Art. 4(2): Rast	§§	10	29,41%
Bekassine	*Gallinago gallinago*	Art. 4(2): Brut	§§	16	47,06%
Rotschenkel	*Tringa totanus*	Art. 4(2): Rast	§§	10	29,41%
Flussseeschwalbe	*Sterna hirundo*	Anh. I	§§	4	11,76%
Coraciiformes	***Rackenvögel***				
Eisvogel	*Alcedo atthis*	Anh. I	§§	19	55,88%
Sperlingsvögel	***Passeriformes***				
Beutelmeise	*Remiz pendulinus*	Art. 4(2): Brut	§	12	35,29%
Uferschwalbe	*Riparia riparia*	sonst. Zugvogel	§§	10	29,41%
Feldschwirl	*Locustella naevia*		§	32	94,12%
Rohrschwirl	*Locustella luscinioides*	Art. 4(2): Brut	§§	7	20,59%
Schilfrohrsänger	*Acrocephalus schoenobaenus*	Art. 4(2): Brut	§§	13	38,24%
Drosselrohrsänger	*Acrocephalus arundinaceus*	Art. 4(2): Brut	§§	1	2,94%
Braunkehlchen	*Saxicola rubetra*	Art. 4(2): Brut	§	27	79,41%
Blaukehlchen	*Luscinia svecica*	Anh. I	§§	13	38,24%
Steinschmätzer	*Oenanthe oenanthe*	Art. 4(2): Brut	§	4	11,76%
Wiesenpieper	*Anthus pratensis*	Art. 4(2): Brut	§	29	85,29%
Schafstelze	*Motacilla flava*	sonst. Zugvogel	§	23	67,65%

Im ausgewählten Untersuchungsgebiet wurden 161 Brutvogelarten nachgewiesen. Damit brüten etwa 75% der 216 als regelmäßige Brutvögel eingestuften Arten am NOK und in der näheren Umgebung. Der Vergleich mit den Daten des Landesamtes und des WNA NOK lässt eine genauere Einschätzung der Bestandsentwicklungen im Untersuchungsgebiet zu. So wurde der Seeadler im Datensatz von ADEBAR nur mit einem Brutpaar in einem Raster nachgewiesen. Dem Landesamt liegen jedoch Nachweise von 28 Bruten in 5 Rastern im Untersuchungsgebiet zwischen 2016 und 2022 vor. Im Brutvogelatlas gab es schon Hinweise auf eine deutlich positive Bestandsentwicklung seit 1999. Auch der Wanderfalke (8,82%) und der Steinkauz (32,35%) wurden in den aktuelleren Daten des Landesamtes mit höherer Rasterfrequenz nachgewiesen. Neue Brutvogelarten im Vergleich zu den Atlasdaten wurden im Untersuchungsgebiet weder in den Daten des WNA NOK noch in denen des Landesamtes nachgewiesen.

Bei einigen wertgebenden Arten sind besonders hohe Rasterfrequenzen zu erkennen. Bodenbrüter wie Kiebitz (91,18%), Wiesenpieper (85, 29%) und Rebhuhn (85,29%) lassen auf viele wertgebende Wiesenlebensräume schließen. Die weite Verbreitung von Braunkehlchen (79,41%), Bekassine (47,06%) und Blaukehlchen (38,24%) weisen auf viele Raster mit wertgebender Ufervegetation hin.

2.7.4 **Zukünftige Entwicklung**

Eine direkte Auswirkung eines steigenden Salzgehaltes im NOK auf die Avifauna in der Region ist unwahrscheinlich. Die meisten an Gewässer angepassten Vogelarten verfügen über funktionsfähige Salzdrüsen, die ihnen ein Ausscheiden von überschüssigem Salz erlauben (Brechner et al., 2001). Zudem sind Vögel durch ihre hohe Mobilität dazu in der Lage, in Lebensräume in der Umgebung auszuweichen. Aus diesem Grund spielt der Salzgehalt im NOK vermutlich nur eine geringe Rolle für potenzielle Brut- und Zugvögel. Einen größeren Einfluss können jedoch mögliche Auswirkungen auf Lebensräume am und Nahrung im NOK haben. Hierfür müssen die Ergebnisse anderer Arbeitspakete betrachtet werden:

Aus den Kapiteln 2.1 und 2.3 geht hervor, dass der Salzgehalt innerhalb des NOK einen deutlichen Gradienten mit höherer Salinität bei Kiel und niedrigerer Salinität Richtung Brunsbüttel zeigt. Ein solcher Gradient mit steigendem Salzgehalt in Bodennähe lässt sich auch im Zusammenhang mit der Gewässertiefe erkennen. Zudem kann der Salzgehalt deutlich schwanken. Die im Kanal lebende Fauna und Flora muss also schon eine gewisse Toleranz gegenüber Salinitätsschwankungen vorweisen.

Die Ergebnisse aus Kapitel 2.2 Gewässergüte und Salz lassen keinen unmittelbaren Effekt auf die Avifauna vermuten. Hinweise auf eine Zunahme von toxischen Algenblüten oder eine drastische Veränderung der Gewässergüte, die die Nahrungsgrundlage der Avifauna beeinflussen könnten, sind nicht zu erkennen.

Die Einschätzungen in Kapitel 2.4 Boden-Vegetation und Salz lassen zum aktuellen Zeitpunkt keine erheblichen Veränderungen der Vegetation erwarten, die zur Gefährdung oder Neuentstehung von Lebensräumen für die Avifauna führen könnte.

Die Prognose aus Kapitel 2.5 Makrozoobenthos und Salz lässt zum jetzigen Kenntnisstand nicht die Einschätzung zu, dass sich die Biomasse und Größenverteilung des Makrozoobenthos durch eine Veränderung des Salzgehaltes im NOK nennenswert verändern würde. Somit ist eine Betroffenheit von MZB-Fressern (z. B. Limikolen, Lappentaucher etc.) nicht zu erwarten.

Bei der Fischfauna, die in Kapitel 2.6 behandelt wird, ist eine Verschiebung der Diversität hin zu Salztoleranteren Arten möglich. Entlang des Gradienten der Salzverteilung ist dies auch schon zu erkennen. Dennoch müssen die dauerhaft im Kanal lebenden Fischarten schon eine gewisse Salztoleranz vorweisen, weshalb ein deutlicher Einfluss nicht zu erwarten ist. Fischfressende Vogelarten unterscheiden ihre potenzielle Nahrung nicht nach ihrer Salztoleranz, sondern vor Allem nach Größe, Form und Verfügbarkeit (Glutz von Blotzheim, 1987, 1992, 1994). Ein deutlicher Einfluss einer steigenden Salinität auf Biomasse und Größenverteilung lässt sich deshalb nicht vermuten. Eine Betroffenheit der fischfressenden Avifauna ist somit ebenfalls unwahrscheinlich.

Zusammenfassend lässt sich also feststellen, dass zum jetzigen Kenntnisstand kein direkter oder indirekter Einfluss eines potenziell steigenden Salzgehaltes im NOK auf die Avifauna zu erwarten ist. Neben dem großen Impact von Einflussfaktoren wie z. B. Lebensraumverlust, Intensivierung der Landwirtschaft und Störung durch die Schifffahrt ist eine isolierte Betrachtung dieses Faktors jedoch unmöglich. Der Einfluss durch den Salzgehalt wird sehr wahrscheinlich von dem Einfluss durch andere Faktoren überschattet. Aus diesem Grund werden tiefergehende Untersuchungen zur Avifauna in Phase 3 des Projektes als nicht sinnvoll erachtet.

2.7.5 **Literatur**

Berndt, R. K. (2016). Die Brutvögel der Spülfelder am Nord-Ostsee-Kanal, insbesondere unter dem Einfluss der Sukzession in den Jahren 2000 bis 2014. Corax 23: 43-75.

Brechner E., B. Dinkelaker & D. Dreesmann (2001): Kompaktlexikon der Biologie. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg. https://www.spektrum.de/lexikon/biologie-kompakt/salzdruesen/10167 (Stand: 10.06.2024)

Kieckbusch, J., B. Hälterlein, B. Koop (2021): Die Brutvögel Schleswig-Holsteins. 6. Fassung. Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, Flintbek. S. 121 ff.

Koop, B. & R. K. Berndt (2014): Vogelwelt Schleswig-Holsteins. Band 7. Zweiter Brutvogelatlas. Wachholtz Verlag, Neumünster. 504 S.

Koop, B. (2010): Schleswig-Holstein: Kreuzung internationaler Zugwege. Die Erfassung von Zugvögeln. Der Falke 57, S. 50-54.

Glutz von Blotzheim, U. N., K. M. Bauer: Handbuch der Vögel Mitteleuropas, Band 1, Gaviiformes – Phoenicopteriformes. Aula, Wiesbaden, 2. Aufl. 1987. S. 92 ff.

Glutz von Blotzheim, U. N., K. M. Bauer: Handbuch der Vögel Mitteleuropas, Band 3, Anseriformes (2. Teil). Aula, Wiesbaden, 2. Aufl. 1987. S. 407 ff.

Glutz von Blotzheim, U. N., K. M. Bauer: Handbuch der Vögel Mitteleuropas, Band 9, Columbiformes - Piciformes. Aula, Wiesbaden, 2. Aufl. 1987. S. 734 ff.

2.8 Eis + Salz

Teilprojektverantwortlichkeit: Dennis Meißner mit Zuarbeiten von Asta Kunkel, Claudius Fleischer

2.8.1 **Datengrundlagen und Vorgehensweise**

Ziel dieses Teilprojekts ist es, die Häufigkeit und Intensität von Eisvorkommen am NOK systematisch zu analysieren und die möglichen Veränderungen der Eisvorkommen in der Zukunft abzuschätzen. Dabei soll ausschließlich auf bestehende Daten und vorliegende Modellierungsergebnisse zurückgegriffen werden. Eine Erstellung neuer Modelle oder die Durchführung zusätzlicher Modellierungen im engeren Sinn sind daher planmäßig nicht erfolgt. Vor diesem Hintergrund wurde zunächst auf Basis der historischen Eis-Beobachtungsdaten des beim Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie angesiedelten Eisdienstes (BSH, 2018a; BSH 2018b) für die verschiedenen Messgrößen (Datum des ersten und letzten Auftretens von Eis, Saisonlänge, Anzahl der Tage mit Eis, maximale Eisdicke, Flächen- und Volumensumme, kodierte Schifffahrtsverhältnisse) eine systematische Rückschau auf die letzten Jahrzehnte (seit dem Winter 1939/40) erstellt. Die vergleichende Analyse der historischen meteorologischen Verhältnisse auf Grundlage des HYRAS-Datensatzes des Deutschen Wetterdienstes (Rauthe et al., 2013; Razafimaharo et al., 2020) hat gezeigt, dass die winterlichen Kältesummen die maßgebliche Einflussgröße auf die Eisausprägung am NOK sind. Aufgrund des engen statistischen Zusammenhangs zwischen Eisvorkommen und Winterkältesumme konnte ein bestehender Ansatz (Hatz & Maurer, 2014) zur Abschätzung klimawandelbedingter Veränderungen auf die Eisvorkommen im Binnenbereich adaptiert und auf den NOK angewendet werden. Als mögliche Entwicklungen in der Zukunft wurde hierzu das an der Bundesanstalt für Gewässerkunde im Rahmen des DAS-Basisdienstes „Klima und Wasser“ generierte Klimaprojektionsensemble basierend auf drei verschiedeneren Emissionsszenarien (RCP 8.5, RCP 4.5, RCP 2.8) herangezogen. In den Szenarien wird der Erfolg von Klimaschutzmaßnahmen unterschiedlich bewertet: ausgehend vom „geringen“ Erfolg im Klimaschutz (RCP 8.5, hohe Konzentrationen an Treibhausgasen), über “mittleren” (RCP 4.5) bis “hohen” Erfolg im Klimaschutz (RCP 2.6, niedrige Konzentrationen an Treibhausgasen (Van Vuuren et al., 2011)). Die Ensemblegröße der Szenarien variiert zwischen 16 Simulationen (RCP 8.5), 11 Simulationen (RCP 4.5) und 10 Simulationen für (RCP 2.6).

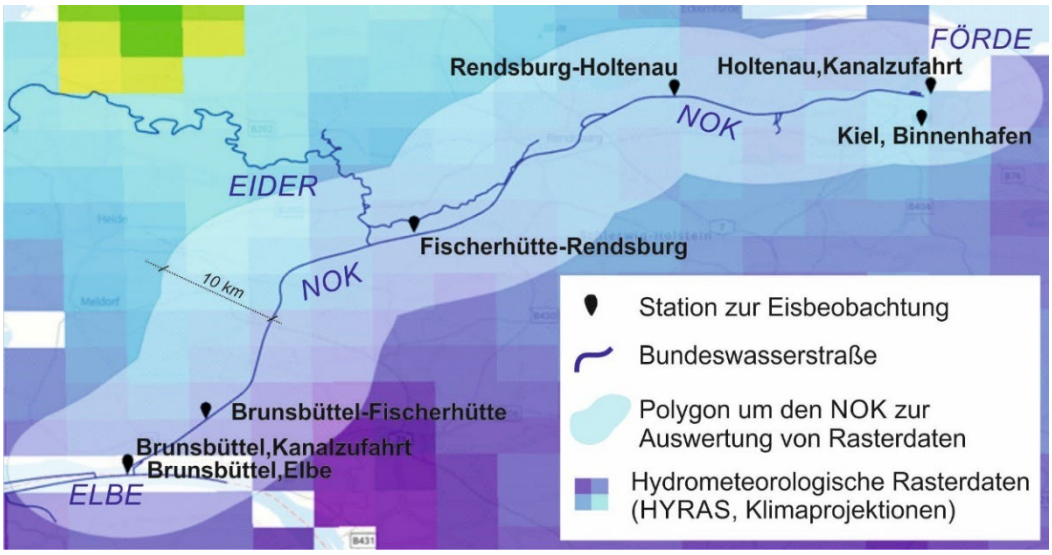


Abbildung 2-20: Lage der selektierten Stationen mit Eisbeobachtungen im / am NOK vor dem Hintergrund hydrometeorologischer Rasterdaten (5 km x 5 km) und des Polygons zur Rasterdatenselektion. Die Farbe der Rasterzellen symbolisiert unterschiedliche Lufttemperaturen beispielhaft für einen Tag

Für sieben im bzw. an den Rändern des NOK gelegene Stationen lagen Daten des BSH auf Jahres- bzw. Wintersaisonbasis seit dem Winter 1939/40 vor (siehe Abbildung 2-20, Station Brunsbüttel, Elbe und Brunsbüttel, Kanalzufahrt liegen sehr nah beeinander und sind daher nicht als getrennte Symbole zu erkennen). Jede Station repräsentiert hierbei die Verhältnisse eines Kanalabschnitts, so dass neben punktuellen Auswertungen auch Darstellungen im Kanallängsschnitt generiert werden konnten. Um die als Raster vorliegenden meteorologischen Daten (HYRAS, Klimaprojektionen) auf die Kanalabschnitte zu beziehen, wurde zu beiden Kanalseiten ein 10 km breites Polygon definiert, innerhalb dessen die Rasterdaten analysiert wurden.

Für eine weitergehende Beschreibung der verwendeten Datengrundlagen und Methoden wird auf den BfG-Bericht 2223 verwiesen (Kunkel et al., 2025).

2.8.2 **Rückblick: Auswertung historischer Eisdaten**

Die Eissituation an Nord- und Ostsee wird standardmäßig über verschiedene Messgrößen erfasst, die den jeweiligen Eiswinter in seiner Ausprägung und Stärke charakterisieren. Die vom Eisdienst des BSH bereitgestellten Daten wurden für sämtliche Messgrößen ausgewertet und grafisch aufbereitet. Exemplarische zeigt Abbildung 2-21 Auswertungen der maximalen Eisdicke (Längsschnittdarstellung), der Tage mit Eisbedeckung bzw. der Saisonlänge (stationsbezogen) sowie datumsbezogene Dauer des Eisauftretens (stationsbezogen). Die vollständigen Auswertungen (Grafiken für alle Stationen und sämtliche Parameter) sind dem BfG-Bericht 2223 zu entnehmen (Kunkel et al., 2025).

Zusammenfassend lassen sich in Übereinstimmung mit den klimatologischen Untersuchungen und Analysen des BSH (siehe u.a. Schmelzer et al., 2012; Schmelzer et al., 2015) folgende Ergebnisse für die Auswertung der historischen Eisdaten am NOK festhalten:

- Die vergangenen Jahrzehnte waren am NOK vom steten Wechsel ausgeprägter Eiswinter und eisfreier Jahre geprägt. Beispiele für strenge Eiswinter, in denen auch der NOK langandauernd und stark von Eis betroffen war, sind die Winter 1946/47, 1962/63, 1969/70 oder 1995/96). „Eisarm“ bzw. eisfrei waren am NOK neben den letzten Jahren auch die Winter Ende der 1980er und 1990er Jahre.
- Die überwiegende Zahl der Winter zeichnet sich am NOK nicht durch eine durchgängige Frost- bzw. Eisperiode aus, sondern typischerweise wechseln sich Frost- und Tauwetterperioden über den Winter ab, so dass zwischen dem ersten und letzten Auftreten von Eis zumeist ein oder mehrere eisfreie Perioden liegen.
- Die Eisbildung am NOK beginnt ab Mitte Dezember, überwiegend jedoch erst im Lauf des Januars, und dauert zumeist bis Mitte März an. Innerhalb des betrachteten 82-Jahre-Zeitraums war der 10. Dezember (im Winter 2002/03) der früheste Eisbeginn. Das späteste Ende der Eissaison lag im Winter 1941/42 am 05. April.
- Zwischen den einzelnen Messstationen bzw. Kanalabschnitten gibt es zwar bezogen auf die verschiedenen Parameter Unterschiede in den Wintern, allerdings ist diese Variation eher schwach ausgeprägt. Dies zeigen auch die Darstellungen im Längsschnitt (siehe Abbildung 2-20), bei denen die Unterschiede zwischen den einzelnen Wintern deutlich stärker ausgeprägt sind als die jeweiligen Unterschiede entlang des Kanals.
- In einzelnen Wintern ist erkennbar, dass die Kanalränder / -zufahrten etwas stärker durch Eis betroffen waren als die freie Kanalstrecke (Kanalzufahrt Brunsbüttel tendenziell leicht stärker beeinträchtigt als der Bereich Holtenau). Systematische Gradienten entlang des Kanals sind über den gesamten Zeitraum allerdings nicht auszumachen.

– Ein Einfluss der Eisvorkommen auf die kommerzielle Schifffahrt ist vorhanden, aber insgesamt als moderat einzustufen. Die gängigen Meldungen zu den verkehrlichen Einschränkungen reichen bis zum Baltic Sea Ice Code 3 (Navigation ohne Hilfe von Eisbrecher nur für leistungsstarke, stabil konstruierte Schiffe, welche für Eisnavigation geeignet sind, möglich; siehe BSIS, 2025). Darüberhinausgehende Einschränkungen waren bis dato selten und zeitlich auf wenige Tage begrenzt. Eine eisbedingte Einstellung der Schifffahrt wurde bisher lediglich an der Station Brunsbüttel Elbe im Winter 1939/1940 für einen Tag gemeldet.

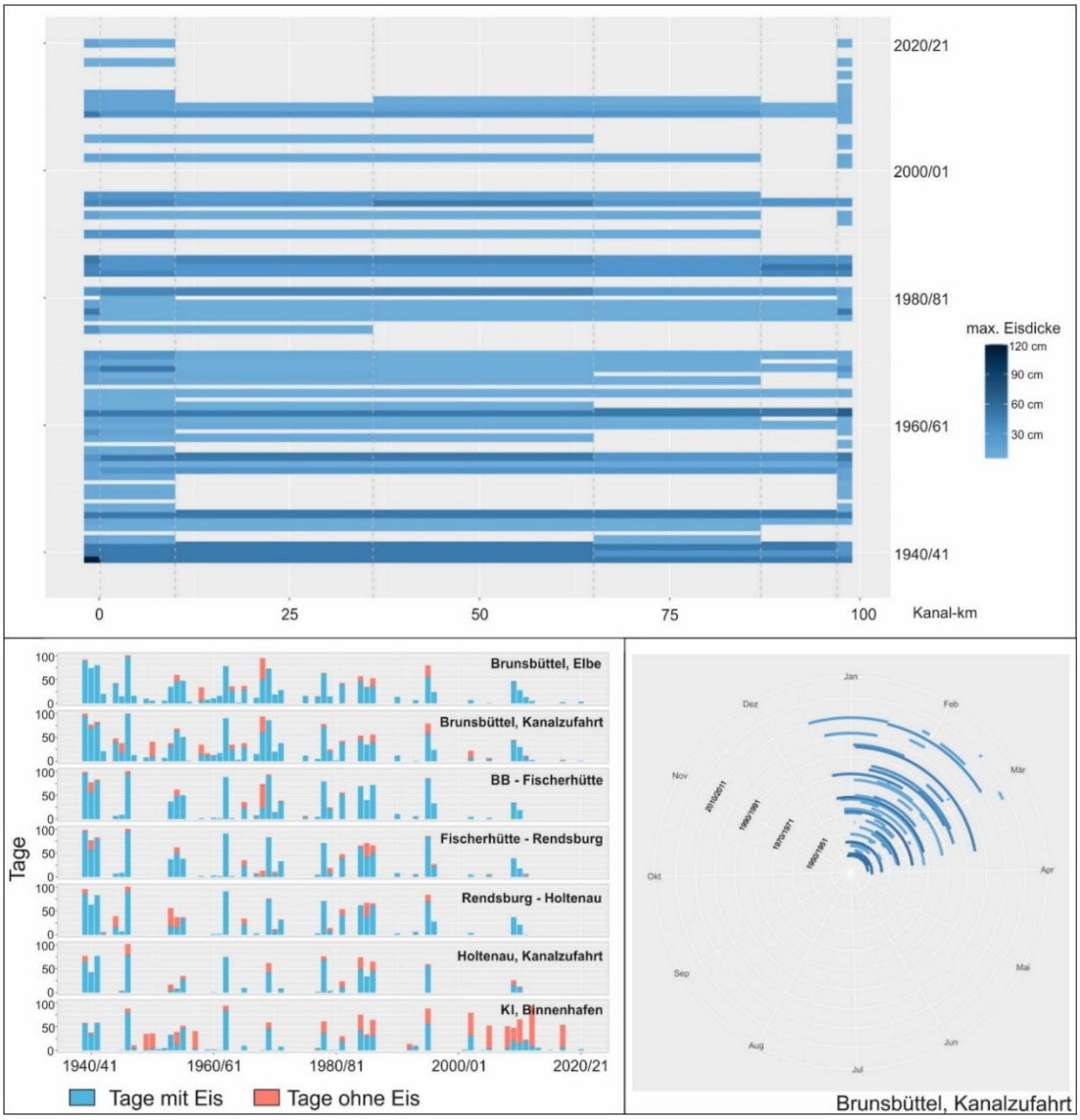


Abbildung 2-21: Beispiele für die grafische Aufbereitung der Daten zum Eisvorkommen am NOK (oben: Längsschnitte der maximalen Eisdicken; unten links: Zeitreihen der Saisonlänge und der Tage mit Eis je Station; unten rechts: datumsbezogene Dauern der Eissaisons mit Darstellung der maximalen Eisdicke am Beispiel der Station Brunsbüttel).

Über die vergangenen Jahrzehnte betrachtet zeigen alle erfassten Parameter zur Eisbeeinflussung am NOK eine ähnliche Tendenz. Diese ist in Abbildung 2-22 anhand der Zahl der Eistage je Wintersaison für sämtliche Stationen als gleitendes 30-jähriges Mittel dargestellt. Anhand der Darstellung wird erkennbar, dass die Anzahl an Eistagen über die letzten Jahrzehnte deutlich abgenommen hat. Dabei zeigen die westlich gelegenen Stationen zu Beginn der Aufzeichnung eine eher größere Anzahl

an Eistagen als die östlichen Stationen, was sich über die Jahre / Jahrzehnte jedoch angeglichen hat. In der jüngeren Vergangenheit sind nur geringe Unterschiede zwischen den Stationen entlang des Kanals zu verzeichnen.

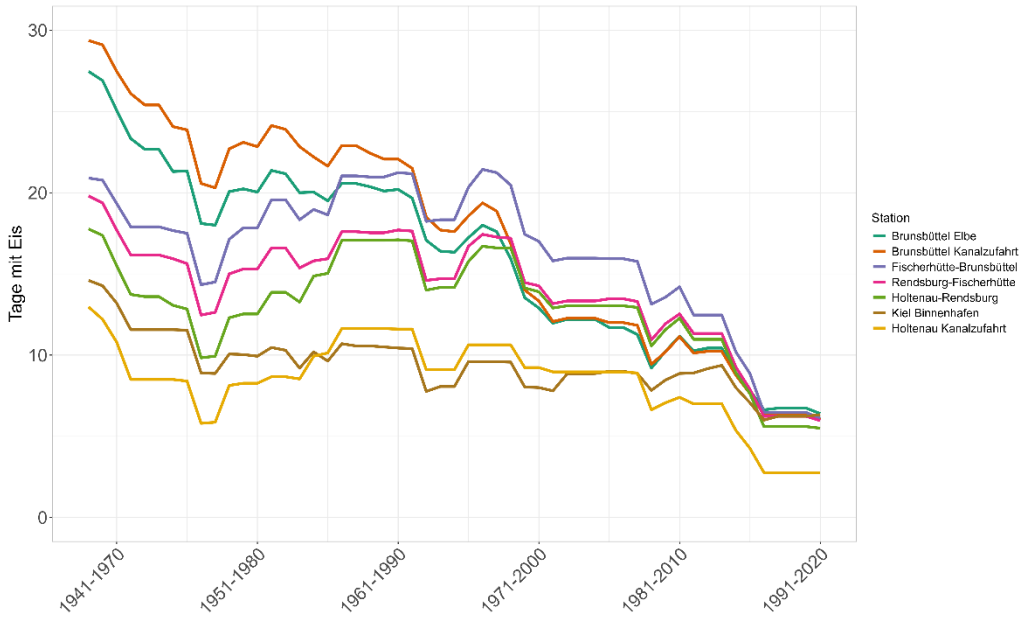


Abbildung 2-22: Anzahl der Tage mit Eis als gleitendes 30-jähriges Mittel, dargestellt für alle Stationen entlang des NOK.

Die für die Jahre bzw. Wintersaisons aggregiert vorliegenden Eisdaten lassen keinen unmittelbaren Zusammenhang zum Salzgehalt erkennen (weder an einem Abschnitt / einer Station über die Zeit noch im Längsverlauf des Kanals). Auch wenn höhere Salzgehalte grundsätzlich zu einer verminderten / verzögerten Eisbildung führen, so scheint dieser Effekt, genau wie weitere Einflüsse (Wind, Strömung, Wasserstandsschwankungen), auf der betrachteten räumlichen (Kanalabschnitte) und zeitlichen (Jahre) Skala am NOK von untergeordneter Bedeutung zu sein. Die winterlichen Temperaturverhältnisse sind der dominierende Einflussfaktor und eignen sich daher zur Abschätzung möglicher zukünftiger Eisentwicklungen (siehe auch Kunkel et al., 2025).

2.8.3 **Zukünftige Entwicklung. Analyse von Klimaprojektionen**

Um die Entwicklung des Eisvorkommens in der Zukunft abzuschätzen, wurde analog zur Vergangenheit auch für die betrachteten Klimaszenarien eine Bestimmung der Winterkältesummen (zwischen November und März) vorgenommen. Anhand der für die Historie bestimmten Kältesummen – Kategorien wurden die projizierten Daten in einem zweiten Schritt klassifiziert, wobei die originären Kategorien „Eisbildung möglich“ und „Eisbildung sicher“ zusammengefasst wurden. Dies bedeutet, dass in den Projektionen ein möglicher Eiswinter klassifiziert wird, sobald die untere Grenze der Kategorie 1 „Eisbildung möglich“ überschritten ist. Mit dieser Festlegung soll vermieden werden, dass die Zahl eisfreier Winter zu sehr auf der “sicheren Seite“ liegt und somit überschätzt würde. Abbildung 2-23 zeigt die mögliche Entwicklung der Eiswinter bzw. der Eistage für das Klimaszenario RCP 8.5 (geringer Erfolg von Klimaschutzmaßnahmen). Gezeigt wird jeweils der gleitende Median (50. Perzentil) über einen 30-jährigen Zeitraum. Die Einfärbung des Bandes stellt die Verteilung der 16 Ensemblemitglieder dar. Diese Bandbreite ist damit auch eine Maß für die unvermeidliche Unschärfe der Aussage auf Grund der Variationen der Klimaprojektionen. Trotz aller Unschärfen wird in Abbildung 2-23 klar ersichtlich, dass bei dem gewählten Emisionsszenario RCP 8.5 das Eisvorkommen in den nächsten Jahrzehnten signifikant weiter abnehmen und der NOK im Winter weitgehend eisfrei bleiben könnte.

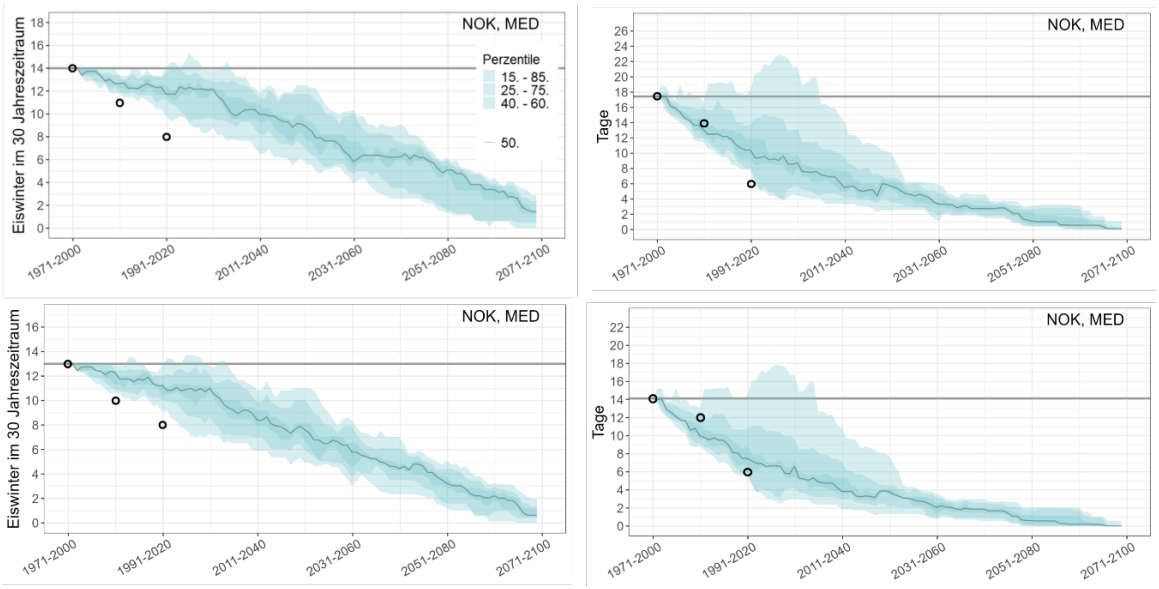


Abbildung 2-23: Anzahl der Eiswinter im 30 Jahreszeitraum (links) und Anzahl an Eistagen (rechts) für Fischerhütte – Brunsbüttel (oben), Holtenau – Rendsburg (unten) für das Emissionsszenario RCP 8.5. Die im Referenzzeitraum gemessenen Eisvorkommen sind mit schwarzen Kreisen markiert.

Vergleicht man die Klimaszenarien für RCP 8.5, RCP 4.5 und RCP 2.6 untereinander, wie dies in Abbildung 2-24 für den NOK-Abschnitt Brunsbüttel – Fischerhütte dargestellt ist, so wird deutlich, wie sich mögliche Klimaschutzmaßnahmen auf das Eisvorkommen am NOK auswirken können.

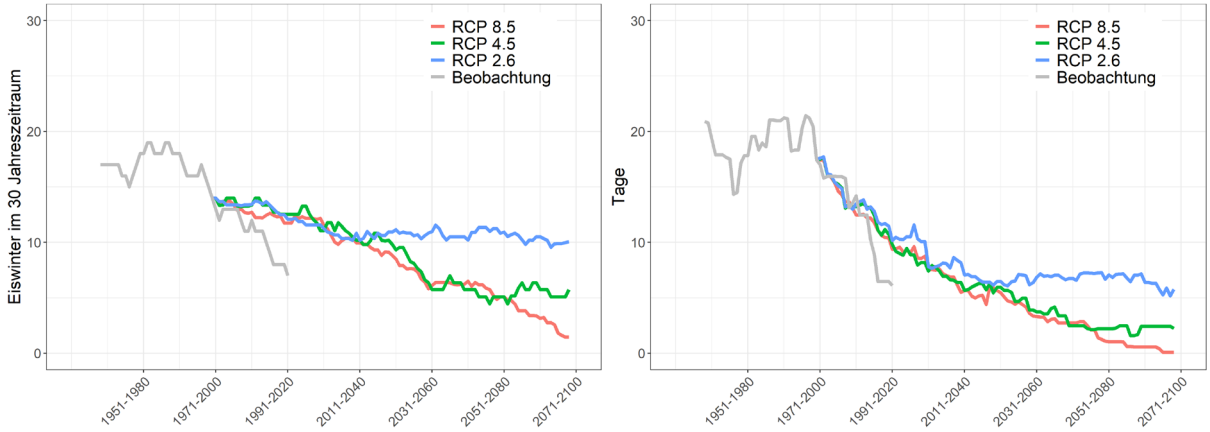


Abbildung 2-24: Abschnitt Fischerhütte – Brunsbüttel: Vergleich der 30-jährigen Mediane der RCPs mit dem 30-jährigen Mittel der Beobachtung für Anzahl der Eiswinter (links) sowie Anzahl der Eistage (rechts).

Verlaufen zunächst die Mediane aller Klimaszenarien sehr ähnlich, so divergieren die Werte ab der Zeitscheibe 2011-2040 deutlicher. Für das RCP 2.6 (Median) stellt sich als erstes eine Art Gleichgewicht ein, für RCP 4.5 (mäßiger Erfolg im Klimaschutz) fällt der Median der Anzahl der Eiswinter zunächst noch weiter ab und eine Stagnation tritt deutlich später (ca. 2051-2080) ein. Für RCP 8.5 (Median) sinkt die Anzahl der Eiswinter bis zum Ende des Jahrhunderts, wo Eisvorkommen sogar weitgehend ausbleiben könnten.

Der Verlauf der Klimaprojektionen ist für die letzten Jahrzehnte generell im Einklang mit den Beobachtungen, da sich in beiden Fällen eine Abnahme an Eiswintern abzeichnet. Dabei fällt in den Beobachtungen der Rückgang der Eiswinter noch etwas deutlicher aus als er sich in den Klimaprojektionen abzeichnet (siehe auch schwarze Kreise in Abbildung 2-23). Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass das für die Klimaprojektionen ermittelte Eisvorkommen mithilfe des recht groben Kältesummen-Ansatzes ermittelt wurden. Hinzukommt, dass in den Auswertungen den Eiswintern auch die Kategorie „Eisbildung möglich“ zugerechnet wurde, was zu einer Überschätzung der Eiswinter führen kann. Die dargestellten Ergebnisse der Klimaprojektionen sind insgesamt im Sinne einer Abschätzung möglicher zukünftiger Entwicklung der Eisvorkommen am NOK zu sehen. Trotz aller Unschärfen zeichnet sich jedoch ab, dass schifffahrtsbehindernde Eiserscheinungen im Zuge des Klimawandels seltener zu erwarten sein werden. Dies schließt jedoch auch zukünftig einzelne, markante Eiswinter am NOK nicht aus.

2.8.4 **Fazit**

Die digital verfügbaren Eis-Beobachtungsdaten für den NOK (seit dem Winter 1939/40) wurden aufbereitet und umfangreich ausgewertet, wodurch ein systematischer Über- und Einblick in den Aspekt der Eisvorkommen für den Kanal sowie die dortigen eisbedingten Schifffahrtsbeeinträchtigung ermöglicht wird. Durch die vergleichende Analyse der meteorologischen Verhältnisse konnte zudem ein bestehender Ansatz zur Abschätzung klimawandelbedingter Veränderungen auf die Eisvorkommen übertragen und angewendet werden. Bereits in der Rückschau ist eine erkennbare Abnahme der Eintrittshäufigkeit und Intensität von Eiswintern am NOK nachweisbar. Die betrachteten Klimaprojektionen zeigen in Abhängigkeit vom betrachteten Emissionsszenario die Möglichkeit einer mehr oder weniger markanten Fortsetzung der rückläufigen Eisbeeinträchtigung für den NOK. Daraus lässt sich schließen, dass auch schifffahrtsbehindernde Eiserscheinungen im Zuge des Klimawandels zukünftig eher seltener als bisher zu erwarten sein werden. Damit kann die Schifffahrt – in Bezug auf Beeinträchtigungen durch Eisbildung – vom Klimawandel profitieren. Aber auch zukünftig ist, wenn möglicherweise auch seltener, mit markanten Eiswintern am NOK zu rechnen.

Die vollständigen Analyseergebnisse zum Eisvorkommen am NOK sind in dem BfG-Bericht 2223 dokumentiert (Kunkel et al., 2025).

2.8.5 **Literatur**

BfG (2021): WS-Klimaportal. [Online] 2021. [Abgerufen am 20.10.2025] Online verfügbar unter https://ws-klimaportal.bafg.de/#Hintergrund.

BSH (2018a): [Online] 2018. [Abgerufen am 20.10.2025] Online verfügbar unter https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Meeresumwelt/Eis/eis_node.html.

BSH. (2018b): [Online] 2018. [Abgerufen am 20.10.2025] Online verfügbar unter https://www2.bsh.de/aktdat/eisdienst/Statistik/IceStat.html.

BSIS. (2025): Baltic Sea Ice Service. [Online] 2025. [Abgerufen am 20.10.2025] Online verfügbar unter https://www.bsis-ice.de/material/schluessel.pdf.

Hatz, M., Maurer, T. (2014): Prozessstudien über die Eisbildung auf Wasserstraßen und mögliche klimabedingte Änderungen. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.05. KLIWAS-47/2014. BfG, Koblenz. DOI: 10.5675/Kliwas_47/2014_4.05, URL: http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_47_2014_4.05.pdf

Kunkel, A., Meißner, D., Fleischer, C. (2025): Analyse historischer und Projektion möglicher zukünftiger Eisvorkommen am Nord-Ostsee-Kanal. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz. BfG-2223, DOI: 10.5675/BfG-2223.

Rauthe, M., Steiner, H., Riediger, U., Mazurkiewicz, A., Gratzki, A., 2013. A Central European precipitation climatology - Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). Meteorologische Zeitschrift, 22(3): 235-256. DOI:10.1127/0941-2948/2013/0436.

Razafimaharo, C., Krähenmann, S., Höpp, S., Rauthe, M., Deutschländer, T., 2020: New high-resolution gridded dataset of daily mean, minimum, and maximum temperature and relative humidity for Central Europe (HYRAS). Theor Appl Climatol 142, 1531–1553 (2020). https://doi.org/10.1007/s00704-020-03388-w

Schmelzer, N., Holfort, J., Sztobryn, M., Przygrodzki, P., 2012. Climatological Ice Atlas for the western and southern Baltic Sea (1961–2010). BSH Nr. 2338; ISBN: 978-3-86987-278-0.

Schmelzer, N., Holfort, J., Loewe, P., 2015. Klimatologischer Eisatlas für die Deutsche Bucht (mit Limfjord) (1961–2010). BSH.Nr.2339, ISBN-Nr. 978-3-86987-660-3.

Van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J. F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., Rose, S. K. (2011): The representative concentration pathways: an overview. Climatic Change, 2011. DOI:10.1007/s10584-011-0148-z

3 Operationelle Kurzfrist-Wasserstands-vorhersage

Teilprojektverantwortlichkeit: Dennis Meißner, Dr. Bastian Klein, Barbara Frielingsdorf

Das Ziel ist die projektbezogene Fortschreibung und Optimierung des von der BfG in Projektphase 1 erstellten und sich im Testbetrieb befindlichen Vorhersagesystems für den NOK. Wesentlicher Aspekt dabei ist, dass das Vorhersagesystem und seine Nutzbarkeit weiterhin im engen fachlichen Austausch mit den Arbeiten zur Wasserbewirtschaftung (Arbeitspaket 2) verbessert wird. Dies betrifft in erster Linie die Einbindung der neu erstellten und/oder erweiterten Modellinstrumentarien für die operationelle Kurzfristvorhersage aber auch die Einbindung und Verarbeitung neuer Eingangsdaten, wie z. B. Ensemble-Vorhersagen des Deutschen Wetterdienstes.

Die bis dato im Projekt erfolgten Neuerungen im Vorhersagesystem für den NOK sind im Folgenden aufgeführt und jeweils kurz erläutert:

(1) Einbindung der neu erstellten Wasserhaushaltsmodelle für den NOK
Bis dato war ausschließlich ein Tageswertmodell auf Basis des Modellsystems LARSIM für den NOK verfügbar, um die Zuflüsse aus dem Einzugsgebiet zum Kanal zu simulieren und zu prognostizieren. Nun stehen zusätzlich zwei Stundenwertmodelle, welche im frei verfügbaren Modell-Framework HydPy der BfG implementiert wurden, auch für die Kurzfristvorhersage zur Verfügung. Derzeit laufen alle drei Wasserhaushaltsmodelle jeweils gekoppelt mit dem SOBEK-Kanalmodell parallel, um Erfahrungen im täglichen Betrieb zu sammeln. Ob später ein oder mehrere Wasserhaushaltsmodelle (als Multi-Modell-Ensemble) operationell betrieben werden sollen und können, um beispielsweise die Unsicherheiten, welche aus der hydrologischen Prozessbeschreibung resultieren, besser zu quantifizieren, ist nach der Testphase bis Mitte 2026 zu entscheiden.

(2) Nutzung weiterer lokaler Wettervorhersagen
Neben der bisher im Vorhersagesystem genutzten meteorologischen Vorhersage ICON-EU des Deutschen Wetterdienstes wurde die deterministische Vorhersage ICON-D2 integriert, die räumlich höher aufgelöst ist (ca. 2 km statt ca. 6 km) und einen Vorhersagezeitraum von 48 Stunden besitzt. Damit kann entlang des aktuell 5-tägigen Vorhersagezeitraums in den ersten beiden Tagen die räumlich höher aufgelöste ICON-D2-Vorhersage genutzt werden.

Den technisch-methodisch größeren Schritt stellt die Integration der Ensemble-Variante der ICON-D2 Vorhersage des DWD, bezeichnet als ICON-D2-EPS (EPS = Ensemble Prediction System), dar. Die Ensemble-Vorhersage wird ergänzend zur deterministischen Vorhersage implementiert, um den Nutzenden eine zusätzliche Informationsquelle zu erschließen. Eine Ensemble-Vorhersage besteht aus einer Mehrzahl zum Vorhersagebeginn gleichwahrscheinlichen Einzelvorhersagen, den sog. Ensemble-Membern. Die ICON-D2-EPS Vorhersage besteht aus 20 Membern, die jeweils einen Vorhersagezeitraum von 48 Stunden abdecken. Über die Nutzung von Ensemble-Vorhersagen kann die aus der Wettervorhersage resultierende dynamische Unsicherheit auf die Abflussvorhersage quantitativ abgeschätzt werden. Damit ist auch die Erstellung wahrscheinlichkeitsbasierter Vorhersagen möglich, was, gerade auf kleinräumigeren Skalen, wie dem Einzugsgebiet des NOK, dem Stand der Wissenschaft ent-

spricht. Die Integration der Ensemble-Vorhersage ist technisch bereits vollends realisiert. Abbildung 3-1 zeigt für den aggregierten Zufluss zur Weststrecke des NOK das Ergebnis einer Ensemble-Vorhersage auf Basis der ICON-D2-EPS Vorhersage des DWD. Erkennbar ist die Schwankungsbreite (Unsicherheitsbereich) des prognostizierten Zuflusses insbesondere am zweiten Vorhersagetag. Der operationelle Testbetrieb steht jedoch noch aus, so dass derzeit noch keine Erfahrungen zur Performanz des erweiterten Systems vorliegen.

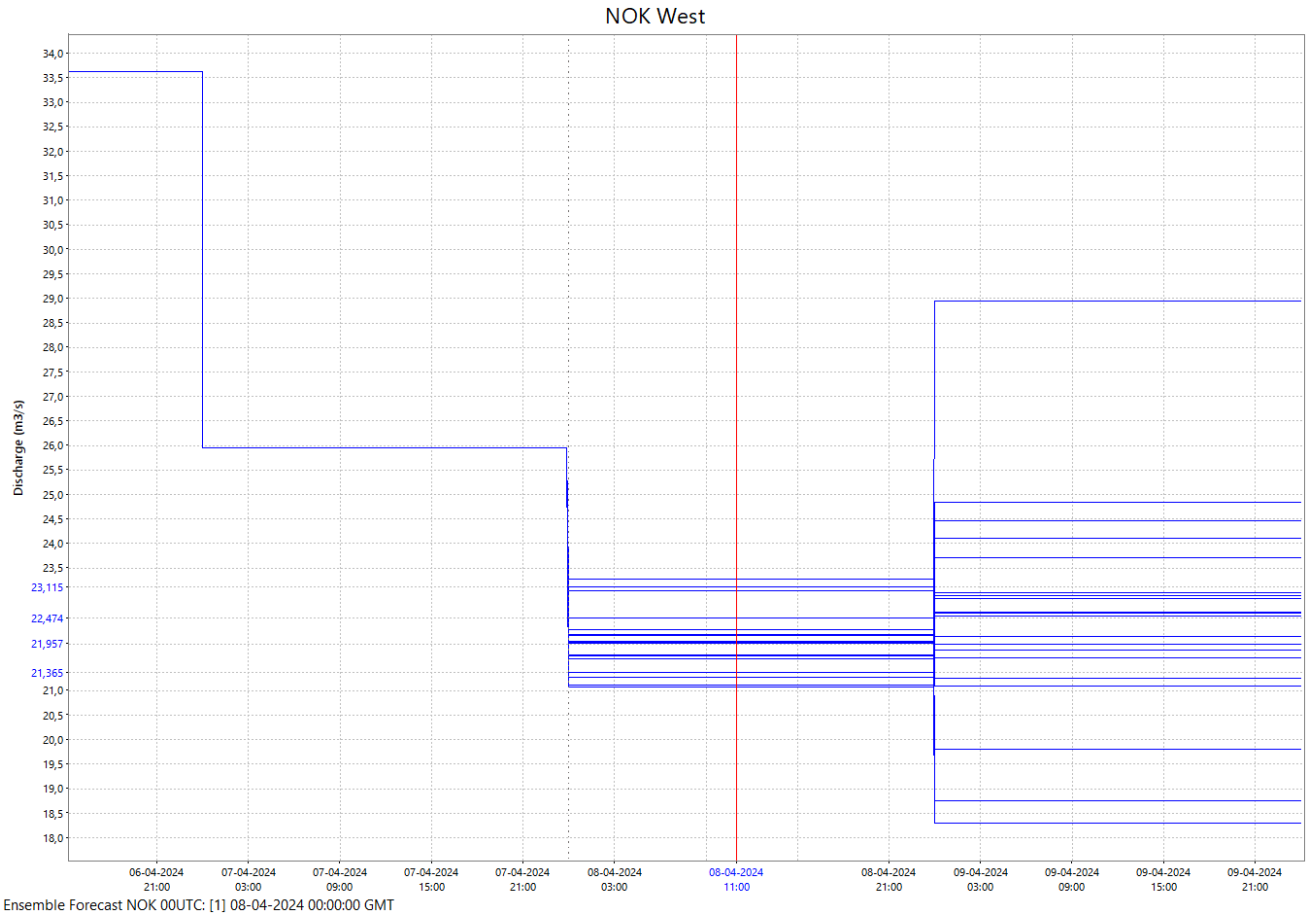


Abbildung 3-1: Beispiel einer Ensemble-Vorhersage für den Zufluss „NOK West“ auf Basis von ICON-D2-EPS.

(3) Nutzung von Schleusenzustands- / Entwässerungsdaten

Weiter andauernd sind die Arbeiten zur operationellen Nutzung der stündlich übermittelten Schleusenzustands- / Entwässerungsdaten im Kanalmodell. Die Einbeziehung dieser Daten in den Vorhersageprozess ist erforderlich, um die real abgelaufenen Entwässerungszyklen bis zum Vorhersagezeitpunkt bestmöglich in den Modellen abzubilden und so den Zustand der realen Wasserstandsverhältnisse im NOK für die Vorhersage zu erfassen. In der Vergangenheit gab es wiederholt Probleme mit der regelmäßigen Datenbereitstellung, so dass auch mögliche Datenausfälle im Vorhersageprozess zu berücksichtigen sind. Abbildung 3-2 zeigt am Beispiel der Wasserstände an den beiden Kanalrändern, dass die automatische Steuerung der Entwässerung im operationellen Kanalmodell generell plausible Ergebnisse liefert, jedoch im Detail noch erkennbare Abweichungen zu den gemessenen Verhältnissen bestehen.

(4) Umstellung FTP auf HTTPS

Die Bereitstellung der PDF-Berichte wurde von FTP auf HTTPS umgestellt, was den Vorteil besitzt, dass nun die Vorhersageberichte wieder unmittelbar über einen Internetbrowser aufgerufen werden können: https://vorhersage.bafg.de/NOK/NOK_Vorhersage.pdf. Hintergrund ist, dass die gängigen Internetbrowser mittlerweile kein FTP-Protokoll mehr unterstützen, so dass zeitweise die Vorhersageberichte des NOK vorab heruntergeladen und mit einem entsprechenden Reader geöffnet werden mussten.

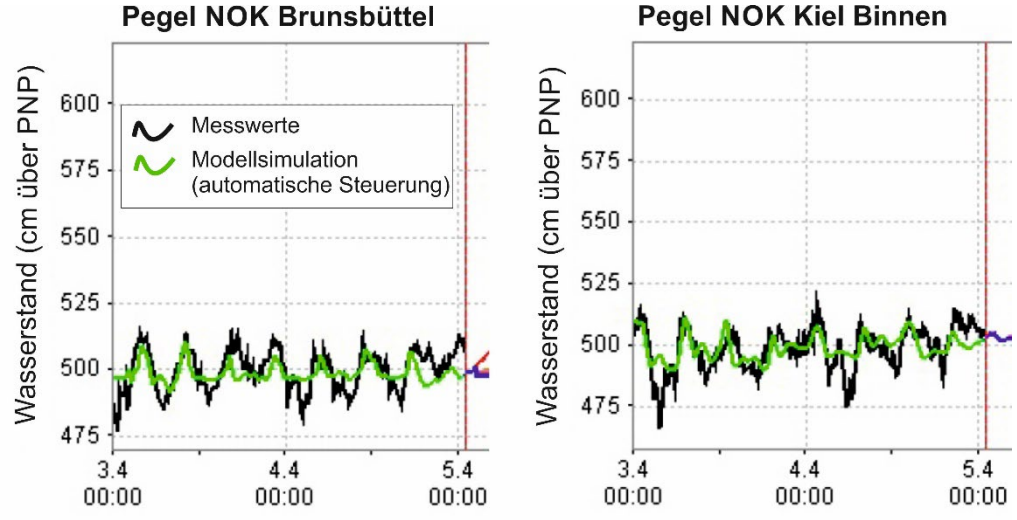


Abbildung 3-2: Gegenüberstellung der gemessenen (schwarz) und simulierten (grün) Wasserstände am Pegel NOK Brunsbüttel (links) und NOK Kiel Binnen (rechts) zwischen dem 03. und 05. April 2024.

(5) Technische Konsolidierung

Das Vorhersagesystem für den NOK wurde in mehrfacher Hinsicht technisch konsolidiert: Die Konfiguration für den NOK wurde vollumfänglich in die zentrale Versionsverwaltung sowie die Test-Routinen der BfG integriert. Dadurch wird zukünftig bei jeder Weiterentwicklung der Vorhersageumgebung sowie Aktualisierungen der Software selbst sichergestellt, dass sämtliche Funktionalitäten für den NOK erhalten bleiben und das System lauffähig ist. Zudem wurde das NOK-System auch auf das Test-/Backup-System, welches als Redundanz außerhalb der BfG läuft, portiert. Auch dieser Schritt steigert die Ausfallsicherheit und Verfügbarkeit des Systems und ist eine der zentralen Voraussetzungen für einen späteren operationellen Betrieb.

Für einen solch operationellen Betrieb steht weiterhin ein zwischen WSV und BfG abgestimmtes Betriebs- und Pflegekonzept aus.

(6) Steigerung der Nutzbarkeit

Am 01. Dezember 2022 fand ein von der GDWS organisierter „Workshop zum Wasserhaushaltsmodell am Nord-Ostsee-Kanal“ als Online-Veranstaltung statt. Darin wurde der aktuelle Stand des Vorhersagesystems vorgestellt, um daraufhin Fragen und Anregungen der ca. 30 Teilnehmenden zu beantworten bzw. für die weiteren Entwicklungsschritte aufzunehmen. So wurde u.a. der Bedarf an Modellausgaben / Vorhersagen auch für Pegel außerhalb des Kanals im Einzugsgebiet erläutert, die Bedeutung nach Abbildung / Prognose von Sunkwellen zur Schleusensteuerung hervorgehoben sowie das Interesse an weiteren Parametern (Salzgehalt, Strömung, allgemeine Güteparameter) bekundet. Zur Unterstützung der allgemeinen Situationseinschätzung wird flankierend zur eigentlichen Vorhersage auch eine Ausgabe von gemessenen Niederschlagssummen und aktuellen Bodenfeuchteverhältnissen sowie den zu erwartenden Niederschlagssummen als sinnvoll erachtet.

Sobald weitere Fortschritte am Vorhersagesystem erfolgt sind, soll eine vergleichbare Veranstaltung wiederholt werden.

(7) Erweiterung zu einem Entscheidungsunterstützungssystem
Motiviert durch Arbeiten, die die BfG für die WSV im Kontext der Unterstützung bei der Talsperrenbewirtschaftung im Wesergebiet leistet, wurde im Rahmen einer Voruntersuchung / Konzeptstudie mit Unterstützung der Fa. KISTERS getestet, ob die für die Planung der Talsperrenabgabe eingesetzte Optimierungs-Methodik (Nutzung der Open-Source Anwendung RTC-Tools) auf den NOK übertragbar ist, um den praktischen Mehrwert des NOK-Vorhersagesystems zu steigern. Zielgröße für den NOK wäre in erster Linie die Unterstützung bei der vorausschauenden Entwässerungsplanung, um z. B. den Einfluss unterschiedlicher Entwässerungsvarianten auf die sich maximal im Kanal einstellenden Wasserstände der nächsten Tage zu vergleichen oder die optimalen Dauern / Zeitpunkte der nächsten Entwässerungsfenster zu planen. Die Ergebnisse des erstellten protypischen Modells zeigen, dass aus modelltechnisch-fachlicher Sicht das Optimierungsmodell auch für den NOK sinnvoll einsetzbar ist (praktikable Rechenzeiten, ausreichend gute Nachbildung der Dynamik im Kanal, Anknüpfung an vorhandene Datenflüsse). Abbildung 3-3 zeigt, wie die Oberfläche eines auf dem bestehenden Vorhersagesystem aufbauenden Entscheidungsunterstützungswerkzeugs für den NOK aussehen könnte. Als technischen Basis des Dashboards wird eine web-basierte, in einem Browser lauffähige Oberfläche vorgeschlagen, die es dem Nutzer erlaubt, möglichst einfach mit dem Optimierungsmodell zu interagieren.

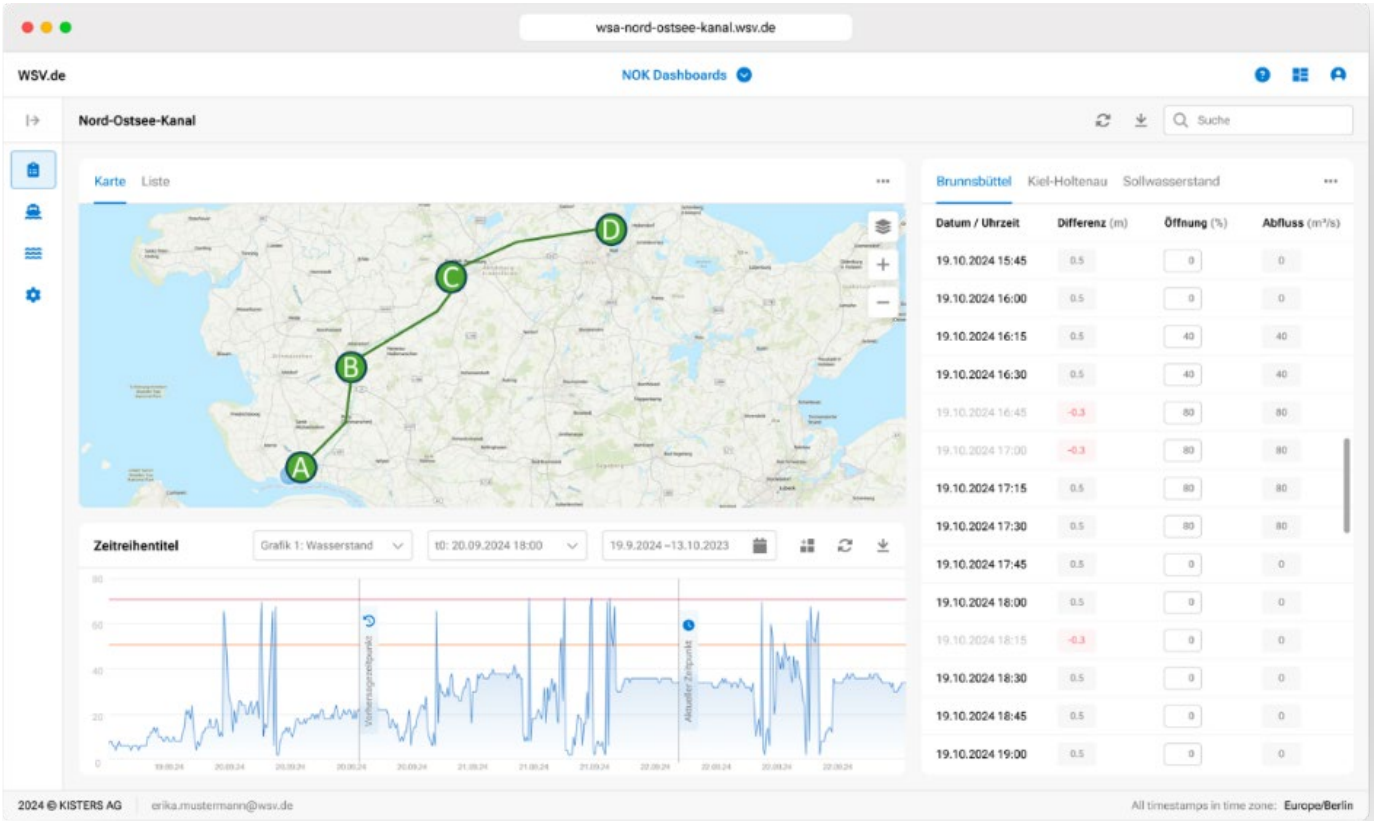


Abbildung 3-3: Prototypische Visualisierung eines web-basierten Dashboards zur operationellen Entscheidungshilfe für den Nord-Ostsee-Kanal, Modus Kartenansicht und tabellarischer Darstellung der Wasserspiegeldifferenzen, prozentualen Öffnung (editierbar) und des Abflusses an der Schleuse Brunsbüttel (Quelle: KISTERS AG).

Die Ergebnisse der Konzeptstudie wurde in zwei Terminen der WSV (07.01.2025 und 27.06.2025) vorgestellt und das Thema soll auf Grund der insgesamt positiven Resonanz weiterverfolgt werden. Wichtiger Aspekt in diesem Zusammenhang ist in der nächsten Phase in jedem Fall der intensive Austausch mit den potentiellen Nutzern (Personal der operativen Kanalentwässerung sowie auch der Gewässerkunde), um iterativ ein praktikables Werkzeug entwickeln zu können (Co-Design-Ansatz).

4 Ausblick

Aufbauend auf den Ergebnissen der hier dokumentierten Projektphase NOK 2: Wasserbewirtschaftung, Gewässerkunde und Ökologie beginnt die dritte Projektphase – im Weiteren Zukunft NOK genannt – mit einer Laufzeit von drei Jahren. Die aus Phase 2 vorliegenden Daten werden fortgeschrieben, die erstellten Modelle werden gepflegt, weiterentwickelt und für verschiedene konkrete Untersuchungen und Planungen der WSV genutzt, die in enger Zusammenarbeit bzw. in Abstimmung mit dem Land Schleswig-Holstein (gefestigt durch eine Kooperationsvereinbarung) durchgeführt werden. Ein Hauptaugenmerk wird die Einrichtung eines Monitorings für Grundwasser und Gewässergüte sein, deren Erfordernis sich auch aus der zweiten Projektphase ableiten lässt. Neben der vertiefenden Fortführung der Arbeiten, werden auch aktuelle, zum Teil neue Themen aufgenommen für die seitens der GDWS Untersuchungsbedarf (wie zum nachhaltigen Sedimentmanagement, zu Wasserentnahmen im Zuge der Unterstützung des Landes Schleswig-Holsteins in der Umsetzung der Wasserstoffstrategie, DIWA-DE, Salzmodellierung).

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Längsschnitt NOK (BfG, verändert nach WSV). Probestelle für Gewässergüte (siehe hierzu Kapitel 2.2) 24

Abbildung 1-2: Einzugsgebiet NOK. 25

Abbildung 1-3: Ereignisse mit kritischen Situationen in der Kanalbewirtschaftung (Wasserstände über 5,40 m PNP an einem oder mehreren Betriebspegeln und / oder einem hohen Gebietszufluss). Die Ereignisse 1 bis 6 wurden in der Masterarbeit von Laura Heusel erarbeitet. Die Auswertung der Ereignisse 7 und 8 waren das Ergebnis der Praktikumsarbeit von Lutz Malte Geilen. 29

Abbildung 1-4: Oben mittlere Lufttemperatur, unten mittlere dreimonatige Summe des Niederschlages; links jeweils Winter mit den Monaten Dezember, Januar, Februar; rechts Sommer mit den Monaten Juni, Juli, August. Datengrundlagen: Klimaatlas Deutschland, DWD, 1991-2020..... 30

Abbildung 1-5: Interannuelle Variabilität über verschiedene Zeiträume für die Klimagrößen Niederschlag (RR, oben), Lufttemperatur (LT, Mitte) und Sonnenscheindauer (SD, unten). Winter (WI) mit den Monaten Dezember, Januar, Februar jeweils linke Abbildung, Sommer (SO) mit den Monaten Juni, Juli, August jeweils rechte Abbildung. 31

Abbildung 1-6: Verteilung von monatlichem (MO) Niederschlag (RR) und Lufttemperatur (LT) an der Station Rendsburg innerhalb eines Jahres. Klimanormalperiode 1961 bis 1990 (links) und 1991 bis 2020 (rechts). Datengrundlage: DWD 32

Abbildung 1-7: Räumliche Verteilung der mittleren jährlichen potenziellen (links) und realen Verdunstung (rechts) in der Klimanormalperiode von 1961 bis 1990. Quelle: Hydrologischer Atlas Deutschland HAD..... 33

Abbildung 1-8: Räumliche Verteilung der Abflusshöhe in mm/a über die Periode von 1961 bis 1990. 33

Abbildung 1-9: Gesamtzufluss zum NOK von 2012 bis 2024 ermittelt über die Wasserhaushaltssimulation auf der Basis von HYRAS-Daten bis 2020 und anschließend unter Nutzung von Metstat für den meteorologischen Input (Modell: HydPyL-NOK, Tag). Ergänzend ist eine Zuflussregionalisierung anhand von beobachteten Abflusspegeldaten auf Tages- und Stundenwertbasis dargestellt (REG Qzu Tag bzw. REG Qzu Std)..... 41

Abbildung 1-10: Gesamtzufluss zum NOK von 2012 bis 2024 ermittelt über die Wasserhaushaltssimulation mit HydPy-L-NOK (Tag). 42

Abbildung 1-11: Simulation der Wasserstände im Kanal mit HydPy-NOK für 3 Ereignisse, an denen die Längsschifffahrt eingestellt werden musste Quelle: Heusel, L. (2023) und Gielen, Lutz.. 45

Abbildung 1-12: Gesamtensemble der mittleren Binnenzuflüsse (MQ) zum NOK, simuliert mit dem Wasserhaushaltsmodell HydPy-L-NOK bis Ende des 21. Jahrhunderts. Die hervorgehobene Zuflussganglinie aus der Klimasimulation RCP85_EUR-11_MPI-ESM-LR_rcp85_r1i1p1_REMO2009-HBM ist die Randbedingung für das Kanalmodell BEWASYS NOK. Die obere Darstellung zeigt die

absoluten Werte und die untere die prozentualen Abweichungen von der Referenz (1971-2000) im 30 Jahres Rhythmus. 49

Abbildung 1-13: Gesamtensemble der mittleren Niedrigwasserzuflüsse (MNQ) zum NOK, simuliert mit dem Wasserhaushaltsmodell HydPy-L-NOK bis Ende des 21. Jahrhunderts. Die hervorgehobene Zuflussganglinie aus der Klimasimulation RCP85_EUR-11_MPI-ESM-LR_rcp85_r1i1p1_REMO2009-HBM ist die Randbedingung für das Kanalmodell BEWASYS NOK. Die obere Darstellung zeigt die absoluten Werte und die untere die prozentualen Abweichungen von der Referenz (1971-2000) im 30 Jahres Rhythmus. ... 50

Abbildung 1-14: Gesamtensemble der mittleren Hochwasserzuflüsse (MHQ) zum NOK, simuliert mit dem Wasserhaushaltsmodell HydPy-L-NOK bis Ende des 21. Jahrhunderts. Die hervorgehobene Zuflussganglinie aus der Klimasimulation RCP85_EUR-11_MPI-ESM-LR_rcp85_r1i1p1_REMO2009-HBM ist die Randbedingung für das Kanalmodell BEWASYS NOK. Die obere Darstellung zeigt die absoluten Werte und die untere die prozentualen Abweichungen von der Referenz (1971-2000) im 30 Jahre Rhythmus. 51

Abbildung 1-15: Projektionen der Anzahl Tage pro Jahr mit Überschreitung des kritischen Wasserstands von 5,40 m PNP im NOK. Szenarien mit veränderter Binnenhydrologie des NOK und klimawandelbedingtem Anstieg der Außenwasserstände.. Status Quo: keine Pumpe. 52

Abbildung 1-16: Mittlere Anzahl der Tage im Jahr, an denen der kritische Wasserstand von 5,40 m PNP im NOK überschritten wird. Status Quo: keine Pumpe. Nahe Zukunft = 1,7 Tage, Ferne Zukunft = 31 Tage. 53

Abbildung 1-17: Projektionen der Anzahl Tage pro Jahr mit Überschreitung des kritischen Wasserstands von 5,40 m PNP im NOK unter Berücksichtigung eines Pumpbetriebs als zusätzliche Entwässerungsoption. Szenarien mit veränderter Binnenhydrologie des NOK, klimawandelbedingtem Anstieg der Außenwasserstände und unterschiedlichen Pumpkapazitäten. 54

Abbildung 1-18: Mittlere Anzahl der Tage im Jahr, an denen der kritische Wasserstand von 5,40 m PNP im NOK überschritten wird. Szenarien mit unterschiedlichen Pumpkapazitäten...... 55

Abbildung 2-1: *Veränderungen der Salzgehalte in der Kieler Förde seit 1866. Dargestellt als Jahresmittelwerte (blau), sowie der höchste (grün) und niedrigste (rot) monatliche Mittelwert eines Jahres.* 64

Abbildung 2-2: *Veränderungen der Salzgehalte in der Elbe bei Brunsbüttel seit etwa 1970*. 64

Abbildung 2-3: Boxplots des Salzgehaltes entlang des NOK gegliedert in sechs Zeitabschnitte. Da die Messungen der einzelnen Messkampagnen nicht immer am gleichen Ort durchgeführt wurden, wurden die Daten zur besseren Vergleichbarkeit in 10 km Blöcke zusammengefasst. Die Punkte sind die Werte der einzelnen Messungen, bzw. für die hochfrequenten daten ab 2021 monatliche Mittelwerte. 66

Abbildung 2-4: Minütliche Daten des Salzgehaltes an den Pegeln Breiholz, Dükerswisch, Rendsburg und Königsförde. 67

Abbildung 2-5: Zeitreihe des Abflusses am Pegel Hammer an der Eider (oben), des Wasserstandes im NOK (mitte) und Salzgehalt an den Pegeln Breiholz, Dükerswisch, Rendsburg und Königsförde (unten) für die Monate Januar bis April 2022 (links) und Dezember 2022 bis Ende Januar 2023 (rechts)..... 68

Abbildung 2-6: *Darstellung von 30-Minuten-Werten von Salzgehalt (x-Achse), Wassertemperatur (y-Achse) und Sauerstoffgehalt (Farbcodierung) berechnet aus 10-Minuten-Werten in 1 m Wassertiefe an der Messstelle Große Schleuse Kiel-Holtenau Binnen- und Förde-seitig im Messzeitraum 20.03.2024 bis 15.10.2024 (Daten von BfG).*..... 72

Abbildung 2-7: Salzverteilung entlang des Kanals gemäß Gocke et al. (2008) und Ergebnis der Modellierung für jeweils gleiche Zeitpunkte in 2006/2007 (siehe auch Kapitel 2.1). 79

Abbildung 2-8: Zeitliche Verläufe während der Monate Januar bis März 2007 von Windgeschwindigkeit und Windrichtung (oben, 0° bedeutet Wind aus West) und die aus dem Windeinfluss resultierende Erhöhung (rot) bzw. Verringerung (blau) der mittleren Salzgehalte entlang des NOK (unten)..... 80

Abbildung 2-9: Salzgehalte entlang des NOK für jeweils die Monate Januar der Jahre 2007, 2012 und 2024. Dargestellte sind die zeitlichen Mittelwerte (dickere Linien) sowie die jeweiligen Bandbreiten der Salzgehalte entlang der Kanalstrecke..... 80

Abbildung 2-10: Änderung der Salzgehalte entlang des NOK für jeweils die Monate Januar der Jahre 2007, 2012 und 2024 entlang der Kanalstrecke infolge des Ausbaus der Oststrecke (orangene Linien) sowie summarische Wirkung von Ausbaus der Oststrecke und Vertiefung (grüne Linien). 81

Abbildung 2-11: zeitliche Verläufe der Kanalwasserstände in einem Szenario mit 1 m höherem Meeresspiegel (oberes Diagramm) und mittlere Salzgehalte entlang des NOK (unteres Diagramm)..... 82

Abbildung 2-12: Längsschnitte der Salzgehalte entlang des NOK für den Istzustand (blaue Linien, den Zustand nach Verbreiterung (orangene Linien) und den Zustand nach Verbreiterung und Vertiefung (grüne Linien) jeweils für den aktuellen Meeresspiegel (gestrichelt) sowie für einen um 1 m höheren Meeresspiegel (durchgezogen). 82

Abbildung 2-13: Selektion der Messstellen entlang des NOK (Abstand max. 3 km) sowie Einschätzung der Wahrscheinlichkeit einer hydraulischen Verbindung zwischen NOK und GWM für die GWM mit > 10% Wasserstands-Tageswerten < 1mNHN liegen (aus HYDOR 2024; weitere Erläuterungen s. dort)..... 84

Abbildung 2-14: Grundwasserganglinie und Leitfähigkeit der GWM 06/1 an der Oststrecke des NOK im Hügelland; in grau hinterlegt: der für die Aufrechterhaltung des Schiffsverkehrs im NOK erforderliche Soll-Pegelstand; zwischen Juni bis August 2023 wird das Grundwasser im Kontext mit dem Ausbau der Oststrecke des NOK auf unter -1,5 m NHN abgesenkt und der Gradient ist vom NOK in Richtung Grundwasser gerichtet. 86

Abbildung 2-15: Synopse der Wahrscheinlichkeit der Ausbreitung von Salz aus dem NOK in die Umwelt..... 88

Abbildung 2-16: MZB-Arten, die geringere Salzgehalte bevorzugen: links: Zebramuschel (Dreissena polymorpha), ein invasives Neozoon aus der Pontokaspis. Rechts: Kolonie des heimisches Moostierchens Plumatella repens mit einer Donauassel (Jaera sarsi, ebenfalls aus der Pontokaspis) in der Bildmitte. Fotos: Susanne Worischka 91

Abbildung 2-17: Links: Große Pfeffermuschel (Scrobicularia plana), eine heimische Muschelart der Ostsee, die im Ostteil nahe der Schleuse Kiel-Holtenau vorkommt. Rechts: der Keulenpolyp (Cordylophora caspia) Foto: Ian Reach, Copy-right: Joint Nature Conservation Committee (JNCC)..... 91

Abbildung 2-18: Mittlere Fangmengen der von Kafemann (2004) im Frühjahr und Herbst 1995-2001 an den 12 Weichen/Begegnungsstellen des NOK gefangenen Fischarten (Sonstige Arten mit mittleren Fangmengen von jeweils < 1 n/ha: Dreistachliger Stichling, Dorsch, Wittling, Seezunge, Karpfen, Zwergstichling, Güster, Kleine Seenadel, Schwarzgrundel, Finte, Aalmutter, Flussneunauge, Gründling, Aland, Große Maräne, Steinbeißer)..... 95

Abbildung 2-19: Betrachtungsraum für Brutvögel: 34 DTK25 Rasterzellen-Viertel (gelbe Kacheln) à ca. 5,5 x 5,5 km Seitenlänge. In rosa dargestellt: Wiesenvogelkulisse. Rot dargestellt: Vogelschutzgebiete. 105

Abbildung 2-20: Lage der selektierten Stationen mit Eisbeobachtungen im / am NOK vor dem Hintergrund hydrometeorologischer Rasterdaten (5 km x 5 km) und des Polygons zur Rasterdatenselektion..... 110

Abbildung 2-21: Beispiele für die grafische Aufbereitung der Daten zum Eisvorkommen am NOK (oben: Längsschnitte der maximalen Eisdicken; unten links: Zeitreihen der Saisonlänge und der Tage mit Eis je Station; unten rechts: datumsbezogene Dauern der Eissaisons mit Darstellung der maximalen Eisdicke am Beispiel der Station Brunsbüttel). 112

Abbildung 2-22: Anzahl der Tage mit Eis als gleitendes 30-jähriges Mittel, dargestellt für alle Stationen entlang des NOK. 113

Abbildung 2-23: Anzahl der Eiswinter im 30 Jahreszeitraum (links) und Anzahl an Eistagen (rechts) für Fischerhütte – Brunsbüttel (oben), Holtenau – Rendsburg (unten) für das Emissionsszenario RCP 8.5. Die im Referenzzeitraum gemessenen Eisvorkommen sind mit schwarzen Kreisen markiert..... 114

Abbildung 2-24: Abschnitt Fischerhütte – Brunsbüttel: Vergleich der 30-jährigen Mediane der RCPs mit dem 30-jährigen Mittel der Beobachtung für Anzahl der Eiswinter (links) sowie Anzahl der Eistage (rechts)..... 114

Abbildung 3-1: Beispiel einer Ensemble-Vorhersage für den Zufluss „NOK West“ auf Basis von ICON-D2-EPS..... 118

Abbildung 3-2: Gegenüberstellung der gemessenen (schwarz) und simulierten (grün) Wasserstände am Pegel NOK Brunsbüttel (links) und NOK Kiel Binnen (rechts) zwischen dem 03. und 05. April 2024. 119

Abbildung 3-3: Prototypische Visualisierung eines web-basiertes Dashboards zur operationellen Entscheidungshilfe für den Nord-Ostsee-Kanal, Modus Kartenansicht und tabellarischer Darstellung der Wasserspiegeldifferenzen, prozentualen

Öffnung (editierbar) und des Abflusses an der Schleuse Brunsbüttel (Quelle: KISTERS AG). 120

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.2-1: Mittelwert von Salzgehalt, Wassertemperatur und Sauerstoffgehalt der Sondenmessungen in den Tiefen 1 m, 3 m und 8 m entlang des NOK 2021-2023. Markierung der Minima und Maxima anhand von Farbskalen. Daten der BfG. 71

Tabelle 2.2-2: Mittelwert von Gesamt-Stickstoff-, Gesamt-Phosphor- und Chlorophyll a-Gehalt (nasschemisch, nur 1m und 3m) in den Tiefen 1 m, 3 m und 8 m entlang des NOK 2021-2023. Markierung der Minima und Maxima anhand von Farbskalen. Daten der BfG..... 73

Tabelle 2.2-3: Anteil der verschiedenen Algengruppen am Biovolumen des Phytoplanktons in 1 m Tiefe entlang des NOK 2021-2023. Markierung der Minima und Maxima anhand von Farbskalen. Daten der BfG..... 74

Tabelle 2.2-4: Frischgewicht des Zooplanktons und Anteil der verschiedenen Gruppen am Frischgewicht des Zooplanktons in 1 m Tiefe entlang des NOK 2021-2023. Markierung der Minima und Maxima anhand von Farbskalen. Daten der BfG. 75

Tabelle 2.4-1: Hintergrundwerte (Obergrenzen) im Grundwasser im Einzugsgebiet des Nord-Ostsee-Kanals (Quelle: BGR 2024)..... 85

Tabelle 2.6-1: Vorkommensschwerpunkte der im NOK von Kafemann (2004) erfassten Arten (plus neu eingewanderter Schwarzmundgrundel) in verschiedenen Salzgehaltszonen n. Untersuchungsergebnissen aus dem NOK (gem. Kafemann 2004) und Literaturrecherche (Anhang 1) (X = Adulte und Juvenile; R = Reproduktion (Eier, Larven) - sofern Informationen zur bevorzugten Spannbreite an Salzgehalten vorlagen; (X)(R) = nur für Brackwasserherkünfte belegt; Gilde, d. h. Artengruppe mit ähnlichen Ansprüchen an den Salzgehalt n. BioConsult 2006 bzw. eigener Einschätzung für die Schwarzmundgrundel, Reihung der Arten innerhalb jeder Gilde in abnehmender Häufigkeit). 96

Tabelle 2.7-1: Ausgewählte Liste der nachgewiesenen Brutvogelarten während des bundesweiten Projektes ADEBAR von 2005 bis 2009. Angegeben sind die Einstufung nach Vogelschutzrichtlinie (Anh. I: gelistet in Anhang I, Art. 4(2): Zugvogelart/Zielart, sonst. Zugvogel: 4(2) sonstige gefährdete Zugvogelart), Schutzstatus nach BNatSchG (§: besonders geschützt, §§: streng geschützt, §§§: streng geschützt nach EG-Artenschutzverordnung), die Anzahl der Raster mit Nachweisen im Untersuchungsgebiet mit dem prozentualen Anteil im Vergleich zur Gesamtanzahl der untersuchten Raster (Rasterfrequenz). 106

Anhang

Anhang 1: Fischarten des NOK an 12 Probestrecken im Frühjahr und Herbst der Jahre 1995 bis 2001 (n. Kafemann 2004; plus Schwarzmundgrundel als neu eingeschleppte Art) in Reihenfolge abnehmender Gesamtdichte mit Angaben zur Spanne der an den Nachweisstellen gemessenen Salzgehalte (nähere Erläuterungen: s. Tabellenende)

Art - Gilde	Saison	Dichte n/ha	Präsenz %	Salinität NOK Min.	Salinität NOK Max.	Anmerkungen
Sandgrundel - ästuarin	Frühjahr	35,28	67,9	1,2	13,3	ästuarin (BioConsult 2006); kaum Vordringen bis ins Süßwasser (< 0,5 PSU)(Thiel & Thiel 2015); Laichen unter Muschelschalen, maximum egg survival at 15-35 PSU (Dolbeth et al. 2007); Reproduktion in mesohalinen (5-<18 PSU) Kanalabschnitten und/oder Eintrag/Einwanderung von Larven/Jungfischen aus Nord- und/oder Ostsee
	Herbst	483,7	86,9	1,6	14,2	
	Frühj.+Herbst	259,49	77,4	1,2	14,2	
Hering - marin-juvenil	Frühjahr	121,34	50,0	1,3	13,3	mindestens 5 ‰ Salzgehalt für Reproduktion im NOK erforderlich (Brandhorst (1956); hoher Reproduktionserfolg des NOK-Bestandes bei 7 PSU vs. 20 PSU und 28 PSU (Poirier 2015); bei Teilbeständen des Westlichen Frühjahrslaichers des Herings der Ostsee viele lokale Anpassungen an Salzgehalte verschiedener Reproduktionsorte (Poirier 2015); i. d. R. Ein-/Auswanderung aus Ostsee
	Herbst	171,03	38,1	3,8	14,2	
	Frühj.+Herbst	146,18	44,0	1,3	14,2	
Strandgrundel - ästuarin	Frühjahr	5,76	25,0	1,0	7,0	besiedelt im Gegensatz zur Sandgrundel auch reines Süßwasser, zum Laichen sind jedoch mind. 5‰ erforderlich, laicht an der Unterseite von Muschelschalen und anderem Hartsubstrat (Miller 2004); Reproduktion in mesohalinen (5-<18 PSU) Kanalabschnitten und/oder Eintrag/Einwanderung von Larven/Jungfischen aus Nord- und/oder Ostsee
	Herbst	249,73	52,4	1,6	11,8	
	Frühj.+Herbst	127,74	38,7	1,0	11,8	
Stint - diadrom/ ästuarin	Frühjahr	31,59	69,0	1,0	10,6	Massenfisch in der Tideelbe, wo alle Salzgehalte bis hin zu reinen Süßwasser toleriert werden, saisonale Wanderungen mit Laichplätzen in der limnischen Tideelbe (z. B. Lillelund 1961); vermutlich Einwanderung in NOK über Schleusen Brunsbüttel und keine Reproduktion im NOK selbst
	Herbst	113,07	71,4	1,6	13,7	
	Frühj.+Herbst	72,33	70,2	1,0	13,7	
Zander - limnisch	Frühjahr	22,66	72,6	1,0	9,7	aufgrund effektiver osmoregulatorischer Fähigkeiten werden für einen Süßwasserfisch sehr hohe Salzgehalte toleriert, nach experimentellen Untersuchungen z. B. 16 PSU nach abruptem Umsetzen aus Süßwasser und 29-33 PSU bei graduellem und vorübergehenden Salzgehaltsanstieg (Brown et al. 2005); Eier und Larven benötigen hingegen weniger als 5 PSU für eine erfolgreiche Entwicklung (Lehtonen et al. 1996), so dass sich die NOK-Bestände nur im westlichen Kanalabschnitt und Zuflüssen reproduzieren und/oder auf Zuwanderung von Jungfischen aus der Tideelbe angewiesen sind
	Herbst	27,51	67,9	1,6	13,0	
	Frühj.+Herbst	25,08	70,2	1,0	13,0	

Art - Gilde	Saison	Dichte n/ha	Präsenz %	Salinität NOK Min.	 Max.	Anmerkungen
Brassen - limnisch	Frühjahr	14,98	66,7	1,0	9,2	in Teilen des Verbreitungsgebietes bei Salzgehalten bis knapp über 10 ‰; Eibefruchtung und Entwicklung i. d. R. bei weniger als 5 ‰ (Backiel & Zawisza 1968), besser weniger als 3 ‰ (Schöfer 1979); dementsprechend fanden Kafemann et al (1998) kleine Jungfische (0+) fast ausschließlich im westlichen Kanalabschnitt bei Salzgehalten um 4 ‰ und im Zufluss Haaler Au bei weniger als 1 ‰ (sowie auch in der Schirnaumündung), während ältere Brassen relativ gleichmäßig im gesamten NOK bis hin zu Salzgehalten über 10 ‰ gefangen wurden
	Herbst	8,68	64,3	1,6	11,0	
	Frühj.+Herbst	11,83	65,5	1,0	11,0	
Glasgrundel - ästuarin	Frühjahr	16,34	19,0	5,2	10,6	n. Informationen in FishBase (Froese & Pauly 2025) marin und im Brackwasser; Nachweise im NOK nur bei Salzgehalten über 5 PSU und somit im Gegensatz zu Sand- und Strangrundel nicht bis ins Oligohalinikum (0,5 - < 5 PSU) und Süßwasser vordringend; im Freiwasser (pelagisch) und nicht am Boden wie die anderen Grundelarten im NOK
	Herbst	2,14	10,7	7,9	14,0	
	Frühj.+Herbst	9,29	14,9	5,2	14,0	
Flussbarsch - limnisch	Frühjahr	10,65	28,6	3,1	9,5	Toleranz gegenüber hohen Salzgehalten hängt - wie vermutlich auch bei anderen Süßwasserarten, die ins Brackwasser vordringen - von der Herkunft der Tiere ab; Brackwasserpopulationen der Ostsee tolerieren nach Christensen et al. (2019) bis 17,5 PSU und sind zur Hypoosmoregulation fähig, während Süßwasserherkünfte maximal 10 PSU tolerieren und keine Hypoosmoregulation betreiben können; ebenso ist die Eientwicklung bei Brackwasserherkünften noch bei 12 PSU oder mehr möglich, während für Süßwasserherkünfte bisher maximal 7 PSU als Obergrenze festgestellt wurden (Christensen et al. 2016)
	Herbst	7,88	28,6	1,9	13,7	
	Frühj.+Herbst	9,27	28,6	1,9	13,7	
Moderlieschen - limnisch	Frühjahr	15,63	4,8	1,5	4,6	im NOK nur bei oligohalinen Bedingungen und in Süßwasserzuflüssen nachgewiesen; Jungfische ertragen nach Versuchen von Arnold & Längert (1995) aber bis 12 ‰ und Adulte nach Scott et al. (2007) vorübergehend (bis zu 4 Tage) 10,8 und 13,7 PSU; bevorzugt in flachen und vegetationsreichen Gewässern des NOK-Einzugsgebietes, aber nur selten im Kanal selbst
	Herbst	0	0	-	-	
	Frühj.+Herbst	7,82	3,0	1,5	4,6	
Flunder - ästuarin/ diadrom	Frühjahr	5,15	38,1	1,0	10,4	Vermehrung in Nord- und Ostsee; die Larven und Jungfische dringen an den Küsten bis weit ins Süßwasser vor (z. B. Kerstan 1991); der gesamte Kanal kann von unterschiedlichen Altersstadien (ab Jungfischstadium) besiedelt werden
	Herbst	7,73	50,0	1,6	14,2	
	Frühj.+Herbst	6,44	44,0	1,0	14,2	
Rotauge - limnisch	Frühjahr	8,88	27,4	2,3	8,6	regelmäßig im Brackwasser der Ostsee (z. B. Boddengewässer, nördliche Ostsee), bei Nahrungswanderungen bis hin zu Salzgehalten von 18 ‰ (Nellen 1963); für eine erfolgreiche Eientwicklung werden für Tiere aus der Schlei < 1,8-3,5 ‰ angegeben (Schöfer 1979) und für die nördliche Ostsee < 4 ‰ (Härmä et al. 2008)
	Herbst	2,16	16,7	5,5	10,7	
	Frühj.+Herbst	5,52	22,0	2,3	10,7	
	Frühjahr	4,76	51,2	1,0	7,4	

Art - Gilde	Saison	Dichte n/ha	Präsenz %	Salinität NOK Min.	 Max.	Anmerkungen
Aal - diadrom	Herbst	3,43	42,9	1,6	9,6	Reproduktion in der Sargassosee; während der Wachstums- (Gelbaal-) Phase werden Süß-, Brack- und Meerwasserhabitate besiedelt (z. B. Marohn et al. 2013, Dorow & Frankowski 2023); im NOK umfangreicher Besatz mit Glasaalen und vorgestreckten Aalen seit 2006 (Neukamm et al. 2021)
	Frühj.+Herbst	4,09	47,0	1,0	9,6	
Kaulbarsch - limnisch	Frühjahr	3,65	40,5	1,0	10,0	wie für den Flussbarsch, sind auch für den Kaulbarsch unterschiedliche Salzgehaltstoleranzen für Süß- und Brackwasserpopulationen belegt; z. B. erfolgreiche Eientwicklung bis 6 ‰ für eine Süßwasserpopulation und bis 9 ‰ für eine Brackwasserpopulation in Estland (Vetemaa & Saat 1996); grundsätzlich scheint die Art in (trüben) oligo- und mesohalinen Brackwasserbereichen besser zu gedeihen als im reinen Süßwasser (z. B. Hölker & Thiel 1998)
	Herbst	2,67	25,0	1,6	10,7	
	Frühj.+Herbst	3,16	32,7	1,0	10,7	
Sprotte - marin-saisonal	Frühjahr	1,48	17,9	6,3	10,4	n. Informationen in FishBase (Froese & Pauly 2025) dringen insbesondere die Juvenilen vom Meer (inkl. Nord- und Ostsee) bis in Flussmündungen und Küstengewässer bis etwa 4 ‰ vor; die meist im östlichen NOK getätigten Fänge weisen auf (sporadische) Einwanderungen aus der Ostsee hin
	Herbst	0,78	8,3	6,2	13,0	
	Frühj.+Herbst	1,13	13,1	6,2	13,0	
3-Stichling - diadrom	Frühjahr	1,23	7,1	1,0	6,3	neben marinen und diadromen Formen mit hoher Salzgehaltstoleranz aller Lebensstadien bis in den euhalinen Bereich (≥ 30 PSU) existieren auch reine Süßwasserbestände (Paepke 2001); im NOK inkl. Einzugsgebiet kommen vermutlich verschiedene Formen vor
	Herbst	0,02	2,4	3,9	8,9	
	Frühj.+Herbst	0,62	4,8	1,0	8,9	
Dorsch - marin-juvenil	Frühjahr	0,55	6,0	9,4	13,3	unterschiedliche Bestände unterscheiden sich in ihrer Toleranz gegenüber niedrigen Salzgehalten, mit besten Anpassungen (bis 5-6 PSU, jedoch >14 PSU an Laichplätzen) bei Dorschen aus der östlichen Ostsee; Bestände der Kieler Bucht sind an die dortigen Salzgehalte um 15 PSU angepasst (Kijewska et al. 2016) und wandern gelegentlich bis in den östlichen NOK; Reproduktion im Meer
	Herbst	0,26	6,0	10,5	14,0	
	Frühj.+Herbst	0,40	6,0	9,4	14,0	
Wittling - marin-juvenil	Frühjahr	0,03	1,2	9,3	9,3	n. Informationen in FishBase (Froese & Pauly 2025) marin und im Brackwasser (bis westliche Ostsee); laicht im Meer; bis in östliche, noch relativ salzhaltige NOK-Abschnitte vordringend
	Herbst	0,57	11,9	7,1	14,2	
	Frühj.+Herbst	0,30	6,5	7,1	14,2	
Seezunge - marin-juvenil	Frühjahr	0	0	-	-	Adulte und Laichplätze in marinen Gewässern, während Jungfische bis in oligohaline Bereiche (0,5 - <5 PSU) vordringen (z. B. Cabral & Costa 1999); Eindringen in NOK von Westen und Osten möglich, keine Reproduktion im Kanal
	Herbst	0,47	6,0	4,3	13,7	
	Frühj.+Herbst	0,24	3,0	4,3	13,7	
Karpfen - limnisch	Frühjahr	0,26	8,3	1,0	4,6	bei den Fängen handelte es sich um besetzte Zuchtformen (Spiegelkarpfen); in Schleswig-Holstein sind Karpfen gebietsfremd (Neumann 2002); Adulte besiedeln auch Brackwasser, z. B. im Aralsee und Kaspischen Meer (Barus et al. 2001); Eier sollen sich bis 5 ‰ ungestört entwickeln können (Neudecker 1975)
	Herbst	0,11	3,6	4,8	6,1	
	Frühj.+Herbst	0,18	6,0	1,0	6,1	
9-Stichling	Frühjahr	0,23	4,8	2,3	3,8	
	Herbst	0,07	3,6	2,3	11,0	

Art - Gilde	Saison	Dichte n/ha	Präsenz %	Salinität NOK Min.	 Max.	Anmerkungen
- limnisch	Frühj.+Herbst	0,15	4,2	2,3	11,0	Neunstachlige Stichlinge besiedeln eine große Bandbreite unterschiedlich salzhaltiger Gewässer vom Süßwasser bis (selten) reinem Meerwasser; zur Reproduktion werden i. d. R. limnische bis schwach oligohaline Gewässer aufgesucht (Paepke 1983); die physiologischen, genetisch fixierten Anpassungen an unterschiedliche Salzgehalte variieren zwischen verschiedenen Populationen (z. B. Shikano et al. 2010)
Güster - limnisch	Frühjahr	0,18	6,0	2,3	9,7	nach Untersuchungen von Nellen (1965) an der Schlei Vordringen bis ins ß-Meohalinikum (5-10 ‰), aber Reproduktion sehr wahrscheinlich nur bei deutlich unter 5 ‰ möglich
	Herbst	0,04	3,6	2,3	5,0	
	Frühj.+Herbst	0,11	4,8	2,3	9,7	
Kl. Seenadel - ästuarin	Frühjahr	0	0	-	-	marine Art, die in Küstengewässern und Flussmündungen bis in mesohaline und z. T. noch oligohaline (0,5-<5 ‰) Zonen vordringt (z. B. Power & Attrill 2003)
	Herbst	0,12	6,0	4,5	13,2	
	Frühj.+Herbst	0,06	3,0	4,5	13,2	
Schwarzgrundel ästuarin	Frühjahr	0,02	1,2	7,0	7,0	besiedelt n. Informationen in FishBase (Froese & Pauly 2025) marine und brackige Küstengewässer und Ästuare
	Herbst	0,04	2,4	9,5	13,7	
	Frühj.+Herbst	0,03	1,8	7,0	13,7	
Finte - diadrom/ ästuarin	Frühjahr	0,06	2,4	9,4	10,6	Wanderfisch mit Laichgebieten im Süß- und Nahrungsgebieten im Brack- und Meerwasser; die Einzelnachweise im NOK gehen vermutlich auf Tiere des großen Bestandes der Elbe (z. B. BioConsult 2023) zurück, die über die Brunsbütteler Schleusen in den Kanal gelangen
	Herbst	0	0	-	-	
	Frühj.+Herbst	0,03	1,2	9,4	10,6	
Aalmutter - ästuarin	Frühjahr	0	0	-	-	n. Informationen in FishBase (Froese & Pauly 2025) besiedelt die Art marine und brackige Küstengewässer bis in oligohaline (0,5-<5 ‰) Bereiche der Ostsee; deutsche Nord- und Ostsee plus NOK stellen derzeit die südliche Verbreitungsgrenze dar, welche sich infolge der Erderwärmung zukünftig voraussichtlich nach Norden verschieben wird (Zakhartsev et al. 2003)
	Herbst	0,04	1,2	12,5	12,5	
	Frühj.+Herbst	0,02	0,6	12,5	12,5	
Flussneunauge - diadrom	Frühjahr	0,03	2,4	3,5	3,9	wandernde Art mit Laichgebieten in Flüssen und Bächen und Nahrungsgebieten in Ästuaren und Küstengewässern; kleine Bestände können im NOK und Zuflüssen existieren; möglich ist auch die Einwanderung von Tieren aus Ostsee und insbesondere Elbe, wo die Art häufig vorkommt (z. B. Hufgard et al. 2015)
	Herbst	0	0	-	-	
	Frühj.+Herbst	0,01	1,2	3,5	3,9	
Gründling - limnisch	Frühjahr	0,02	1,2	3,9	3,9	nach Nellen (1965) dringt der Gründling vom Süßwasser bis in oligohalines Brackwasser (0,5-<5‰) vor; meist werden jedoch Fließgewässer besiedelt, aus denen der Gründling nur vereinzelt bis in den NOK gelangen dürfte; Reproduktion nach HELCOM (2013a) vermutlich nur in reinem Süßwasser
	Herbst	0	0	-	-	
	Frühj.+Herbst	0,01	0,6	3,9	3,9	
Aland	Frühjahr	0,02	3,6	6,0	7,5	
	Herbst	0	0	-	-	

Art - Gilde	Saison	Dichte n/ha	Präsenz %	Salinität NOK Min.	 Max.	Anmerkungen
- limnisch	Frühj.+Herbst	0,01	1,8	6,0	7,5	nach Untersuchungen von Nellen (1965) an der Schlei Vordringen bis ins ß-Meohalinikum (5-10 ‰), aber Reproduktion sehr wahrscheinlich nur bei deutlich unter 5 ‰; nach Skovrind et al. (2016) außerhalb der Reproduktionszeit bis maximal 15 PSU und genetische/physiologische Unterschiede zwischen Süßwasser- und Brackwasserbeständen
Gr. Maräne	Frühjahr	0,01	1,2	5,8	5,8	nach Rebl et al. (2025) tolerieren die Adulten bis > 20 PSU; nach Untersuchungen am Flemhuder See (Hempel & Neukamm 2023) sind für eine erfolgreiche Reproduktion < 10 PSU erforderlich; im NOK existiert ein fischereilich genutzter Bestand, der seit 2008 durch Besatz gefördert wird
- ästuarin/	Herbst	0	0	-	-	
diadrom	Frühj.+Herbst	0,01	0,6	5,8	5,8	
Steinbeißer	Frühjahr	0	0	-	-	nach HELCOM (2013b) in der Ostsee nur bei < 5 PSU; Reproduktion vermutlich nur bei noch geringeren Salzgehalten
- limnisch	Herbst	0,01	1,2	5,0	5,0	
	Frühj.+Herbst	0,004	0,6	5,0	5,0	
Schwarzmundgrundel - ästuarin/ limnisch						seit ca. 2006 als gebietsfremde Art im NOK (Hempel et al. 2016); n. Rohdaten von Befischungen des LAV SH e. V. im Jahr 2021 im gesamten NOK sehr häufig (Neukamm, pers. Mitt.) ; n. Hempel (2017) Nahrungsaufnahme und Wachstum bei 0,1, 7,5, 15 und 30 PSU mit allerdings schlechtem Wachstum bei 30 PSU; erfolgreiche Reproduktion bis mind. 20 PSU, aber nicht mehr bei 30 PSU; Vorkommen vor schwedischer Westküste bis 29 PSU (Green et al. 2024)

Erläuterungen:

Art: Artnamen wie in Kafemann (2004)

Gilde: hinsichtlich der Salinitätstoleranz relevante „Nutzergruppe“ an ästuar-/brackwassertypischen Fischarten nach BioConsult (2006): limnisch = im Süßwasser; ästuarin = im Brackwasser, diadrom = zwischen Meer- und Süßwasser wandernd, diadrom/ästuarin = zwischen Meer- und Süßwasser wandernd mit Reproduktion im limnischen Tidebereich, ästuarin/diadrom = zwischen Brack- und Süßwasser wandernd mit Reproduktion im Süßwasser (Gr. Maräne) oder zwischen Brack- und Meerwasser wandernd mit Reproduktion im Meer (Flunder), marin-juvenil = Jugendstadien im Brackwasser, marin-saisonal = zu bestimmten Jahreszeiten zur Nahrungssuche im Brackwasser

Saison, Frühjahr: rd. 5 Befischungstage im Zeitraum Ende April/Anfang Mai

Saison, Herbst: rd. 5 Befischungstage im Zeitraum Ende September/Anfang Oktober

Dichte: mittlere Dichte als Individuen (n) je Hektar, bezogen auf je 84 Frühjahrs und Herbstbeprobungen (12 Probestellen x 7 Untersuchungsjahre 1995-2001) bzw. in Summe 168 Frühjahrs- plus Herbstbeprobungen

Präsenz: Anteil der Proben mit Nachweis der Art am jeweiligen Gesamtprobenumfang Frühjahr (84), Herbst (84) bzw. Frühjahr plus Herbst (168)

Salinität: mittlerer Salzgehalt in ‰ (praktisch identisch zu PSU) aus einer oberflächen- und grundnahen Messung je Probenahme; abgelesen aus Abbildungen in Kafemann 2004 mit einer Genauigkeit von ca. 0,1 ‰; in der Tabelle sind jeweils das Minimum und Maximum angegeben, bei dem noch Nachweise der jeweiligen Art erfolgten

Anmerkungen: ergänzende Informationen insbesondere zur Salzgehaltstoleranz; Salinitätswerte je nach genutzter Literatur in ‰ oder PSU, wobei die entsprechenden Werte nahezu identisch sind; Salzgehaltszonen wie limnisch, oligohalin, etc. n. Caspers (1959)

Anhang 2: Liste der nachgewiesenen Brutvogelarten während des bundesweiten Projektes ADEBAR von 2005 bis 2009. Angegeben sind je Art die Einstufung nach Vogelschutzrichtlinie (Anh. I: gelistet in Anhang I, Art. 4(2): Zugvogelart/Zielart, sonst. Zugvogel: 4(2) sonstige gefährdete Zugvogelart), Schutzstatus nach BNatSchG (§: besonders geschützt, §§: streng geschützt, §§§: streng geschützt nach EG-Artenschutzverordnung) und die Anzahl der Raster mit Nachweisen im Untersuchungsgebiet mit dem prozentualen Anteil im Vergleich zur Gesamtanzahl der untersuchten Raster (Rasterfrequenz).

Deutscher Artname	Wissenschaftlicher Artname	VSR	BNatSchG	Anzahl Raster	Rasterfrequenz
Entenvögel	**Anseriformes**				
Höckerschwan	Cygnus olor	Art. 4(2): Rast	§	23	67,65%
Singschwan	Cygnus cygnus	Anh. I	§§	1	2,94%
Kanadagans	Branta canadensis		(§)	12	35,29%
Graugans	Anser anser	Art. 4(2): Rast	§	20	58,82%
Nilgans	Alopochen aegyptica			23	67,65%
Brandgans	Tadorna tadorna	Art. 4(2): Rast	§	28	82,35%
Schnatterente	Anas strepera	Art. 4(2): Rast	§	12	35,29%
Krickente	Anas crecca	Art. 4(2): Rast	§	12	35,29%
Stockente	Anas platyrhynchos	Art. 4(2): Rast	§	34	100,00%
Knäkente	Anas querquedula	Art. 4(2): Rast	§§§	4	11,76%
Löffelente	Anas clypeata	Art. 4(2): Rast	§	9	26,47%
Tafelente	Aythya ferina	Art. 4(2): Rast	§	8	23,53%
Reiherente	Aythya fuligula	Art. 4(2): Rast	§	29	85,29%
Schellente	Bucephala clangula	Art. 4(2): Rast	§	7	20,59%
Gänsesäger	Mergus merganser	Art. 4(2): Rast	§	5	14,71%
Mittelsäger	Mergus serrator	Art. 4(2): Rast	§	2	5,88%
Hühner	**Galliformes**				
Wachtel	Coturnix coturnix	sonst. Zugvogel	§	17	50,00%
Fasan	Phasianus colchicus		(§)	34	100,00%
Rebhuhn	Perdix perdix		§	29	85,29%
Lappentaucher	**Podicipediformes**				

Deutscher Artname	Wissenschaftlicher Artname	VSR	BNatSchG	Anzahl Raster	Rasterfrequenz
Zwergtaucher	Tachybaptus ruficollis	Art. 4(2): Rast	§	21	61,76%
Haubentaucher	Podiceps cristatus	Art. 4(2): Rast	§	20	58,82%
Rothalstaucher	Podiceps grisegena	Art. 4(2): Rast	§§	9	26,47%
Kormorane	**Phalacrocoraciformes**				
Kormorane	Phalacrocorax carbo	Art. 4(2): Rast	§	1	2,94%
Reiher	**Ardeiformes**				
Rohrdommel	Botaurus stellaris	Anh. I	§§	8	23,53%
Graureiher	Ardea cinerea	sonst. Zugvogel	§	4	11,76%
Störche	**Ciconiiformes**				
Weißstorch	Ciconia ciconia	Anh. I	§§	13	38,24%
Greifvögel	**Accipitriformes**				
Wespenbussard	Pernis apivorus	Anh. I	§§§	18	52,94%
Kornweihe	Circus cyaneus	Anh. I	§§§	1	2,94%
Wiesenweihe	Circus pygargus	Anh. I	§§§	2	5,88%
Rohrweihe	Circus aeruginosus	Anh. I	§§§	22	64,71%
Habicht	Accipiter gentilis		§§§	21	61,76%
Sperber	Accipiter nisus		§§§	27	79,41%
Rotmilan	Milvus milvus	Anh. I	§§§	2	5,88%
Schwarzmilan	Milvus migrans	Anh. I	§§§	1	2,94%
Seeadler	Haliaeetus albicilla	Anh. I	§§§	1	2,94%
Mäusebussard	Buteo buteo		§§§	34	100,00%
Baumfalke	Falco subbuteo	sonst. Zugvogel	§§§	7	20,59%
Wanderfalke	Falco peregrinus	Anh. I	§§§	1	2,94%
Turmfalke	Falco tinnunculus		§§§	34	100,00%
Kranichvögel	**Gruiformes**				
Kranich	Grus grus	Anh. I	§§§	4	11,76%
Wasserralle	Rallus aquaticus	Art. 4(2): Brut	§	18	52,94%
Wachtelkönig	Crex crex	Anh. I	§§	4	11,76%
Teichhuhn	Gallinula chloropus	Art. 4(2): Rast	§§	33	97,06%
Blässhuhn	Fulica atra	Art. 4(2): Rast	§	34	100,00%

Deutscher Artname	Wissenschaftlicher Artname	VSR	BNatSchG	Anzahl Raster	Rasterfrequenz
Regenpfeiferartige	**Charadriiformes**				
Austernfischer	Haematopus ostralegus	Art. 4(2): Rast	§	21	61,76%
Säbelschnäbler	Recurvirosta avosetta	Anh. I	§§	1	2,94%
Kiebitz	Vanellus vanellus	Art. 4(2): Rast	§§	31	91,18%
Flussregenpfeifer	Charadrius dubius	Art. 4(2): Rast	§§	14	41,18%
Sandregenpfeifer	Charadrius hiaticula	Art. 4(2): Rast	§§	7	20,59%
Großer Brachvogel	Numenius arquata	Art. 4(2): Rast	§§	10	29,41%
Uferschnepfe	Limosa limosa	Art. 4(2): Rast	§§	10	29,41%
Waldschnepfe	Scolopax rusticola	Art. 4(2): Rast	§	16	47,06%
Bekassine	Gallinago gallinago	Art. 4(2): Brut	§§	16	47,06%
Rotschenkel	Tringa totanus	Art. 4(2): Rast	§§	10	29,41%
Lachmöwe	Larus ridibundus	Art. 4(2): Rast	§	2	5,88%
Sturmmöwe	Larus canus	Art. 4(2): Rast	§	16	47,06%
Mantelmöwe	Larus marinus	Art. 4(2): Rast	§	1	2,94%
Silbermöwe	Larus argentatus	Art. 4(2): Rast	§	4	11,76%
Heringsmöwe	Larus fuscus	Art. 4(2): Rast	§	2	5,88%
Flussseeschwalbe	Sterna hirundo	Anh. I	§§	4	11,76%
Tauben	**Columbiformes**				
Straßentaube	Columba livia f. domestica			11	32,35%
Hohltaube	Columba oenas	sonst. Zugvogel	§	24	70,59%
Ringeltaube	Columba palumbus		§	34	100,00%
Türkentaube	Streptopelia decaocto		§	32	94,12%
Turteltaube	Streptopelia turtur		§§§	7	20,59%
Kuckucke	**Cuculiformes**				
Kuckuck	Cuculus canorus		§	34	100,00%

Deutscher Art-name	Wissenschaftlicher Artname	VSR	BNatSchG	Anzahl Raster	Rasterfre-quenz
Eulen	**Strigiformes**				
Schleiereule	Tyto alba		§§§	26	76,47%
Steinkauz	Athene noctua		§§§	9	26,47%
Waldohreule	Asio otus		§§§	31	91,18%
Sumpfohreule	Asio flammeus	Anh. I	§§§	1	2,94%
Uhu	Bubo bubo	Anh. I	§§§	22	64,71%
Waldkauz	Strix aluco		§§§	31	91,18%
Apodiformes	**Segler**				
Mauersegler	Apus apus		§	25	73,53%
Coraciiformes	**Rackenvögel**				
Eisvogel	Alcedo atthis	Anh. I	§§	19	55,88%
Piciformes	**Spechtvögel**				
Wendehals	Jynx torquilla	Art. 4(2): Brut	§§	2	5,88%
Grünspecht	Picus viridis		§§	20	58,82%
Schwarzspecht	Dryocopus martius	Anh. I	§§	18	52,94%
Buntspecht	Dendrocopus major		§	33	97,06%
Mittelspecht	Dendrocopus medius	Anh. I	§§	10	29,41%
Kleinspecht	Dryobates minor		§	22	64,71%
Sperlingsvögel	**Passeriformes**				
Pirol	Oriolus oriolus		§	16	47,06%
Neuntöter	Lanius collurio	Anh. I	§	31	91,18%
Elster	Pica pica		§	34	100,00%
Eichelhäher	Garrulus glandarius		§	32	94,12%
Dohle	Coloeus monedula		§	28	82,35%
Saatkrähe	Corvus frugilegus		§	7	20,59%
Rabenkrähe	Corvus corone		§	34	100,00%
Kolkrabe	Corvus corax		§	24	70,59%
Beutelmeise	Remiz pendulinus	Art. 4(2): Brut	§	12	35,29%
Blaumeise	Cyanistes caeruleus		§	34	100,00%
Kohlmeise	Parus major		§	34	100,00%
Haubenmeise	Lophophanes cristatus		§	18	52,94%
Tannenmeise	Periparus ater		§	30	88,24%
Sumpfmeise	Poecile palustris		§	29	85,29%
Weidenmeise	Poecile montanus		§	34	100,00%
Heidelerche	Lullula arborea	Anh. I	§§	3	8,82%

Deutscher Artname	Wissenschaftlicher Artname	VSR	BNatSchG	Anzahl Raster	Rasterfrequenz
Feldlerche	Alauda arvensis		§	34	100,00%
Uferschwalbe	Riparia riparia	sonst. Zugvogel	§§	10	29,41%
Rauchschwalbe	Hirunda rustica		§	34	100,00%
Mehlschwalbe	Delichon urbicum		§	34	100,00%
Bartmeise	Panurus biarmicus		§	8	23,53%
Schwanzmeise	Aegithalos caudatus		§	33	97,06%
Waldlaubsänger	Phylloscopus sibilatrix		§	26	76,47%
Fitis	Phylloscopus trochilus		§	34	100,00%
Zilpzalp	Phylloscopus collybita		§	34	100,00%
Feldschwirl	Locustella naevia		§	32	94,12%
Schlagschwirl	Locustella fluviatilis		§	7	20,59%
Rohrschwirl	Locustella luscinioides	Art. 4(2): Brut	§§	7	20,59%
Schilfrohrsänger	Acrocephalus schoenobaenus	Art. 4(2): Brut	§§	13	38,24%
Sumpfrohrsänger	Acrocephalus palustris		§	34	100,00%
Teichrohrsänger	Acrocephalus scirpaceus		§	32	94,12%
Drosselrohrsänger	Acrocephalus arundinaceus	Art. 4(2): Brut	§§	1	2,94%
Gelbspötter	Hippolais icterina	sonst. Zugvogel	§	34	100,00%
Mönchsgrasmücke	Sylvia atricapilla		§	34	100,00%
Gartengrasmücke	Sylvia borin		§	34	100,00%
Klappergrasmücke	Sylvia curruca		§	34	100,00%
Dorngrasmücke	Sylvia communis		§	34	100,00%
Wintergoldhähnchen	Regulus regulus		§	31	91,18%
Sommergoldhähnchen	Regulus ignicapilla		§	25	73,53%
Kleiber	Sitta europaea		§	27	79,41%
Waldbaumläufer	Certhia familiaris		§	28	82,35%
Gartenbaumläufer	Certhia brachydactyla		§	33	97,06%
Zaunkönig	Troglodytes troglodytes		§	34	100,00%
Star	Sturnus vulgaris		§	34	100,00%
Misteldrossel	Turdus viscivorus		§	34	100,00%
Amsel	Turdus merula		§	34	100,00%

Deutscher Artname	Wissenschaftlicher Artname	VSR	BNatSchG	Anzahl Raster	Rasterfrequenz
Wacholderdrossel	Turdus pilaris		§	1	2,94%
Singdrossel	Turdus philomelos		§	34	100,00%
Grauschnäpper	Muscicapa striata		§	34	100,00%
Zwergschnäpper	Ficedula parva	Anh. I	§§	1	2,94%
Trauerschnäpper	Ficedula hypoleuca		§	31	91,18%
Braunkehlchen	Saxicola rubetra	Art. 4(2): Brut	§	27	79,41%
Schwarzkehlchen	Saxicola rubicola	sonst. Zugvogel	§	14	41,18%
Rotkehlchen	Erithacus rubecula		§	33	97,06%
Sprosser	Luscinia luscinia		§	12	35,29%
Nachtigall	Luscinia megarhynchos		§	11	32,35%
Blaukehlchen	Luscinia svecica	Anh. I	§§	13	38,24%
Hausrotschwanz	Phoenicurus ochruros		§	34	100,00%
Gartenrotschwanz	Phoenicurus phoenicurus		§	34	100,00%
Steinschmätzer	Oenanthe oenanthe	Art. 4(2): Brut	§	4	11,76%
Heckenbraunelle	Prunella modularis		§	34	100,00%
Haussperling	Passer domesticus		§	34	100,00%
Feldsperling	Passer montanus		§	34	100,00%
Baumpieper	Anthus trivialis		§	32	94,12%
Wiesenpieper	Anthus pratensis	Art. 4(2): Brut	§	29	85,29%
Gebirgsstelze	Motacilla cinerea		§	11	32,35%
Schafstelze	Motacilla flava	sonst. Zugvogel	§	23	67,65%
Bachstelze	Motacilla alba		§	34	100,00%
Buchfink	Fringilla coelebs		§	34	100,00%
Kernbeißer	Coccothraustes coccothraustes		§	23	67,65%
Gimpel	Pyrrhula pyrrhula		§	29	85,29%
Karmingimpel	Carpodacus erythrinus		§§	1	2,94%
Girlitz	Serinus serinus		§	12	35,29%
Fichtenkreuzschnabel	Loxia curvirostra		§	3	8,82%
Grünfink	Carduelis chloris		§	34	100,00%
Stieglitz	Carduelis carduelis		§	34	100,00%

Deutscher Artname	Wissenschaftlicher Artname	VSR	BNatSchG	Anzahl Raster	Rasterfrequenz
Erlenzeisig	Carduelis spinus		§	4	11,76%
Bluthänfling	Carduelis cannabina		§	34	100,00%
Birkenzeisig	Acanthis flammea		§	13	38,24%
Goldammer	Emberiza citrinella		§	32	94,12%
Rohrammer	Emberiza schoeniclus		§	34	100,00%

Bundesanstalt für Gewässerkunde

Am Mainzer Tor
56068 Koblenz

Telefon: +49 261 1306-0
Telefax: +49 261 1306-5302
E-Mail: posteingang@bafg.de

www.bafg.de