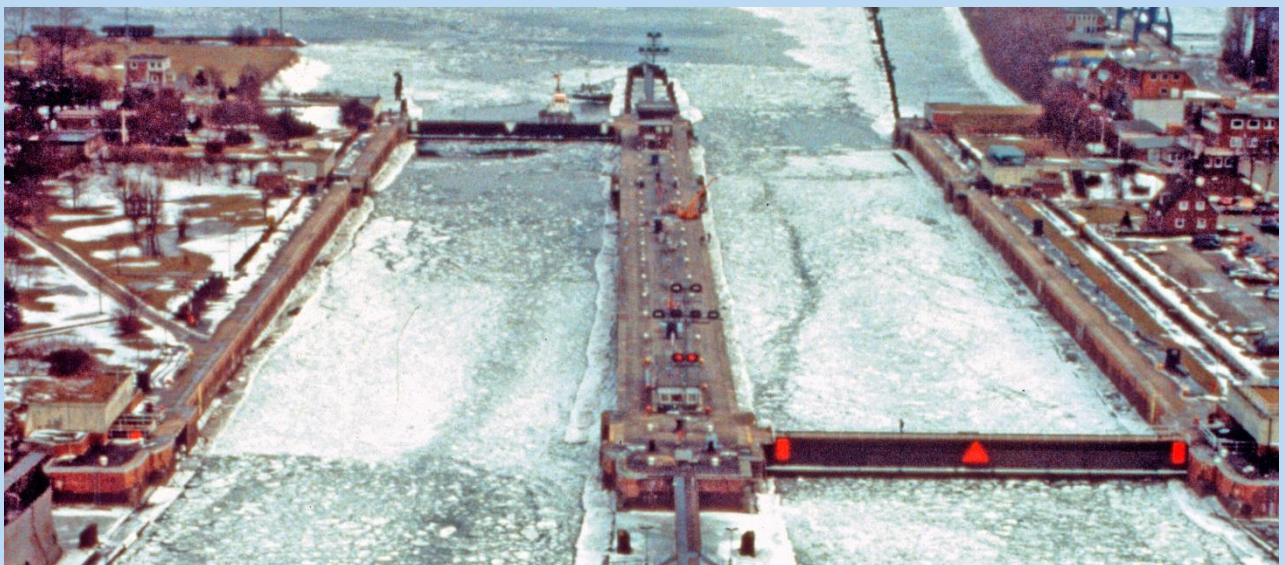


Bericht

Analyse historischer und Projektion möglicher zukünftiger Eisvorkommen am Nord-Ostsee-Kanal

09.09.2025
BfG-2223

Asta Kunkel, Dennis Meißner,
Claudius Fleischer



BfG Bundesanstalt für
Gewässerkunde

Bericht

Analyse historischer und Projektion möglicher zukünftiger Eisvorkommen am Nord-Ostsee-Kanal

Kurztitel	Analyse historischer und Projektion möglicher zukünftiger Eisvorkommen am Nord-Ostsee-Kanal
------------------	---

Autoren /-innen	Kunkel, Asta; Meißner, Dennis; Fleischer Claudius Bundesanstalt für Gewässerkunde <i>Referat Wasserhaushalt, Vorhersagen und Prognosen</i>
------------------------	---

Auftraggeber	Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt Am Propsthof 51 53121 Bonn
Telefon	+49 228/7090-0
E-Mail	gdws@wsv.bund.de
Internet	https://www.gdws.wsv.bund.de

Projekt-Nummer	M39610204075
BfG-Nummer	BfG-2223

DOI	10.5675/BfG-2223
------------	------------------

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

Weitere Beteiligte Ebner von Eschenbach: Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz,
Referat Wasserhaushalt, Vorhersagen und Prognosen

Zitiervorschlag KUNKEL, Asta; MEIßNER, Dennis; FLEISCHER, Claudius (2025): Analyse
historischer und Projektion möglicher zukünftiger Eisvorkommen am
Nord-Ostsee-Kanal. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz. BfG-
2223, DOI: 10.5675/BfG-2223.

Bildnachweis Titelseite Bundesanstalt für Wasserbau (Foto aus dem Winter 1995/96)

Inhaltsverzeichnis

Impressum	2
Inhaltsverzeichnis.....	3
Zusammenfassung / Summary	4
Einleitung	7
1 Datengrundlage und Vorgehensweise	8
1.1 Historische Eisdaten	8
1.2 Historische Temperaturdaten und Klimaprojektionen	9
1.3 Bestimmung der Kältesummen	10
2 Auswertung der historischen Eisdaten.....	14
2.1 Analyse des Zusammenhangs zwischen Kältesumme und Eiswinter	19
3 Auswertung von Klimaprojektionen	22
3.1 Projizierte Entwicklung der Eisvorkommen.....	22
Abbildungsverzeichnis.....	25
Tabellenverzeichnis	26
Literaturverzeichnis.....	27
Anhang	28
Anhang A: Grafische Auswertung der historischen Eisdaten.....	28
Saisonlänge und Eisdicke	28
Baltic Ice Sea Codes.....	32
Anhang B: Grafische Auswertung der historischen Kältesummen.....	36
Korrelationen.....	36
Kältesummen	39
Anhang C: Grafische Auswertung der Klimaprojektionen	43
Auswertung für RCP 2.6.....	43
Auswertung für RCP 4.5	44
Auswertung für RCP 8.5.....	46

Zusammenfassung / Summary

Der vorliegende Bericht ermöglicht einen systematischen Über- und Einblick in den Aspekt der Eisvorkommen bzw. der eisbedingten Schifffahrtsbeeinträchtigung für den Nord-Ostsee-Kanal (NOK). Zu diesem Zweck wurden von der BfG im Kontext des von der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt initiierten Projekts „NOK-Phase 2 - Wasserbewirtschaftung, Gewässerkunde und Ökologie“ die über das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie bereitgestellten Eis-Beobachtungsdaten für den NOK seit dem Winter 1939/40 systematisch aufbereitet und umfangreich ausgewertet. Durch die vergleichende Analyse der meteorologischen Verhältnisse auf Grundlage des HYRAS-Datensatzes des Deutschen Wetterdienstes konnte zudem ein bestehender Ansatz zur Abschätzung klimawandelbedingter Veränderungen auf die Eisvorkommen im Binnenbereich adaptiert und auf den NOK angewendet werden. Hierzu wurden mit Unterstützung des DAS-Basisdienstes „Klima und Wasser“ 37 Klimaprojektionen basierend auf drei verschiedenen Emissionsszenarien (RCP 8.5, RCP 4.5, RCP 2.8) ausgewertet.

Charakteristisch waren in den vergangenen Jahrzehnten für den NOK der stete Wechsel ausgeprägter Eiswinter und eisfreier Jahre. 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 insbesondere 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 Tauwetterphasen 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. Ein Einfluss der Eisvorkommen auf die kommerzielle Schifffahrt ist zwar 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). 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.

Zwischen den einzelnen Messstationen bzw. Kanalabschnitten am NOK gibt es zwar bezogen auf die verschiedenen Eis-Parameter Unterschiede in den verschiedenen Wintern, allerdings ist diese Variation eher schwach ausgeprägt. Dies zeigen auch die Darstellungen im Längsschnitt, 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 Bereiche der Kanalzufahrten eher stärker durch Eis betroffen waren als die freie Kanalstrecke (Kanalzufahrt Brunsbüttel tendenziell leicht stärker beeinträchtigt als der Bereich Holtenau). Systematische und zeitlich stabile Gradienten entlang des Kanals sind über den gesamten Zeitraum aber nicht auszumachen. Die historischen Daten zeigen jedoch einen ausgeprägten funktionalen Zusammenhang zwischen den Winterkältesummen und den beobachteten Eisvorkommen. Die Aussage „je kälter der Winter, desto wahrscheinlicher und stärker ist die Eisbildung“ lässt sich für alle Kanalabschnitte treffen und dieser Zusammenhang wird über entsprechend hohe Korrelationskoeffizienten auch statistisch belegt. Sowohl bei Betrachtungen für einen Abschnitt / eine Station über die Zeit als auch bei Auswertungen im Längsverlauf des Kanals

dominieren die winterlichen Temperaturverhältnisse als maßgebliche Einflussgröße auf die Eisbildung am NOK über weitere Einflüsse (Bewirtschaftung, Salzgehalt, Wind, Strömung, etc.).

Der statistische Zusammenhang zwischen Winterkältesumme und Eisvorkommen wurde zugleich genutzt, um eine Einschätzung über die zukünftige Entwicklung der Eisvorkommen auf Basis von 37 Klimaprojektionen zu erhalten. Nachdem über die vergangenen Jahrzehnten bereits eine erkennbare Abnahme der Eintrittshäufigkeit von Eiswintern am NOK messbar ist, zeigen die Klimaprojektionen in Abhängigkeit vom betrachteten Emissionsszenario die Möglichkeit einer mehr oder weniger markanten Fortsetzung der rückläufigen Eisbeeinträchtigung für den NOK. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass schifffahrtsbehindernde Eiserscheinungen im Zuge des Klimawandels zukünftig eher seltener zu erwarten sein werden. Damit kann die Schifffahrt – in Bezug auf Beeinträchtigungen durch Eisbildung – vom Klimawandel profitieren. Es ist jedoch eindeutig festzuhalten, dass, wenn möglicherweise auch seltener, so doch auch zukünftig mit markanten Eiswintern am NOK zu rechnen sein wird.

This report provides a systematic overview and insight into the aspect of river ice and ice-related impacts to navigation on the Kiel Canal (NOK). In the context of a project 'NOK-Phase 2 - Wasserbewirtschaftung, Gewässerkunde und Ökologie' initiated by the Federal Waterway and Shipping Administration the BfG systematically processed and extensively analysed the ice observation data for the NOK since the winter of 1939/40, which had been provided by the Federal Maritime and Hydrographic Agency. By comparatively analysing the meteorological conditions on the basis of the HYRAS data set of the German Meteorological Service, it was also possible to adapt an existing approach for estimating climate change-induced alteration to the ice occurrence on inland waterways and apply it to the NOK. For this purpose, 37 climate projections based on three different emission scenarios (RCP 8.5, RCP 4.5, RCP 2.8) were analysed with the support of the DAS-service 'Climate and Water'.

In recent decades, the NOK has been characterised by an alternation of pronounced ice winters and ice-free years. Examples of severe ice winters in which the NOK was also heavily affected by ice for long periods include the winters of 1946/47, 1962/63, 1969/70 and 1995/96. In addition to the last few years, the winters at the end of the 1980s and 1990s in particular were mainly ice-free. The vast majority of winters on the NOK are not characterised by a continuous period of frost or ice, but typically alternate between colder and warmer phases over 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 not before mid-December, but usually occurs in the course of January, and it lasts until mid of March. Within the 82-year period under consideration, 10 December (in the winter of 2002/03) was the earliest onset of ice formation. The latest end of the ice season was 5 April in the winter of 1941/42. The impact of ice on commercial shipping is present, but can be categorised as moderate overall. The usual reports on traffic restrictions range up to Baltic Sea Ice Code 3 (navigation without icebreaker assistance possible only for high-powered vessels of strong construction and suitable for navigation in ice). Restrictions beyond this have so far been rare and limited to a few days. A cessation of shipping due to ice has only been reported for one day at the Brunsbüttel Elbe station in the winter of 1939/1940.

Although there are differences in the various ice parameters between the individual measuring stations or canal sections in the different winters, this variation is rather weak. This is also visible in the longitudinal section, where the differences between the individual winters are much more pronounced than the respective differences along the NOK. In some winters, it can be

seen that the areas of the canal boundaries were more affected by ice than the open canal section (Brunsbüttel canal access tends to be slightly more affected than the Holtenau area). However, systematic and temporally stable gradients along the canal cannot be identified over the entire period. However, the historical data show a pronounced functional correlation between the “Winterkältesumme” and the observed river ice. The statement ‘the colder the winter, the more likely and stronger the ice formation’ can be made for all sections of the canal and this relationship is also statistically proven by correspondingly high correlation coefficients. Both when analysing a section/station over time and when evaluating the longitudinal course of the canal, the winter temperature conditions dominate over other influences (management, salinity, wind, current, etc.) as the decisive factor influencing ice formation on the NOK.

The statistical correlation between “Winterkältesumme” and ice occurrence was also used to obtain an estimate of the future development of ice occurrence on the basis of 37 climate projections. Since a decrease in the frequency of ice winters on the NOK has already been measurable over the past decades, the climate projections show the possibility of a more or less marked continuation of the declining ice impact on the NOK, depending on the emissions scenario under consideration. The results suggest that ice phenomena that impact navigation will be less frequent in the future as a result of climate change. This means that shipping - in terms of impairments caused by ice formation - can benefit from climate change. However, it is clear that, although possibly less frequent, significant ice winters can still be expected on the NOK in the future.

Einleitung

Die in diesem Bericht dokumentierten Untersuchungen der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) wurden im Rahmen des von der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS) initiierten Projekts „NOK-Phase 2 - Wasserbewirtschaftung, Gewässerkunde und Ökologie“ im Zeitraum zwischen Januar 2023 und Mai 2025 durchgeführt. Die Analysen gliedern sich als ein weiterer Bestandteil der Forschungsarbeiten ein, die die BfG seit 2012 am Nord-Ostsee-Kanal (NOK) mit dem Ziel durchführt, das Systemverständnis zu erweitern und darauf basierend Handlungsempfehlungen für das Management der wichtigen künstlichen Wasserstraße zu erarbeiten.

Ziel der in diesem Bericht dargestellten Untersuchungen war es, Auftreten und Intensität von Eisvorkommen für den NOK systematisch darzustellen, zu analysieren und Faktoren, die einen wesentlichen Einfluss auf mögliche zukünftige Veränderung der Eiserscheinungen besitzen, zu identifizieren. Neben einer umfassenden Rückschau auf die vergangenen Jahrzehnte sollte auch der Versuch unternommen werden, auf Basis aktueller Klimaprojektionen mögliche Veränderungen in der Häufigkeit von Eisvorkommen am NOK in den kommenden Jahrzehnten einzuschätzen. Hierzu konnte die BfG einen im Ressortforschungsprogramm KLIWAS des Bundesverkehrsministeriums (https://www.kliwas.de/KLIWAS/DE/Home/homepage_node.html) entwickelten Ansatz zur fundierten Abschätzung klimawandelbedingter Veränderungen auf die Eisvorkommen adaptieren und für so das Untersuchungsgebiet NOK anwenden.

In der Konzeptionierung der Arbeiten zum Eisvorkommen am NOK wurde festgelegt, dass für die Untersuchungen keine zusätzliche Datenerhebung erforderlich ist, sondern es ausreicht, auf bestehenden Daten und Informationen aufzusetzen. Dies sollte jedoch ausdrücklich Ergebnisse von anderweitig durchgeführten Modellierungen einschließen, die es auf die spezifische Fragestellung hin statistisch auszuwerten galt. Eine Erstellung neuer Modelle oder die Durchführung zusätzlicher Modellierungen im engeren Sinn sind planmäßig nicht erfolgt. Im Kontext der Analyse der Klimaprojektionen wurde auf die Daten und Expertise des DAS-Basisdienstes „Klima und Wasser“, der in Teilen in der BfG angesiedelt ist, zurückgegriffen.

1 Datengrundlage und Vorgehensweise

1.1 Historische Eisdaten

Das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) betreibt seit über 100 Jahren einen operationellen Eisdienst, für den es gemeinsam mit der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) Beobachtungsstationen an Nord- und Ostsee sowie am Nord-Ostsee-Kanal (NOK) unterhält. Neben der täglichen bis wöchentlichen Veröffentlichung von Eisberichten und Eiskarten für diese Regionen werden statistische Zusammenfassungen über die Eiswinter vom BSH publiziert (BSH, 2018a). Grundlage der Berichte und Karten sind die täglichen Eisbeobachtungen, die insgesamt Auskunft über Beginn und Ende der Eisbedeckung, Gesamtlänge der Eiswinter, Anzahl der Tage mit sowie ohne Eis, Stärke der Eiswinter (Flächensumme, Volumensumme), max. Dicke sowie Anzahl der Tage mit Schifffahrtsbeschränkung geben. Aus den über 150 Stationen, für die auf Jahres- bzw. Wintersaisonbasis Daten zum Eisvorkommen vom BSH standardmäßig bereitgestellt werden, erfolgte für die durchgeführten Auswertungen eine Selektion von sieben im bzw. an den Rändern des NOK gelegenen Stationen (siehe Tabelle 1). Die Daten jeder Station repräsentieren hierbei die Verhältnisse eines Kanalabschnitts, so dass neben stationsbezogenen, punktuellen Auswertungen auch Darstellungen im Kanallängsschnitt generiert werden konnten. In Abbildung 1 sind die für die Untersuchung der historischen Eiswinter am NOK verwendeten 5 Beobachtungsstationen auf der Strecke des NOK sowie die beiden Stationen am westlichen und östlichen Rand des NOK markiert.

Tabelle 1: ausgewählte Beobachtungsstationen im / am NOK

Station	Kanalabschnitt	Datenverfügbarkeit
Brunsbüttel, Elbe	außerhalb, westlicher Kanalrand	ab Winter 1939 / 40
Brunsbüttel, Kanalzufahrt	NOK-km 0 – NOK-km 10	ab Winter 1939 / 40
Fischerhütte – Brunsbüttel	NOK-km 10 – NOK-km 36	ab Winter 1955 / 56
Rendsburg – Fischerhütte	NOK-km 36 – NOK-km 65	ab Winter 1955 / 56
Brunsbüttel – Rendsburg	NOK-km 10 – NOK-km 65	ab Winter 1939 / 40 bis Winter 1954 / 55
Holtenau – Rendsburg	NOK-km 65 – NOK-km 87	ab Winter 1939 / 40
Holtenau, Kanalzufahrt	NOK-km 87 – NOK-km 98	ab Winter 1939 / 40
Kiel, Binnenhafen	außerhalb, östlicher Kanalrand	ab Winter 1939 / 40

Die ausgewählten Stationen „Brunsbüttel, Elbe“, „Brunsbüttel, Kanalzufahrt“, „Holtenau – Rendsburg“, „Holtenau, Kanalzufahrt“ und „Kiel, Binnenhafen“ Daten ab dem Winter 1939/1940. Für die Beobachtungsstationen „Brunsbüttel – Fischerhütte“ sowie „Fischerhütte – Rendsburg“ sind im Winter 1955/1956 erstmalig Aufzeichnungen verfügbar. Diese Stationen sind Nachfolger der Station „Brunsbüttel – Rendsburg“, welche von 1939 bis 1955 betrieben wurde (Tabelle 1). Zum Erhalt einer einheitlich langen Messreihe wurden daher die Stationen „Rendsburg – Fischerhütte“ und „Fischerhütte – Brunsbüttel“ für den Zeitraum 1939/1940 bis 1954/1955 mit den Werten der Station „Brunsbüttel – Rendsburg“ gefüllt.

Die Auswertung der historischen Daten konnte damit insgesamt über 82 Wintersaisons für den Zeitraum 1939/1940 bis 2020/2021 (jüngster aufgezeichneter Eiswinter) durchgeführt werden.

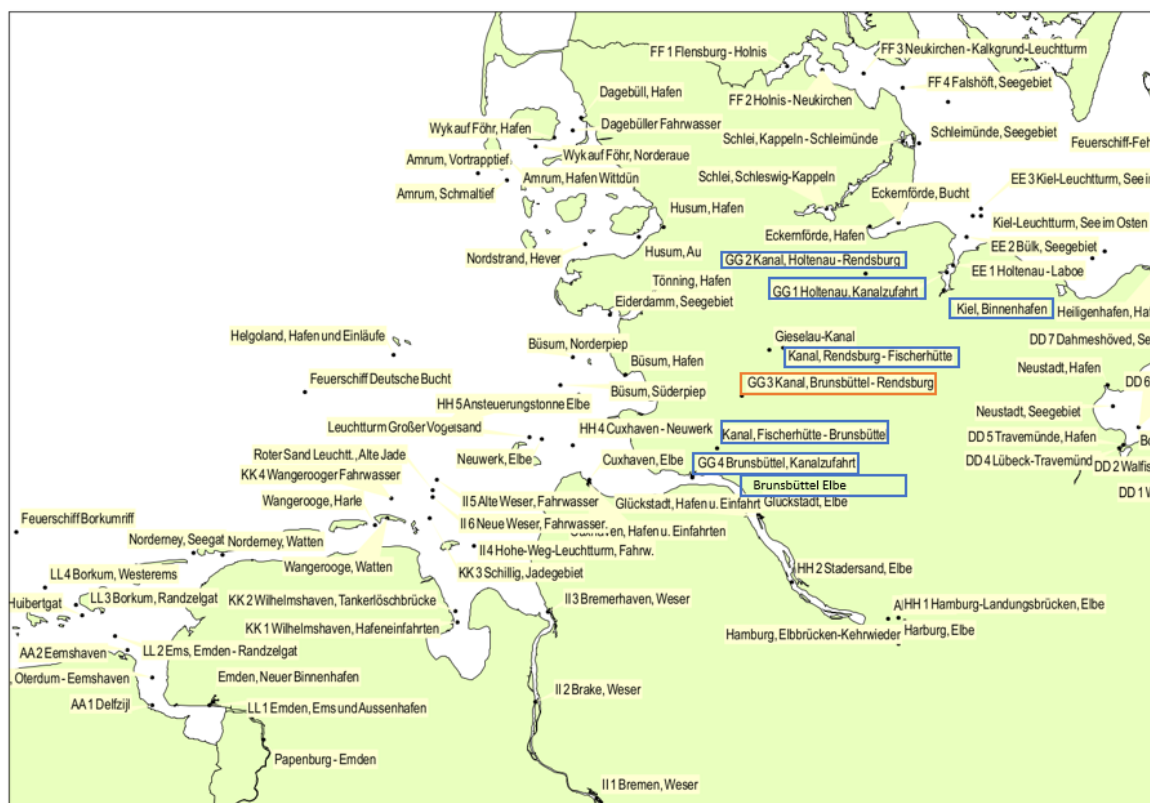


Abbildung 1: Übersicht über die westlich gelegenen Eisstationen der deutschen Bucht. Blau umrandet sind die für die Analyse des Eisvorkommens am NOK genutzten Stationen, rot umrandet die zum Auffüllen der Datenlücke genutzte Station Brunsbüttel – Rendsburg. Adaptiert aus (BSH, 2018) <https://www2.bsh.de/aktdat/eisdienst/Statistik/IceStat.html>, Abruf: Mai 2025.

1.2 Historische Temperaturdaten und Klimaprojektionen

Zur Analyse der historischen klimatischen Verhältnisse wurde der Parameter Lufttemperatur des HYRAS Datensatzes Version v5.0 des Deutschen Wetterdienstes (DWD) herangezogen (RAUTHE et al, 2013; RAZAFIMAHARO et al, 2020). Der Datensatz stellt die Tagesmitteltemperatur für den Zeitraum 1951 bis 2020 in 5 km x 5 km räumlicher Auflösung für Deutschland bereit.

Für die Bewertung der möglichen Eisentwicklung in der Zukunft wurden drei mögliche Szenarien zu Grunde gelegt, die den an der Bundesanstalt für Gewässerkunde im Rahmen des DAS-Basisdienstes genutzten Emissionsszenarien RCP 2.6, RCP 4.5, sowie RCP 8.5 (BFG, 2021) entsprechen. In den Szenarien wird der Erfolg von Klimaschutzmaßnahmen unterschiedlich bewertet: „geringer“ Erfolg im Klimaschutz (RCP 8.5, also hohe Konzentrationen an Treibhausgasen), über „mittleren“ (RCP 4.5) bis „hohen“ Erfolg im Klimaschutz (RCP 2.6, also 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).

Um die als Raster vorliegenden meteorologischen Daten (historische HYRAS-Daten und Klimaprojektionen) auf die einzelnen Kanalabschnitte (siehe Tabelle 1) zu beziehen, wurden die Kanalsegmente mit einem 10 km breiten Polygon umschlossen (siehe Abbildung 2), innerhalb dessen die Rasterdaten (HYRAS, Klimaprojektionen) ausgewertet wurden.

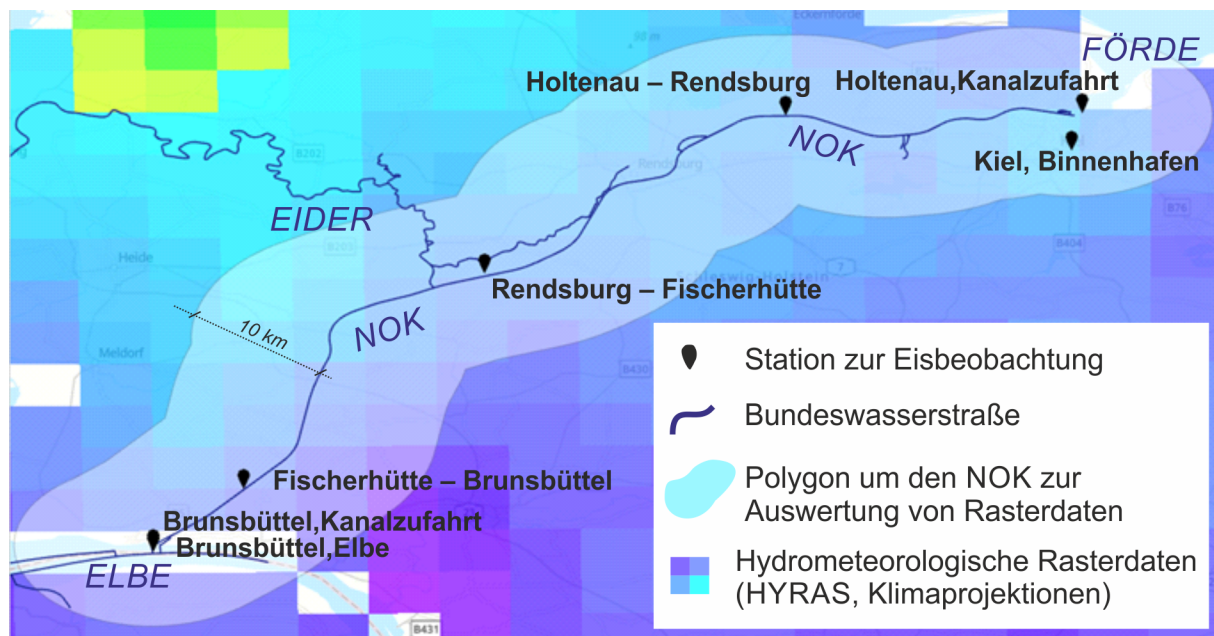


Abbildung 2: Lage der selektierten Stationen mit Eisbeobachtungen im / am NOK vor dem Hintergrund hydrometeorologischer Rasterdaten (5 km x 5 km) und des Polygons zur Rasterdatenselektion

1.3 Bestimmung der Kältesummen

Um die historischen Eisbeobachtungen vor dem Hintergrund der klimatischen Verhältnisse einordnen zu können und um die Entwicklung der Eiswinter in der Zukunft zu untersuchen, wurde der Modellansatz der Winterkältesummen gewählt. Dieser simple Ansatz stellt einen funktionalen Zusammenhang zwischen der Winterkältesumme eines Jahres und dem Eisvorkommen an einem Gewässer oder Gewässerabschnitt her. Weitere Einflussfaktoren auf die Eisbildung, wie z. B. anthropogene Wärmeeinleitungen oder dynamische Strömungsprozesse, bleiben bei diesem generalisierten methodischen Ansatz unberücksichtigt, was jedoch auf größeren zeitlichen (Wintersaisons) oder räumlichen (Wasserstraßenabschnitte von mehreren 10 Kilometern) Skalen fachlich gerechtfertigt ist.

Die Winterkältesumme ist hierbei definiert als die Summe der Beträge der negativen Tagesmittelwerte der Lufttemperatur eines Winterhalbjahres (November bis März, Einheit: Kd). Gemäß DWD können Winter in Abhängigkeit ihrer Kältesummen wie folgt klassifiziert werden (DWD, 2024):

- Kältesumme unter 100: milder Winter
- Kältesumme 100 bis 199: mäßig warmer Winter
- Kältesumme 200 bis 299: mäßig kalter Winter
- Kältesumme 200 und höher: strenger Winter

In früheren Untersuchungen im Kontext des KLIWAS-Programms wurde das Eisvorkommen anhand der Anzahl der Sperrtage der Wasserstraße definiert (HATZ und MAURER, 2014). In dieser Analyse wird das Vorgehen auf die vorliegenden Datengrundlage übertragen und Winterkältesumme mit der Anzahl der Eistage verknüpft. Dass dies gerechtfertigt ist und ein enger

Zusammenhang zwischen hohen Kältesummen und einer hohen Anzahl an Eistagen besteht, konnte für den NOK nachgewiesen werden. Gut erkennbar wird dieser Sachverhalt in Abbildung 3 und die hohe Korrelation bestätigt dies. Für alle Kanalabschnitte wurde ein Korrelationskoeffizient von $r^2 > 0,7$ bestimmt, was belegt, dass ein hoher funktionaler Zusammenhang zwischen Kältesumme und Eistagen (wenig / keine anthropogene Beeinflussung) am NOK vorherrscht.

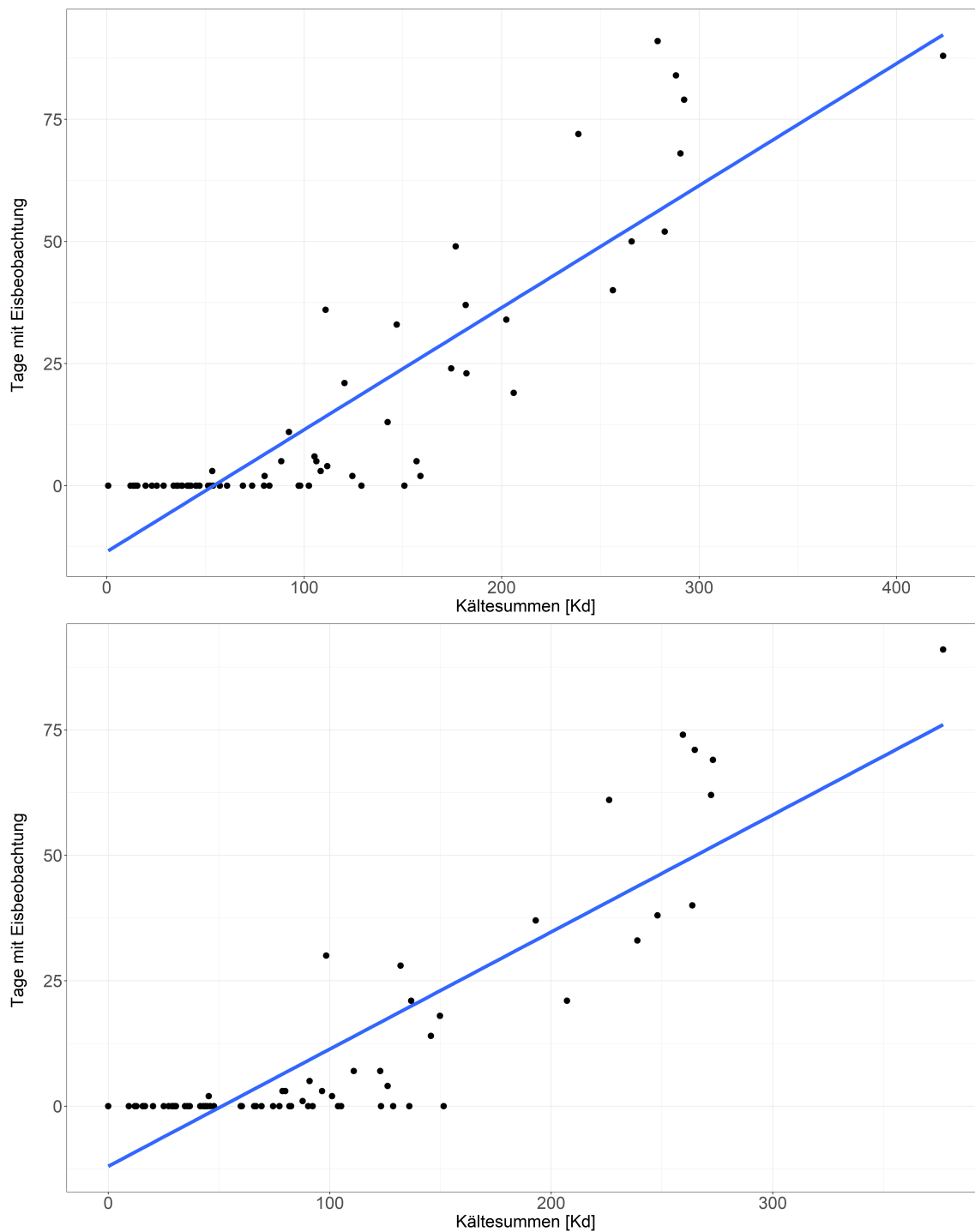


Abbildung 3: Korrelationen der Kältesumme mit Tagen der Eisbeobachtung. Die Korrelationskoeffizienten sind $r^2 = 0,886$; $r^2 = 0,884$ für Fischerhütte – Brunsbüttel (oben) und Holtenau – Rendsburg (unten).

In der gemeinsamen Rückschau der Winterkältesummen und der Eisvorkommen wurden daraufhin für jeden Kanalabschnitt die Winter wie folgt mittels dreier Kategorien klassifiziert:

- Kategorie 1: Mittleres Kältesummenniveau / „Eisbildung möglich“
 - Obere Grenze: wird durch die größte Winterkältesumme des Referenzzeitraums bestimmt, für die im Winter keine Eisbildung entstand.
 - Untere Grenze: wird durch die kleinste Winterkältesumme des Referenzzeitraums bestimmt, für die im Winter Eisbildung entstand.
 - Bedeutung: Alle Winter, die aufgrund ihrer Kältesumme in diese Kategorie fallen, liegen in einem Unsicherheitsband, in dem Eisbildung möglich aber nicht sicher ist. Dies bedeutet, dass es in der Vergangenheit Winter dieser Kältesummen-spanne gab, in denen sowohl Eis aufgetreten ist, die aber auch eisfrei waren.
- Kategorie 2: Niedriges Kältesummenniveau / „keine Eisbildung“
 - Untere Grenze: 0 Kd
 - Obere Grenze: entspricht der unteren Grenze von Kategorie 1.
 - Bedeutung: Alle Winter, die aufgrund ihrer Kältesumme in diese Kategorie fallen, hatten im Referenzzeitraum keine Eisvorkommen zu verzeichnen.
- Kategorie 3: Hohes Kältesummenniveau / „Eisbildung sicher“
 - Untere Grenze: entspricht der oberen Grenze von Kategorie 1
 - Obere Grenze: unbegrenzt
 - Bedeutung: Alle Winter, die aufgrund ihrer Kältesumme in diese Kategorie fallen, hatten im Referenzzeitraum Eisbildung zu verzeichnen.

Abbildung 4 zeigt beispielhaft die Kältesummen (rote Linie) und Anzahl der Eistage (Säulen) für die Station Rendsburg-Fischerhütte. Zur Bildung der oben genannten Kategorien wurden zwei Kältesummen im Referenzzeitraum identifiziert. Die Kältesumme der Wintersaison 1960/61 bildet für diesen Abschnitt des NOK die untere Grenze (bei ca. 51 Kd) der Kategorie „Eisbildung möglich“. In diesem Winter wurde Eis beobachtet, obgleich die Kältesumme gering ausfällt. Dies bedeutet, es handelte sich um den wärmsten Winter mit Eisbeobachtung. Die obere Grenze der Kategorie „Eisbildung möglich“ bildet die Kältesumme im Winter 2012/13 (bei rund 154 Kd). Hier gab es die größte Kältesumme ohne beobachtete Eisdecke. Der Referenzzeitraum ergibt sich aus der zur Verfügung stehenden Datengrundlage des HYRAS Datensatzes. Dementsprechend wurden für die Wintersaisons 1951/1952 bis 2019/2020 für die sieben Kanalabschnitte die Kategorien anhand der Winterkältesummen und der Anzahl der Eistage abgeleitet.

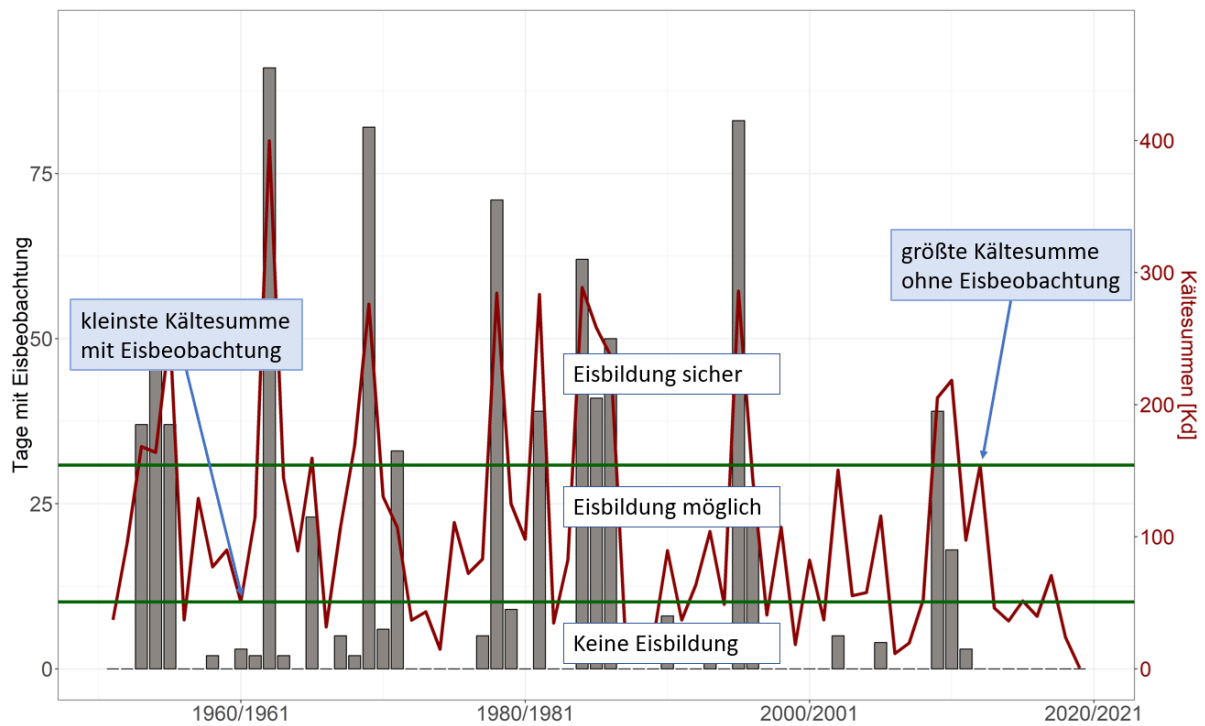


Abbildung 4: Festlegung von Kältesummen-Kategorien am Beispiel Rendsburg-Fischerhütte.

Wird davon ausgegangen, dass die festgesetzten Grenzen der drei Kategorien auch in der Zukunft gültig sind, so lassen sich anhand der Klimaprojektionen Aussagen über das Auftreten von Eiswintern in der Zukunft treffen (siehe Kapitel 3).

2 Auswertung der historischen Eisdaten

Die Auswertung der historischen Eisdaten erfolgt entlang der Kanalachse sowie an den einzelnen Stationen. Entlang der Kanalachse wird jeder Station ein Bereich zugeordnet, sodass der gesamte Kanal abgedeckt ist (siehe Tabelle 1). Punktueller Auswertungen finden an den sieben Stationen statt. Im Folgenden werden die Auswertungen beispielhaft jeweils für zwei Stationen gezeigt und erläutert. Die Grafiken der verbleibenden Stationen befinden sich im Anhang.

Abbildung 5 zeigt die Länge der Eiswinter an den sieben Beobachtungsstandorten für die Winter 1939/1940 bis 2020/2021. Hierbei symbolisiert die blaue Färbung die Anzahl der Eistage des Winters. Orangene Balken sind dann zusätzlich sichtbar, wenn die Eisdecke zeitweise unterbrochen wurde und damit der Zeitraum zwischen dem ersten und letzten Tag mit beobachtetem Eisvorkommen größer ist als die Zahl der Eistage je Winter. Erkennbar wird bei dieser Darstellung, dass die überwiegende Zahl der Winter sich am NOK nicht durch eine durchgängige Frost- bzw. Eisperiode auszeichnet, sondern sich typischerweise Frost- und Tauwetterperioden über den Winter abwechseln. Damit liegen zwischen dem ersten und letzten Auftreten von Eis zu meist ein oder mehrere eisfreie Perioden. Im zeitlichen Verlauf (von links nach rechts) erkennt man zudem, dass die Winter zu Beginn der Aufzeichnung länger anhaltende Eisbedeckungen aufwiesen als in der jüngeren Vergangenheit sowie, dass Eis regelmäßiger vorkam. Dabei scheinen auf der betrachteten räumlichen Skala (Kanalabschnitte) Einflüsse wie Salzgehalt, Wind, Strömung oder Wasserstandsänderung keinen signifikanten Einfluss auf die Eisbildung zu haben. Die Zahl der Eistage fällt an den Stationen recht ähnlich aus. Ein West-Ost Gefälle, welches auf die Beeinflussung veränderter meteorologischer Bedingungen und zunehmend kontinentalen Klima hinweisen würde, ist ebenfalls nicht zu sehen.



Abbildung 5: Anzahl der aufgezeichneten Eistage an den sieben Beobachtungsstationen am NOK.

Die Darstellung der maximalen Eisdicke entlang der Kanalachse zeigt ebenfalls nur eine minimale Variation der Eisdicke im Längsschnitt (Abbildung 6). Die Unterschiede zwischen den einzelnen Wintern sind dabei deutlich stärker ausgeprägt. In wenigen Jahren ist die Eisschicht außerhalb des Kanals (Stationen Brunsbüttel Elbe und Kiel Binnenhafen) dicker als im Kanal.

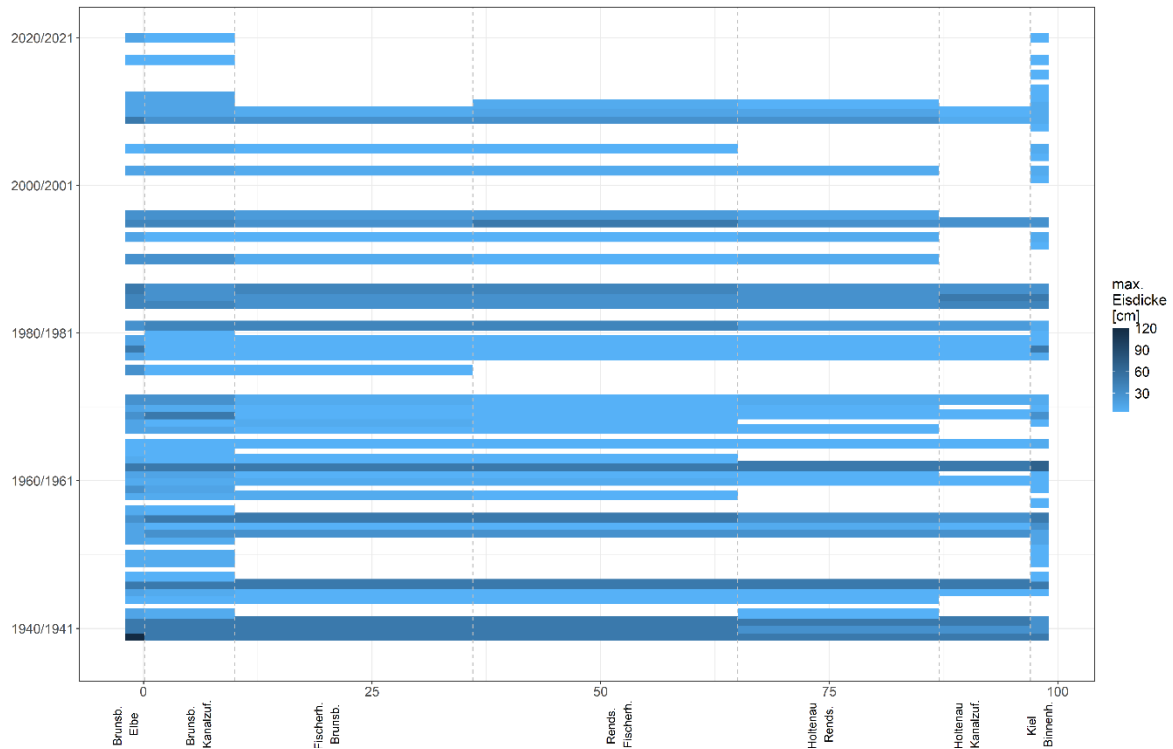


Abbildung 6: Maximale (kodierte) Eisdicke entlang der Kanalachse für die Winter 1939/1940 bis 2020/2021.

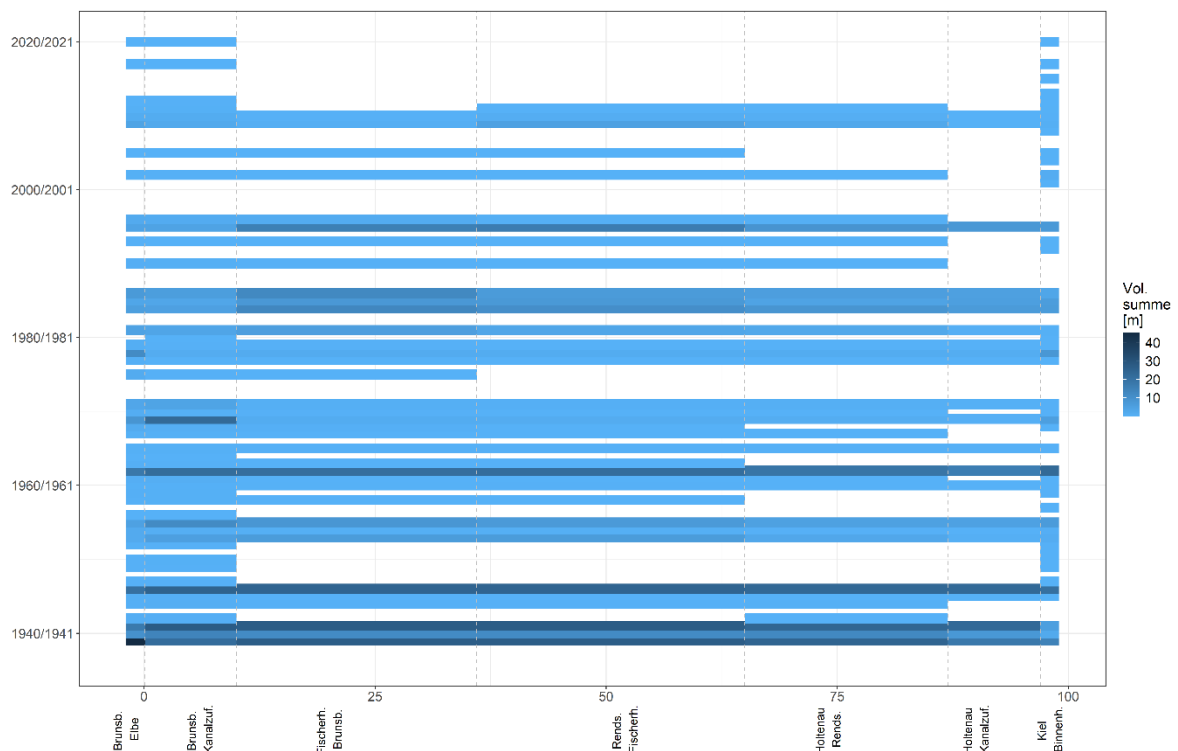


Abbildung 7: Volumensumme [m] der Eisbedeckung entlang der Kanalachse für die Winter 1939/1940 bis 2020/2021.

Wird die Volumensumme betrachtet, so zeigt sich ein ähnliches Bild (Abbildung 7). Volumensummen bis zu 45,5 m ergaben sich im Winter 1939/40 entlang der gesamten Kanalachse. In jüngerer Vergangenheit wurden tendenziell geringere Volumensummen aufgezeichnet, wobei die Eibedeckung auch nicht den gesamten Kanal beeinträchtigte.

Wird die Anzahl an Eistagen als gleitendes 30-jähriges Mittel betrachtet, lässt sich für alle Stationen ein ähnlicher Trend ablesen (Abbildung 8). Generell wird ersichtlich, 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.

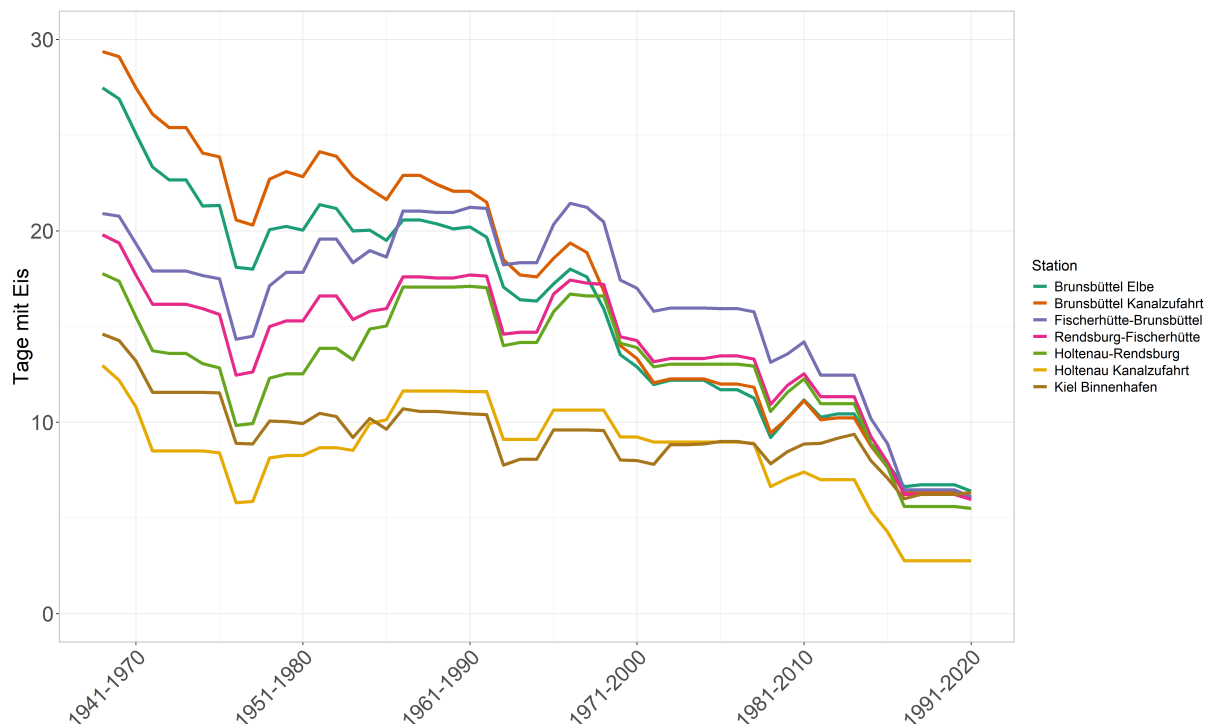


Abbildung 8: Anzahl der Tage mit Eis als gleitendes 30-jähriges Mittel, dargestellt für alle Stationen entlang des NOK.

Abbildung 9 stellt das Eisvorkommen auf einer Jahresuhr dar, um eine übersichtliche zeitliche Einordnung vornehmen zu können. Dabei zeigen die vollen Stunden der Jahresuhr jeweils den Monatsbeginn an (12 Uhr entspricht 1. Januar; 15 Uhr entspricht 1. April, etc.) und die einzelnen Wintersaisons sind vom inneren Ring 1939/40 nach außen fortlaufend aufgetragen.

Die Eisbildung am NOK beginnt typischerweise 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, Kiel Binnenhafen) der früheste Eisbeginn. Das späteste Ende der Eissaison lag im Winter 1941/42 am 05. April (Brunsbüttel Kanalzufahrt, Fischerhütte - Brunsbüttel, Rendsburg-Fischerhütte, Holtenau-Rendsburg).

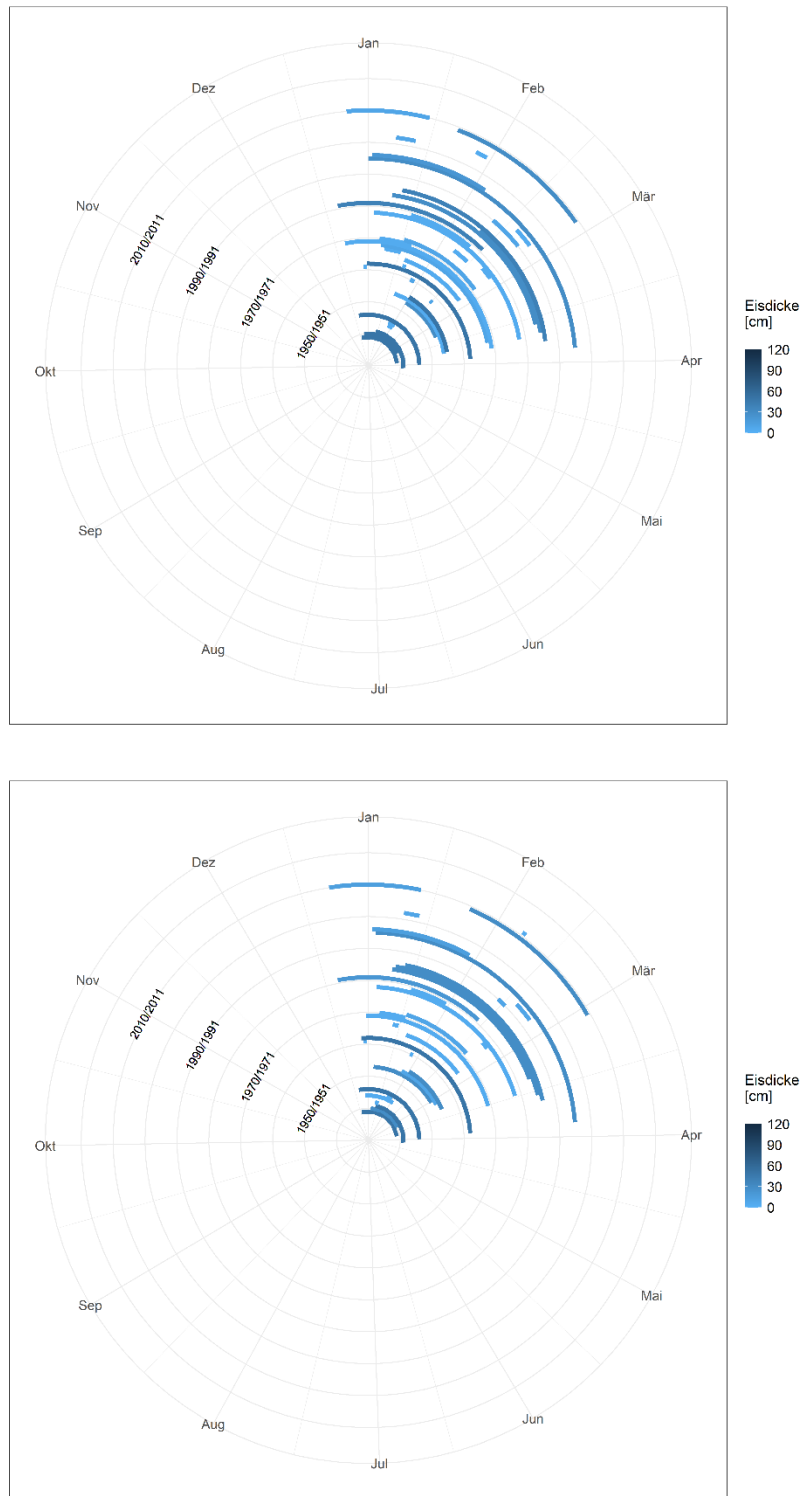


Abbildung 9: Saisonlänge der Eiswinter in Fischerhütte-Brunsbüttel Kanal (oben) und Holtenau-Rendsburg Kanal (unten). Die Blaufärbung zeigt die kodierte maximale Eisdicke.

Ob und wie massiv die Schifffahrt durch die Eisbedeckung beeinträchtigt wurde, lässt sich bei der Betrachtung des Baltic Sea Code (BSIC) feststellen (siehe Tabelle 2) (BSIS, 2025). Der BSIC beschreibt die eisbedingten Fahrwasserverhältnisse über einen neunstufigen Schlüssel, wobei die Stärke der Eisbeeinträchtigung mit steigender Codezahl anwächst. Abbildung 10 zeigt, dass der Baltic Sea Ice Code KB1 bis KB3 in nahezu allen Eiswintern gemeldet wird (KB1 = Beeinträchtigung für hölzerne Schiffe ohne Eisschutz, KB3 = Navigation ohne Hilfe von Eisbrecher

nur für leistungsstarke, stabil konstruierte Schiffe welche für Eisnavigation geeignet sind möglich).



Abbildung 10: Beeinträchtigung der Seeschifffahrt nach Baltic Sea Ice Code. KB1: Beeinträchtigung für hölzerne Schiffe ohne Eisschutz, KB9: Navigation beendet, weiteres siehe Tabelle 2.

Tabelle 2: Baltic Sea Ice Codes und Bedeutung (adaptiert aus <https://www.bsis-ice.de/material/schlüssel.pdf>)

KB	Navigation conditions on ice
0	Navigation unobstructed
1	Navigation difficult or dangerous for wooden vessels without ice sheathing
2	Navigation difficult for unstrengthened or low-powered vessels built of iron or steel. Navigation for wooden vessels even with ice sheathing not advisable
3	Navigation without icebreaker assistance possible only for high-powered vessels of strong construction and suitable for navigation in ice
4	Navigation proceeds in lead or broken ice-channel without the assistance of an icebreaker
5	Icebreaker assistance can only be given to vessels suitable for navigation in ice and of special size
6	Icebreaker assistance can only be given to vessels of special ice class and of special size
7	Icebreaker assistance can only be given to vessels after special permission size
8	Navigation temporarily closed
9	Navigation has ceased
/	Unknown

Der Ice Code KB7 ist der höchste Code, der für längere Zeiträume gemeldet wurde. KB7 bedeutet, dass die Unterstützung durch Eisbrecher wird nur für Schiffe mit bestimmter Größe freigegeben wird. KB7 wurde im Winter 1955/1956 vermehrt gemeldet (Eisdicke bis 50 cm, bis zu 51 Eistage). KB 9 wurde nur an der Station Brunsbüttel Elbe für den Winter 1939/1940 für einen Tag gemeldet (Schiffahrt eingestellt).

2.1 Analyse des Zusammenhangs zwischen Kältesumme und Eiswinter

Die Erstellung der Kältesummen erfolgte für den Zeitraum 1951/52 bis 2019/20 und ist durch die Verfügbarkeit von HYRAS Temperaturdaten bestimmt. Abbildung 11 zeigt die Entwicklung der Kältesummen an den Stationen sowie für den gesamten NOK anhand 30-jähriger gleitender Mittelwerte. Ist der gesamte Verlauf bei allen Stationen insgesamt ähnlich, so sind doch regionale Differenzen zwischen den Stationen erkennbar. Die Stationen im Westen des NOK weisen tendenziell etwas höhere Kältesummen auf. An allen Stationen zeigt sich in den 69 Wintersaisons eine deutliche Abnahme der Kältesummen.

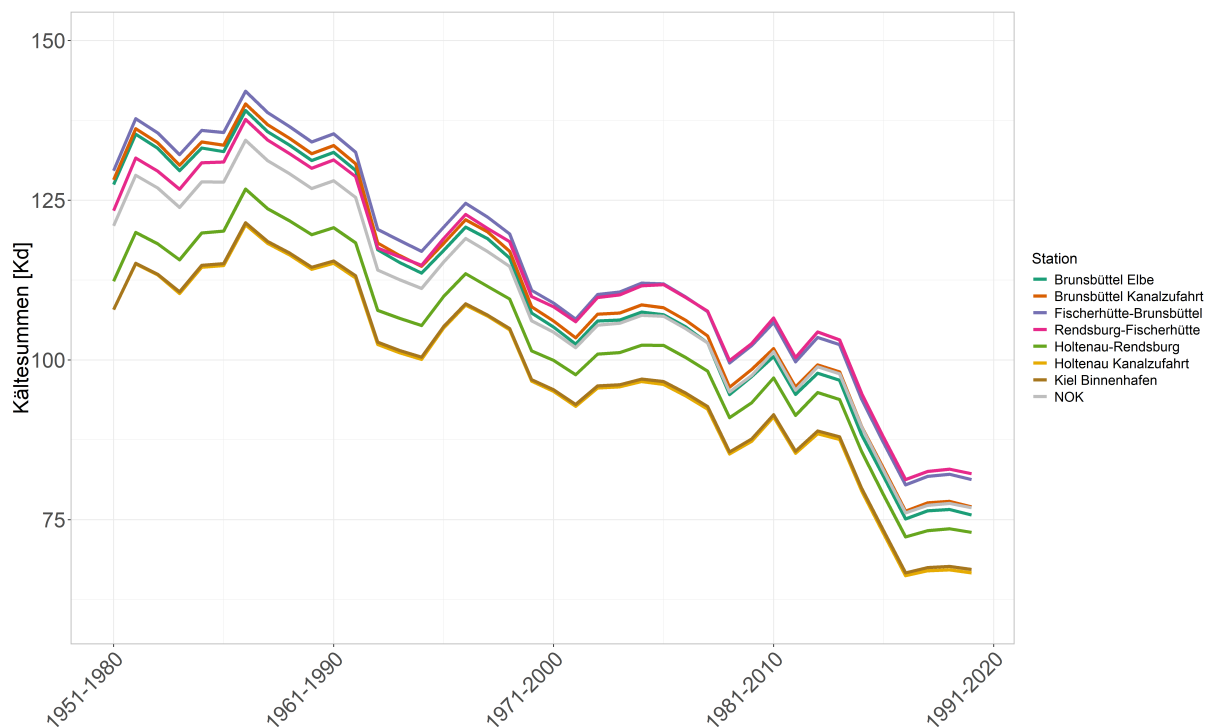


Abbildung 11: 30-jähriges Mittel der Kältesummen für die Stationen sowie gemittelt für den gesamten NOK.

Abbildung 12 zeigt die Kältesummen-Kategorien für die Stationen Fischerhütte – Brunsbüttel und Holtenau – Rendsburg. Zwar werden Unterschiede in der Anzahl der Eistage erkennbar, aber der Verlauf der Kältesummen über die Winter ist an beiden Stationen sehr ähnlich. Die Kategorien „keine Eisbildung“, „Eisbildung möglich“ und „Eisbildung sicher“ konnten dementsprechend festgelegt werden (horizontale Linien, Vergleich Abschnitt 1.3).

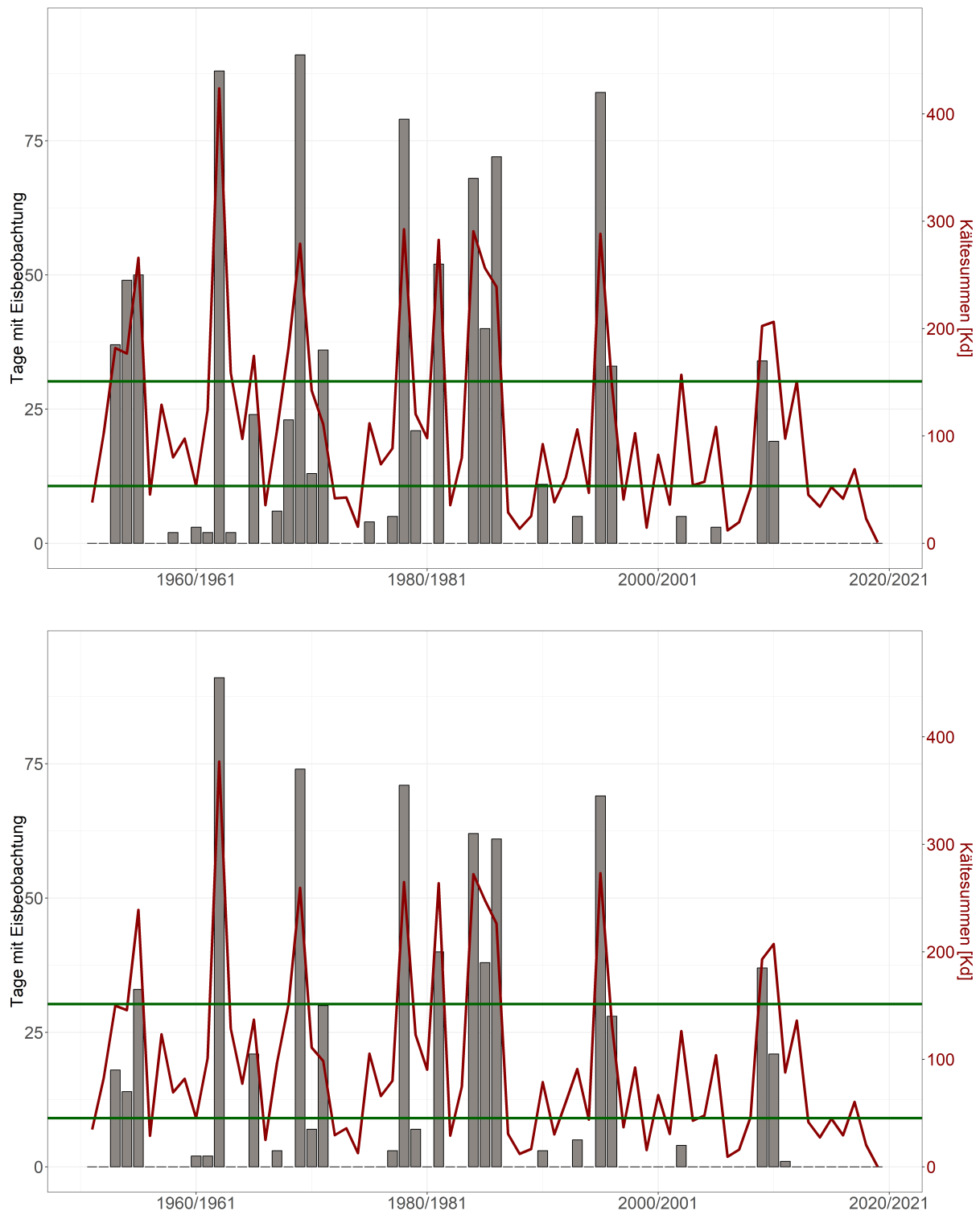


Abbildung 12: Darstellung der Tage mit Eisbeobachtung (Säulen) und der Kältesummen (Linie) für die Stationen Fischerhütte – Brunsbüttel (oben) und Holtenau – Rendsburg (unten). Die Einteilung in die Kategorien „keine Eisbildung“, „Eisbildung möglich“ und „Eisbildung sicher“ ist mit horizontalen Linien gekennzeichnet.

Tabelle 3 zeigt, dass die Kältesummen, die die Kategorie „Eisbildung sicher“ definiert, an den Kanalabschnitten zwischen 124,1 Kd und 154,2 Kd variiert. Für die Grenze zwischen „keine Eisbildung“ und „Eisbildung möglich“ ergeben sich Kältesummen zwischen 27,8 Kd und 53,4 Kd.

Tabelle 3: Kategoriebildende Kältesummen sowie die maximal aufgetretene Winterkältesumme für die Kanalabschnitte entlang des NOK

Kanalabschnitt	Kältesumme Untere Grenze – Eis möglich	Kältesumme Untere Grenze – Eis sicher	Maximale Kältesumme
Brunsbüttel, Elbe	46,4	124,5	429,8
Brunsbüttel, Kanalzufahrt	46,1	124,1	429,0
Fischerhütte - Brunsbüttel	53,4	150,8	423,6
Rendsburg-Fischerhütte	50,6	154,2	399,7
Holtenau-Rendsburg	45,4	151,4	377,0
Holtenau Kanalzufahrt	43,8	149,2	369,4
Kiel, Binnenhafen	27,8	128,2	369,9
NOK Gesamt	32,7	97,2	400,8

Wird der Gesamtzeitraum von 69 Wintern betrachtet, ist der Anteil an Wintern in der Kategorie „Eisbildung sicher“ in allen Kanalabschnitten gering und variiert zwischen 11 (Holtenau - Rendsburg) bis 20 (Brunsbüttel Elbe, Brunsbüttel Kanalzufahrt) Wintern (Abbildung 13). Im westlichen Teil des NOK wird die Kategorie „Eisbildung sicher“ tendenziell häufiger erfüllt, während in den mittleren Kanalabschnitten der eisfreie Winter stärker vertreten ist.

Die Kategorie „Eistage möglich“ weist mit Werten zwischen 78 Kd und 106 Kd eine große Bandbreite auf. Die Große Variabilität der Kältesummen bedeutet, dass ein großer Anteil an Wintern in diese Kategorie fallen kann. In dem Referenzzeitraum fallen zwischen 26 (Brunsbüttel Elbe und Brunsbüttel Kanalzufahrt) bis 40 (Kiel Binnenhafen) Winter in die Kategorie „Eisbildung möglich“ (38% bis 58%). Wird das Eisvorkommen in der Kategorie „Eisbildung möglich“ explizit ausgewertet (Abbildung 13, rechts), ist erkennbar, dass im westlichen Teil des NOK sowie an der Station „Kiel Binnenhafen“ mehrheitlich Eis in dieser Winterkategorie aufgetreten. In der Kanalmitte wurden Winter der Kategorie „Eisbildung möglich“ eher von eisfreien Wintern bestimmt.

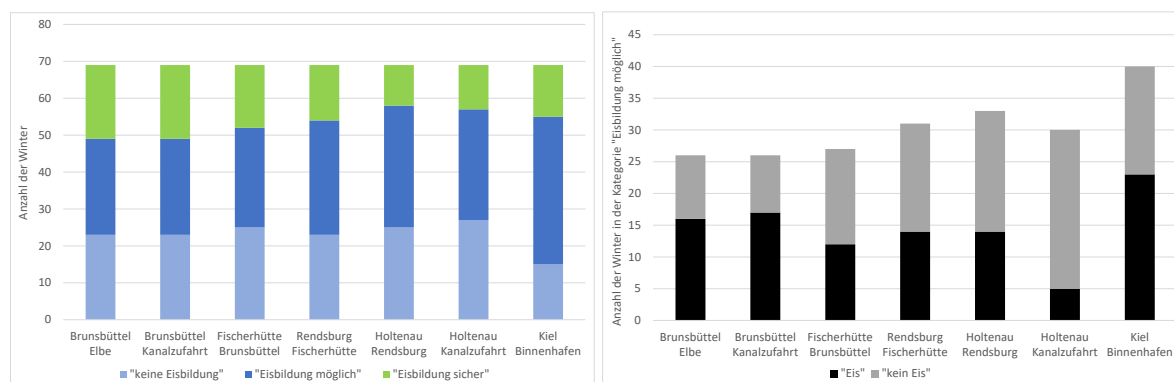


Abbildung 13: Auszählung der Kältesummen Kategorien der vergangenen Winter (links), Verteilung des tatsächlichen Eisauftretens in der Kategorie „Eisbildung möglich“ (rechts).

3 Auswertung von Klimaprojektionen

3.1 Projizierte Entwicklung der Eisvorkommen

Um die Entwicklung des Eisvorkommens in der Zukunft zu untersuchen, wurde der in den vorangegangenen Kapiteln bereits vorgestellte Kältesummen-Ansatz genutzt. Analog zur Bestimmung der Kältesummen der Vergangenheit, erfolgte auch für die Klimaszenarien die Bestimmung der Winterkältesummen (zwischen November und März). Anhand der für die Vergangenheit bestimmten Kältesummen – Kategorien wurden dann die projizierten Daten klassifiziert. Dabei wurde die originäre Kategorie „Eisbildung möglich“ der Kategorie „Eisbildung sicher“ zugezählt. Dies bedeutet, dass in den Projektionen ein möglicher Eiswinter klassifiziert wird, sofern die untere Grenze der Kategorie 1 „Eisbildung möglich“ überschritten ist. Mit dieser Festlegung wird vermieden, dass die Zahl eisfreier Winter eher auf der „sicheren Seite“ und nicht zu hoch angesetzt wird.

Abbildung 14 zeigt die mögliche Entwicklung der Eiswinter für das Klimaszenario RCP 8.5 (geringer Erfolg von Klimaschutzmaßnahmen). Gezeigt wird der gleitende Median (50. Perzentil) über einen 30-jährigen Zeitraum. Die Einfärbung des Bandes stellt die Verteilung der einzelnen Ensemblemitglieder dar. Diese gesamte Bandbreite ist damit auch eine Maß für die unvermeidliche Unschärfe der Aussage auf Grund der Variationen der Klimaprojektionen. Es ist dennoch klar ersichtlich, dass bei geringem Erfolg von Klimaschutzmaßnahmen das Eisvorkommen in den nächsten Jahrzehnten signifikant weiter abnehmen und der NOK im Winter weitgehend eisfrei bleiben könnte.

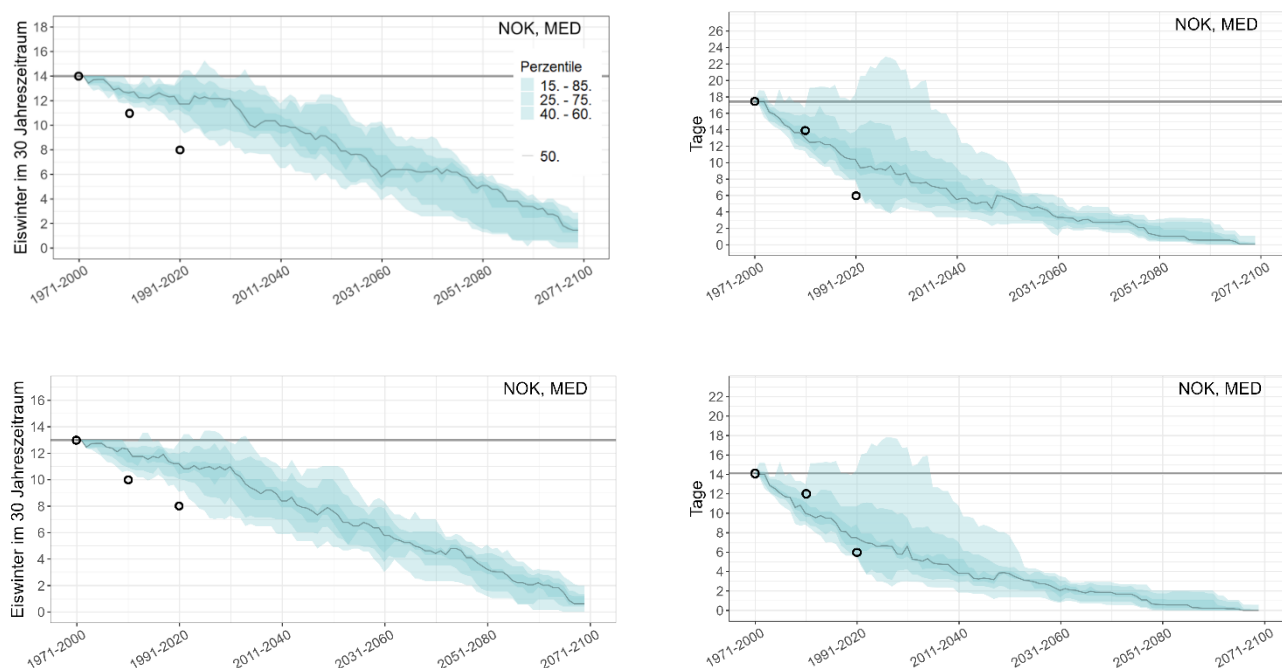


Abbildung 14: RCP 8.5, Anzahl der Eiswinter im 30 Jahreszeitraum (links) und Anzahl an Eistagen (rechts) für Fischenhütte – Brunsbüttel (oben), Holtenau – Rendsburg (unten). Die im Referenzzeitraum gemessenen Eisvorkommen sind mit schwarzen Kreisen markiert.

Vergleicht man die Klimaszenarien RCP 8.5, RCP 4.5 und RCP 2.6 untereinander so wird ersichtlich, wie sich die Klimaschutzmaßnahmen auf das Eisvorkommen auf dem NOK auswirken können. 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 schwarze Kreise in Abbildung 14). 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 (siehe oben, Abbildung 13), was zu einer Überschätzung der Eiswinter führen kann.

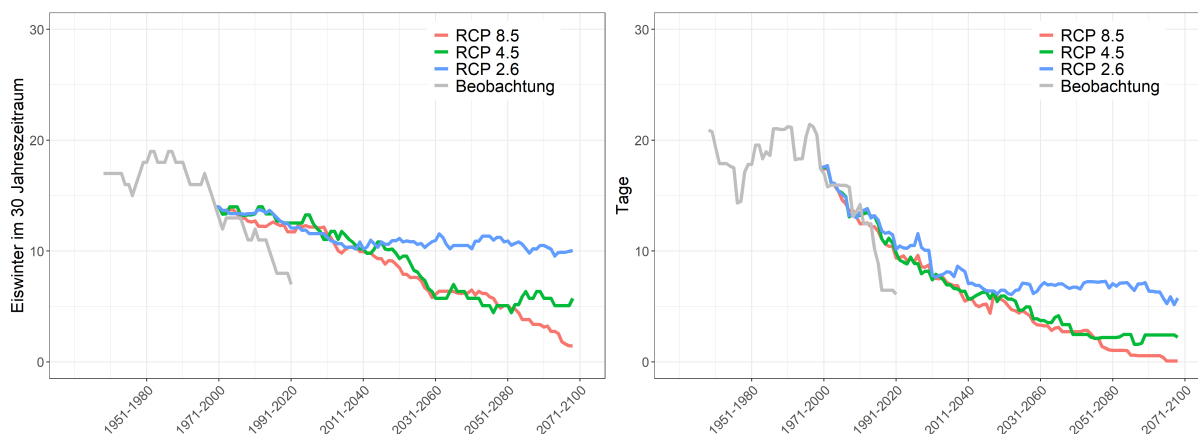


Abbildung 15: Fischerhütte – Brunsbüttel, Vergleich der 30-jährigen Mediane der RCPs mit dem 30-jährigen Mittel der Beobachtung für Anzahl der Eiswinter (links) sowie Anzahl der Eistage (rechts).

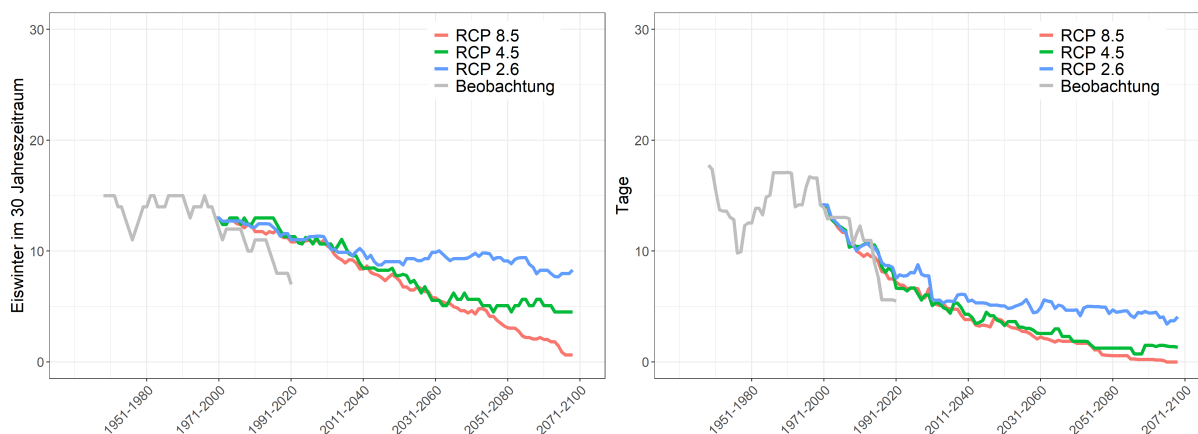


Abbildung 16: Rendsburg – Holtenau, Vergleich der 30-jährigen Mediane der RCPs mit dem 30-jährigen Mittel der Beobachtung für Anzahl der Eiswinter (links) sowie Anzahl der Eistage (rechts).

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. Es ist jedoch festzuhalten, dass, wenn möglicherweise auch seltener, so doch auch zukünftig mit markanten Eiswintern am NOK zu rechnen ist.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht über die westlich gelegenen Eisstationen der deutschen Bucht. Blau umrandet sind die für die Analyse des Eisvorkommens am NOK genutzten Stationen, rot umrandet die zum Auffüllen der Datenlücke genutzte Station Brunsbüttel – Rendsburg. Adaptiert aus (BSH, 2018) https://www2.bsh.de/aktdat/eisdienst/Statistik/IceStat.html , Abruf: Mai 2025.	9
Abbildung 2: Lage der selektierten Stationen mit Eisbeobachtungen im / am NOK vor dem Hintergrund hydrometeorologischer Rasterdaten (5 km x 5 km) und des Polygons zur Rasterdatenselektion	10
Abbildung 3: Korrelationen der Kältesumme mit Tagen der Eisbeobachtung. Die Korrelationskoeffizienten sind $r^2 = 0,886$; $r^2 = 0,884$ für Fischerhütte – Brunsbüttel (oben) und Holtenau – Rendsburg (unten).	11
Abbildung 4: Festlegung von Kältesummen-Kategorien am Beispiel Rendsburg-Fischerhütte.	13
Abbildung 5: Anzahl der aufgezeichneten Eistage an den sieben Beobachtungsstationen am NOK.	14
Abbildung 6: Maximale (kodierte) Eisdicke entlang der Kanalachse für die Winter 1939/1940 bis 2020/2021.	15
Abbildung 7: Volumensumme [m] der Eisbedeckung entlang der Kanalachse für die Winter 1939/1940 bis 2020/2021.	15
Abbildung 8: Anzahl der Tage mit Eis als gleitendes 30-jähriges Mittel, dargestellt für alle Stationen entlang des NOK.	16
Abbildung 9: Saisonlänge der Eiswinter in Fischerhütte-Brunsbüttel Kanal (oben) und Holtenau-Rendsburg Kanal (unten). Die Blaufärbung zeigt die kodierte maximale Eisdicke.	17
Abbildung 10: Beeinträchtigung der Seeschifffahrt nach Baltic Sea Ice Code. KB1: Beeinträchtigung für hölzerne Schiffe ohne Eisschutz, KB9: Navigation beendet, weiteres siehe Tabelle 2.	18
Abbildung 11: 30-jähriges Mittel der Kältesummen für die Stationen sowie gemittelt für den gesamten NOK.	19
Abbildung 12: Darstellung der Tage mit Eisbeobachtung (Säulen) und der Kältesummen (Linie) für die Stationen Fischerhütte – Brunsbüttel (oben) und Holtenau – Rendsburg (unten). Die Einteilung in die Kategorien „keine Eisbildung“, „Eisbildung möglich“ und „Eisbildung sicher“ ist mit horizontalen Linien gekennzeichnet.	20
Abbildung 13: Auszählung der Kältesummen Kategorien der vergangenen Winter (links), Verteilung des tatsächlichen Eisaufkommens in der Kategorie „Eisbildung möglich“ (rechts).	21

Abbildung 14: RCP 8.5, Anzahl der Eiswinter im 30 Jahreszeitraum (links) und Anzahl an Eistagen (rechts) für Fischerhütte – Brunsbüttel (oben), Holtenau – Rendsburg Fischerhütte (unten).	22
Abbildung 15: 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).	23
Abbildung 16: Rendsburg – Holtenau, Vergleich der 30-jährigen Mediane der RCPs mit dem 30-jährigen Mittel der Beobachtung für Anzahl der Eiswinter (links) sowie Anzahl der Eistage (rechts).	23
Abbildung 17: Saisonlänge der Eiswinter für die Saisons 1939/40 (innerer Ring) bis 2020/21 (äußerer Ring) für die Stationen entlang des NOK (Brunsbüttel, Elbe – oben; Kiel, Binnenhafen – unten). Die Blaufärbung zeigt die kodierte maximale Eisdicke.	31
Abbildung 18: Baltic Sea Ice Codes für die Stationen entlang des NOK (Brunsbüttel, Elbe – oben; Kiel, Binnenhafen – unten). Für die Erläuterung der Codes siehe Tabelle 2 in Kapitel 2.....	35
Abbildung 19: RCP 2.6, Anzahl der Eiswinter im 30 Jahreszeitraum (links) und Anzahl an Eistagen (rechts) für alle Beobachtungsstationen entlang des NOK (Brunsbüttel, Elbe – oben; Kiel, Binnenhafen – unten)	44
Abbildung 20: RCP 4.5, Anzahl der Eiswinter im 30 Jahreszeitraum (links) und Anzahl an Eistagen (rechts) für alle Beobachtungsstationen entlang des NOK (Brunsbüttel, Elbe – oben; Kiel, Binnenhafen – unten)	45
Abbildung 21: RCP 8.5, Anzahl der Eiswinter im 30 Jahreszeitraum (links) und Anzahl an Eistagen (rechts) für alle Beobachtungsstationen entlang des NOK (Brunsbüttel, Elbe – oben; Kiel, Binnenhafen – unten)	47
Abbildung 22: Vergleich der 30-jährigen Mediane der RCPs mit dem 30-jährigen Mittel der Beobachtung für Anzahl der Eiswinter (links) sowie Anzahl der Eistage (rechts).	49

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: ausgewählte Beobachtungsstationen im / am NOK.....	8
Tabelle 2: Baltic Sea Ice Codes und Bedeutung (adaptiert aus https://www.bsis-ice.de/material/schlüssel.pdf)	18
Tabelle 3: Kategoriebildende Kältesummen sowie die maximal aufgetretene Winterkältesumme für die Kanalabschnitte entlang des NOK	21

Literaturverzeichnis

BFG. (2021): *WS-Klimaportal*. [Online] 2021. [Abgerufen am 13.05.2025]

Online verfügbar unter [https://ws-](https://ws-klimaportal.bafg.de/_w_e2763909dcda4d0b83586bd976f0d3f1/#Hintergrund)

[klimaportal.bafg.de/_w_e2763909dcda4d0b83586bd976f0d3f1/#Hintergrund](https://ws-klimaportal.bafg.de/_w_e2763909dcda4d0b83586bd976f0d3f1/#Hintergrund).

BSH. (2018): [Online] 2018. [Abgerufen am 13.05.2025]

Online verfügbar unter <https://www2.bsh.de/aktdat/eisdienst/Statistik/IceStat.html>.

BSH. (2018a): [Online] 2018a. [Abgerufen am 13.05.2025]

Online verfügbar unter https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Meeresumwelt/Eis/eis_node.html.

BSIS. (2025): *Baltic Sea Ice Service*. [Online] 2025. [Abgerufen am 13.05.2025]

Online verfügbar unter <https://www.bsis-ice.de/material/schluessel.pdf>.

DWD. (2024): *Deutscher Wetterdienst*. [Online] 2024. [Abgerufen am 13.05.2025]

Online verfügbar unter

<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=101334&lv3=101382>.

HATZ, Marcus und MAURER, Thomas. (2014): *Prozessstudien über die Eisbildung auf*

Wasserstraßen und mögliche klimabedingte Änderungen. BfG. Koblenz: 2014. KLIWAS-Projekt 4.05.

10.5675/Kliwas_47/2014_4.05.

RAUTHE, M. et al. (2013): *A Central European precipitation climatology – Part I: Generation and*

validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). 2013. 10.1127/0941-2948/2013/0436.

RAZAFIMAHARO, C. et al. (2020): *New high-resolution gridded dataset of daily mean, minimum, and*

maximum temperature and relative humidity for Central Europe (HYRAS). 2020. 10.1007/s00704-020-03388-w.

VAN VUUREN, Detlef P. et al. (2011): *The representative concentration pathways: an overview*.

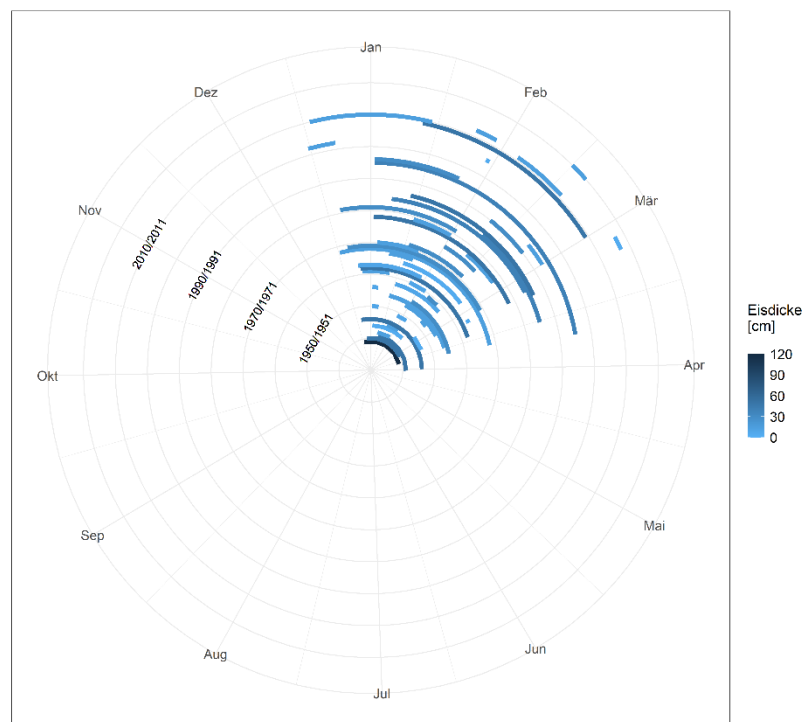
Climatic Change, 2011. 10.1007/s10584-011-0148-z.

Anhang

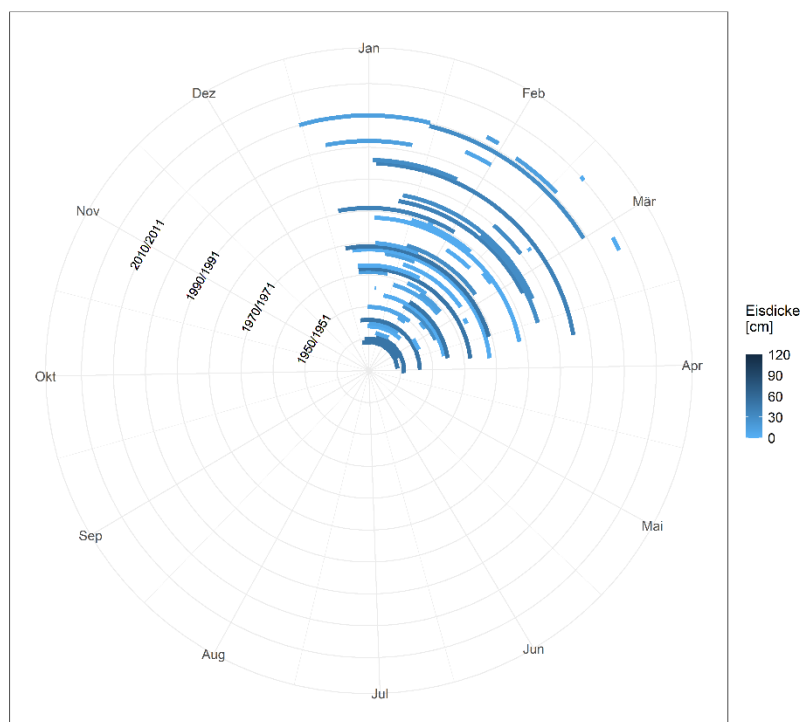
Anhang A: Grafische Auswertung der historischen Eisdaten

Saisonlänge und Eisdicke

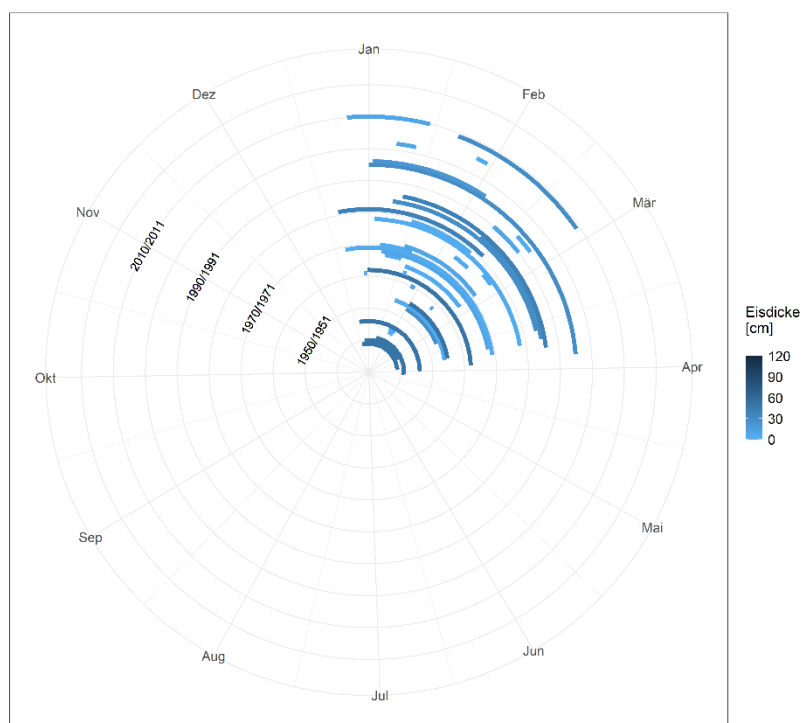
Brunsbüttel, Elbe



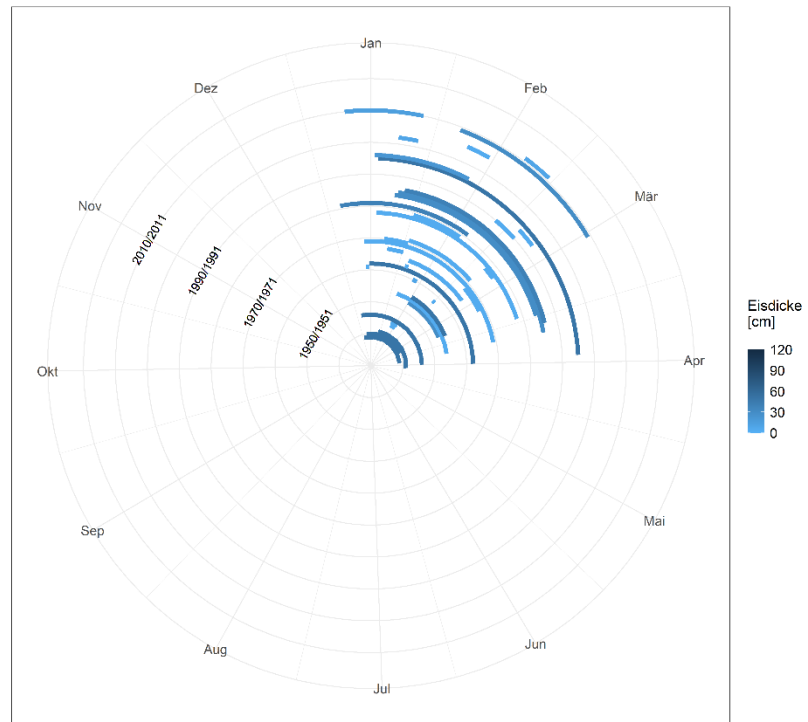
Brunsbüttel, Kanalzufahrt



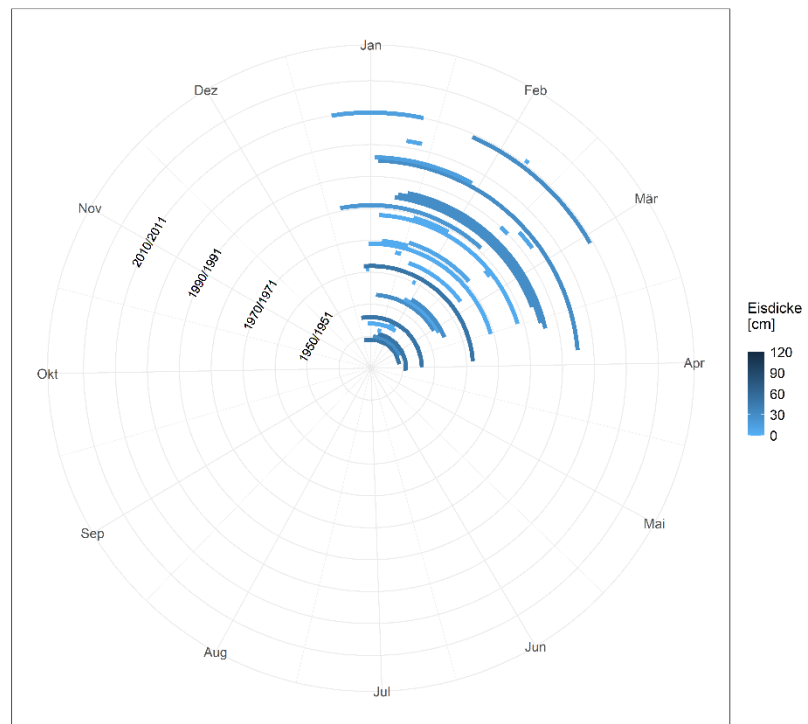
Fischerhütte – Brunsbüttel



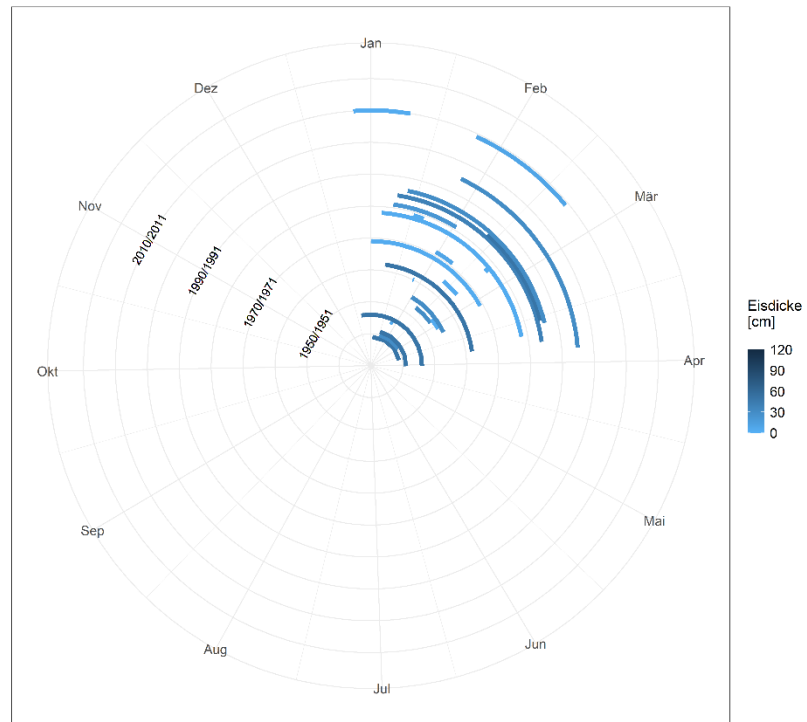
Rendsburg – Fischerhütte



Holtenau – Rendsburg



Holtenau, Kanalzufahrt



Kiel, Binnenhafen

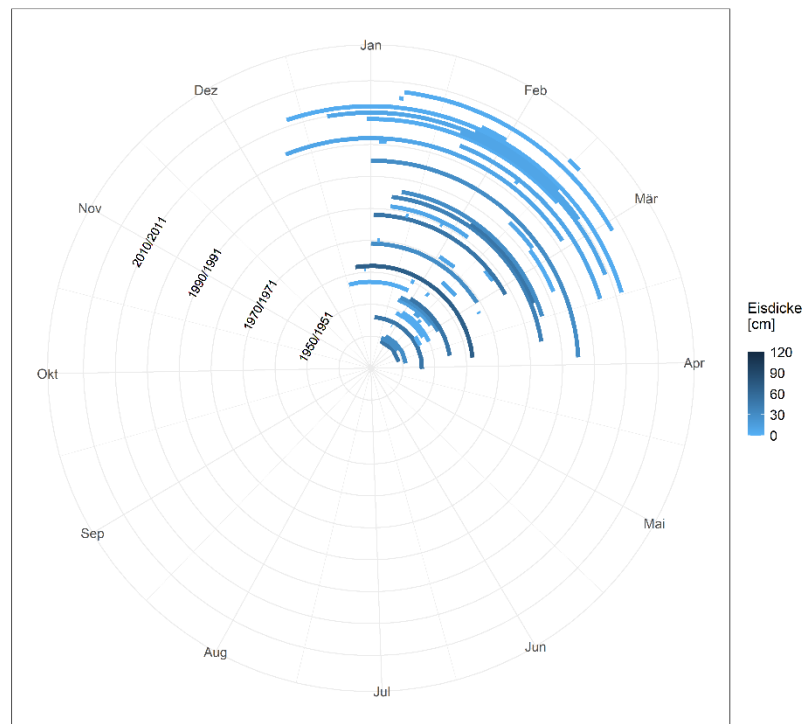
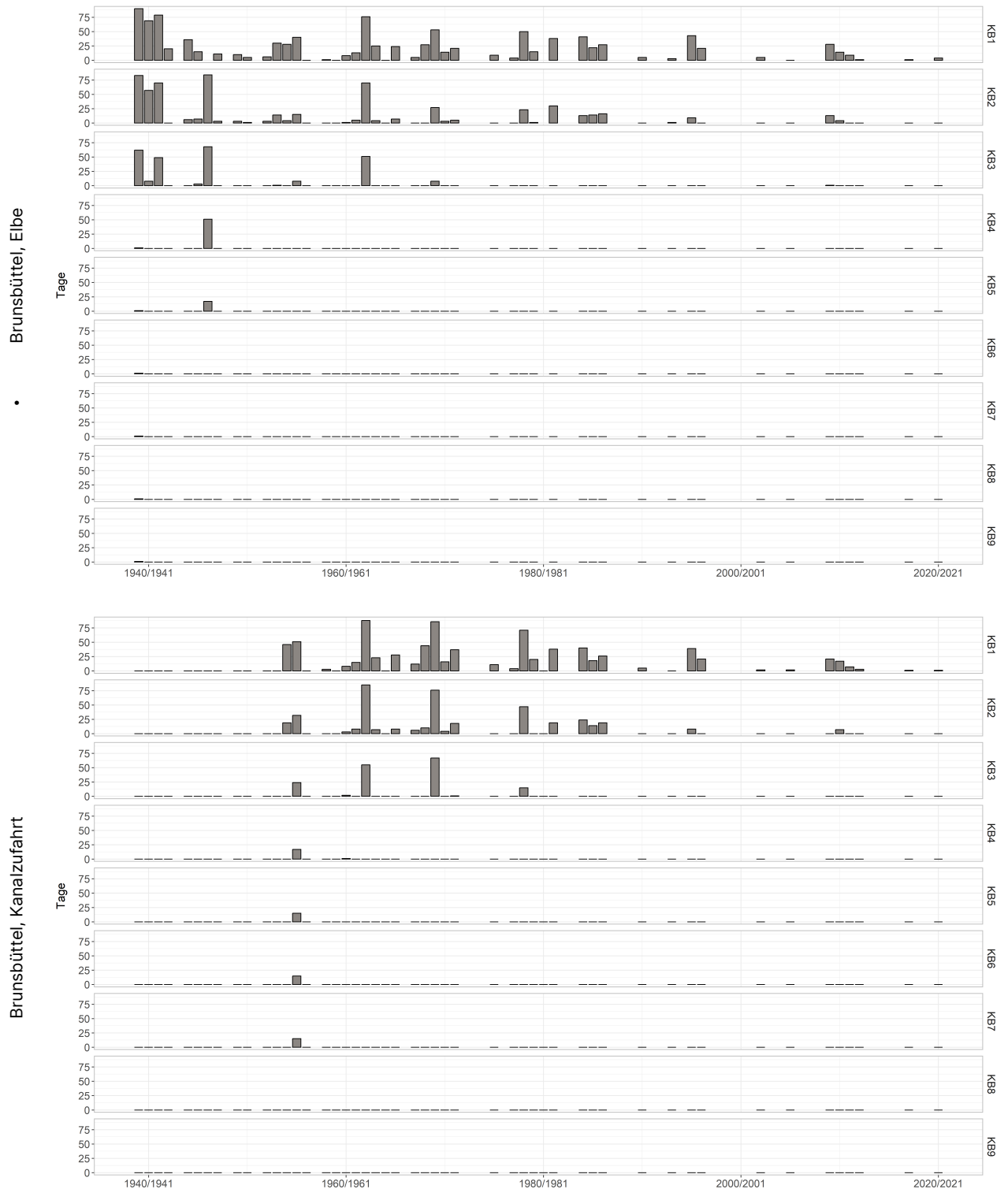
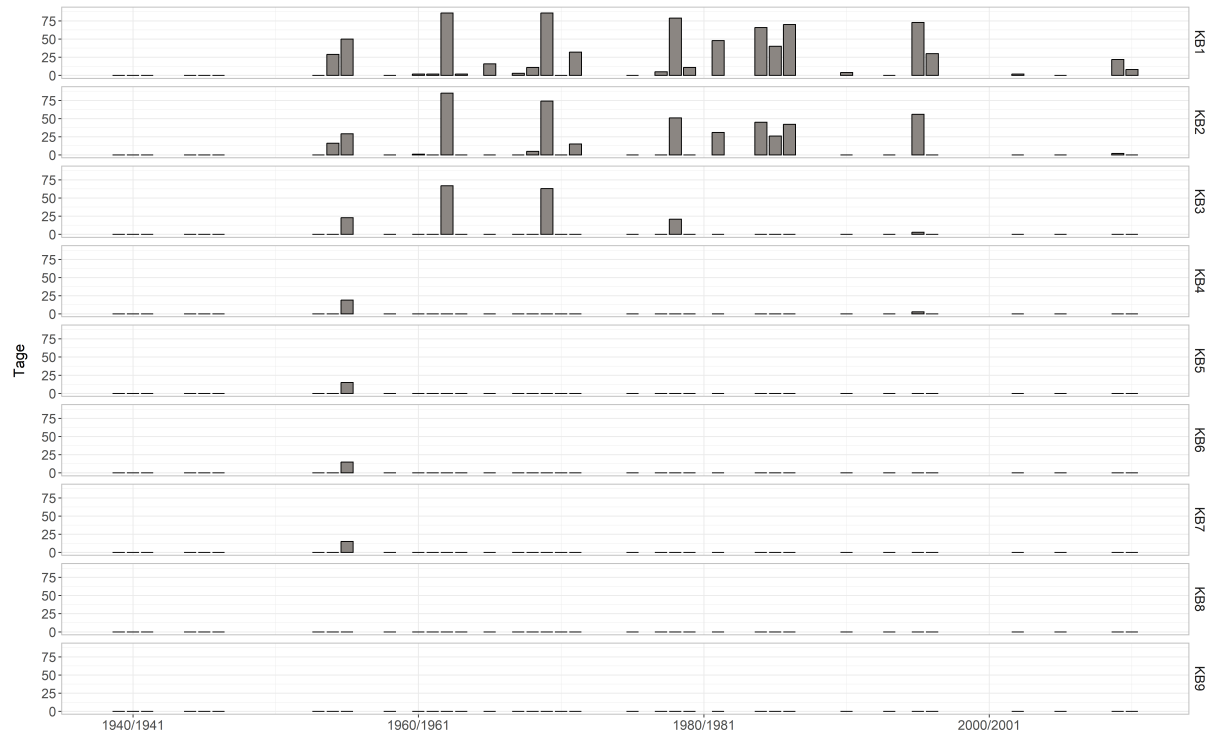


Abbildung 17: Saisonlänge der Eiswinter für die Saisons 1939/40 (innerer Ring) bis 2020/21 (äußerer Ring) für die Stationen entlang des NOK (Brunsbüttel, Elbe – oben; Kiel, Binnenhafen – unten). Die Blaufärbung zeigt die koordinierte maximale Eisdicke.

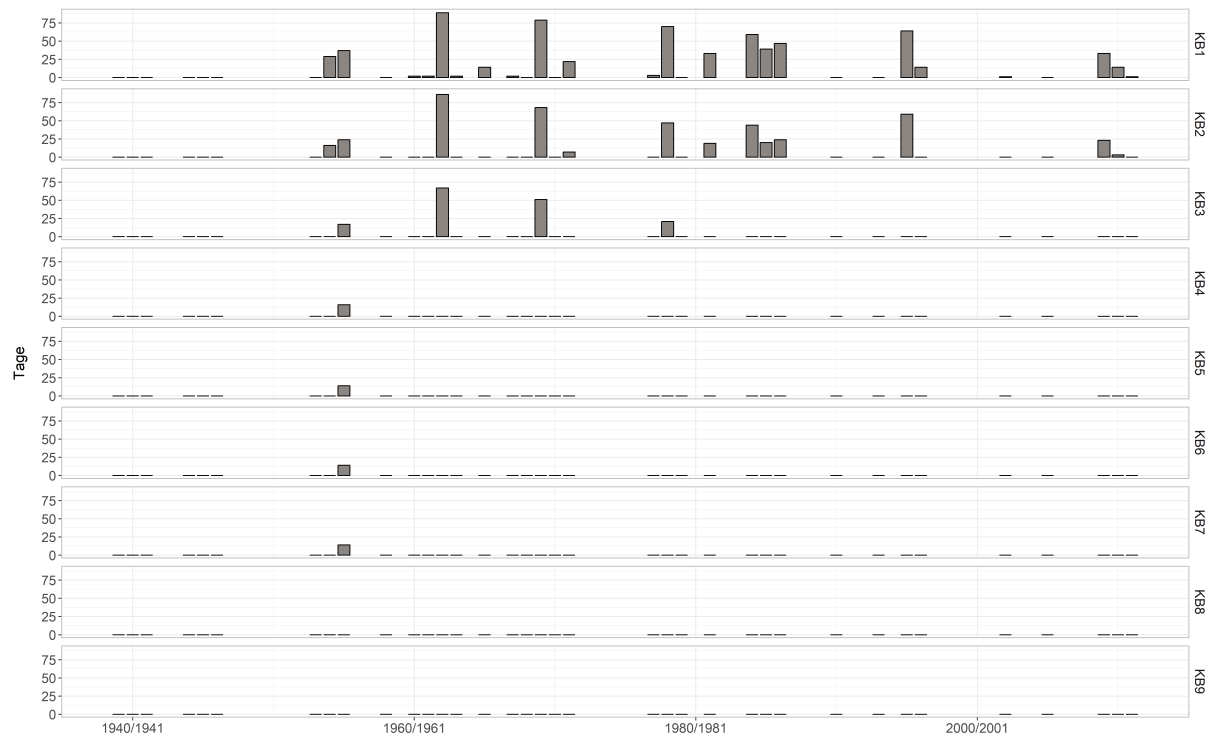
Baltic Ice Sea Codes



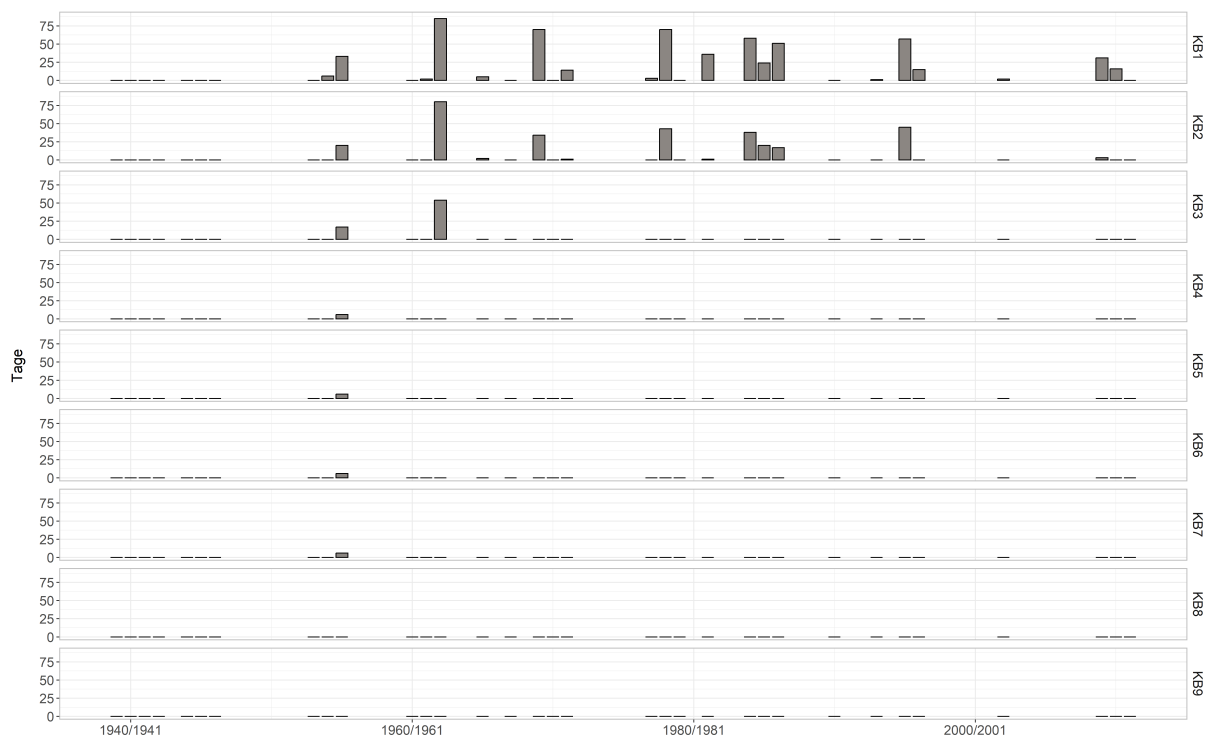
Fischerhütte – Brunsbüttel



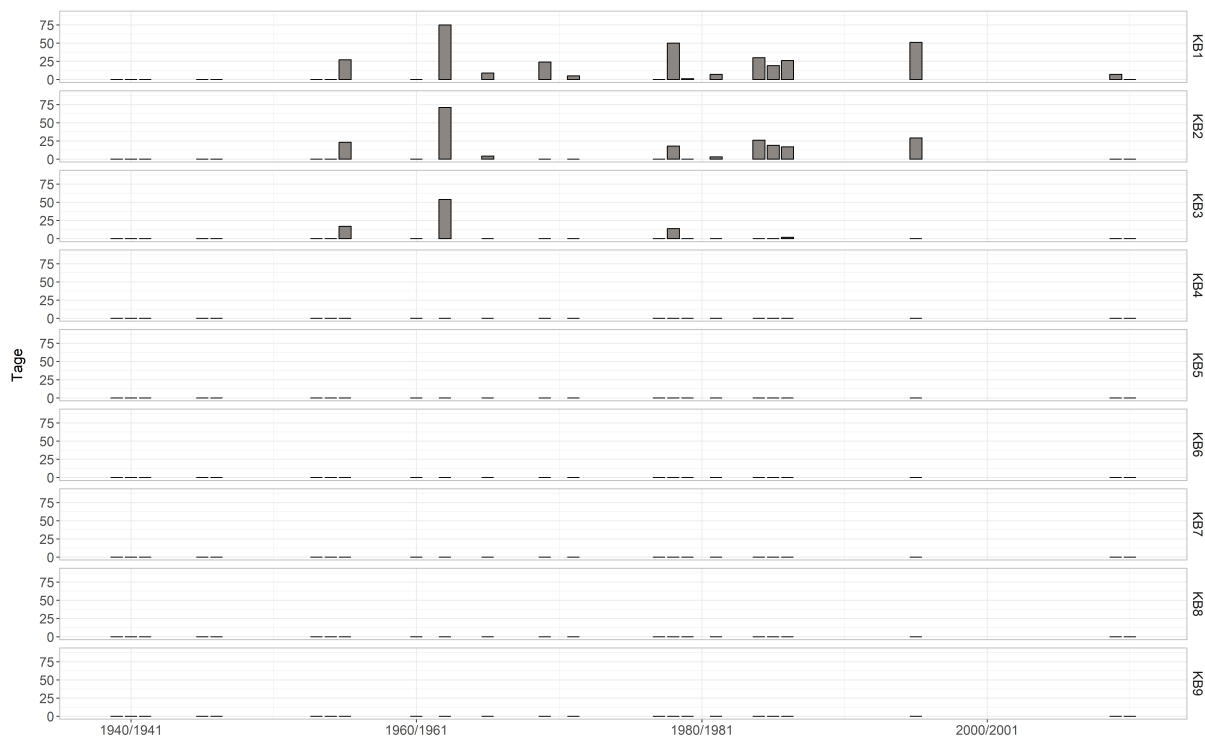
Rendsburg – Fischerhütte



Holtenau – Rendsburg



Holtenau, Kanalzufahrt



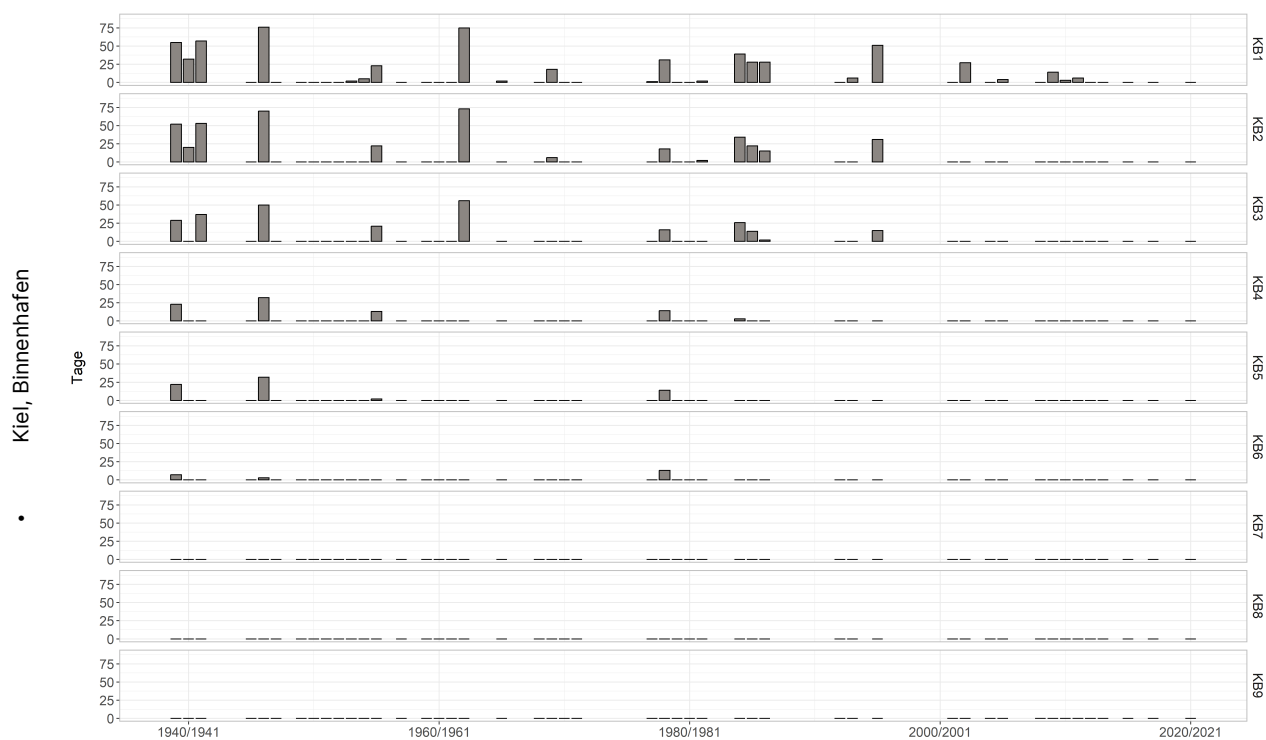
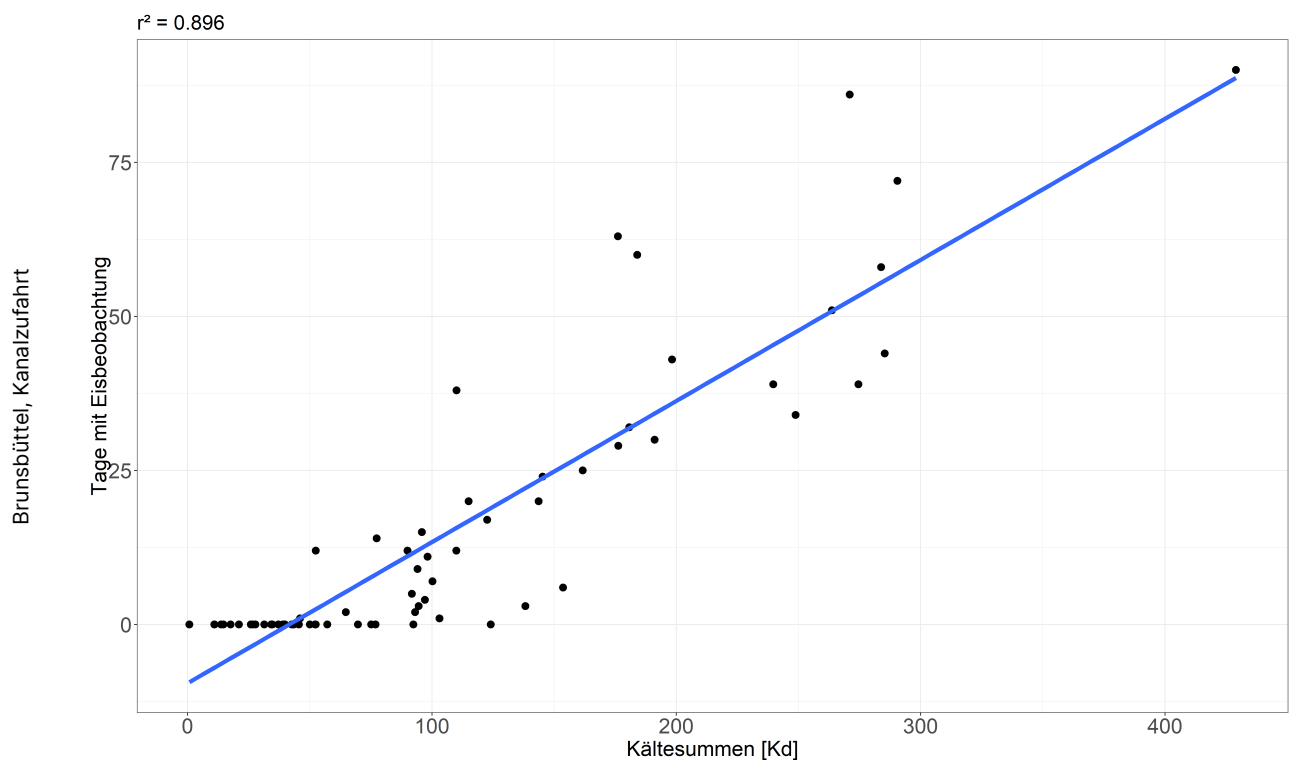
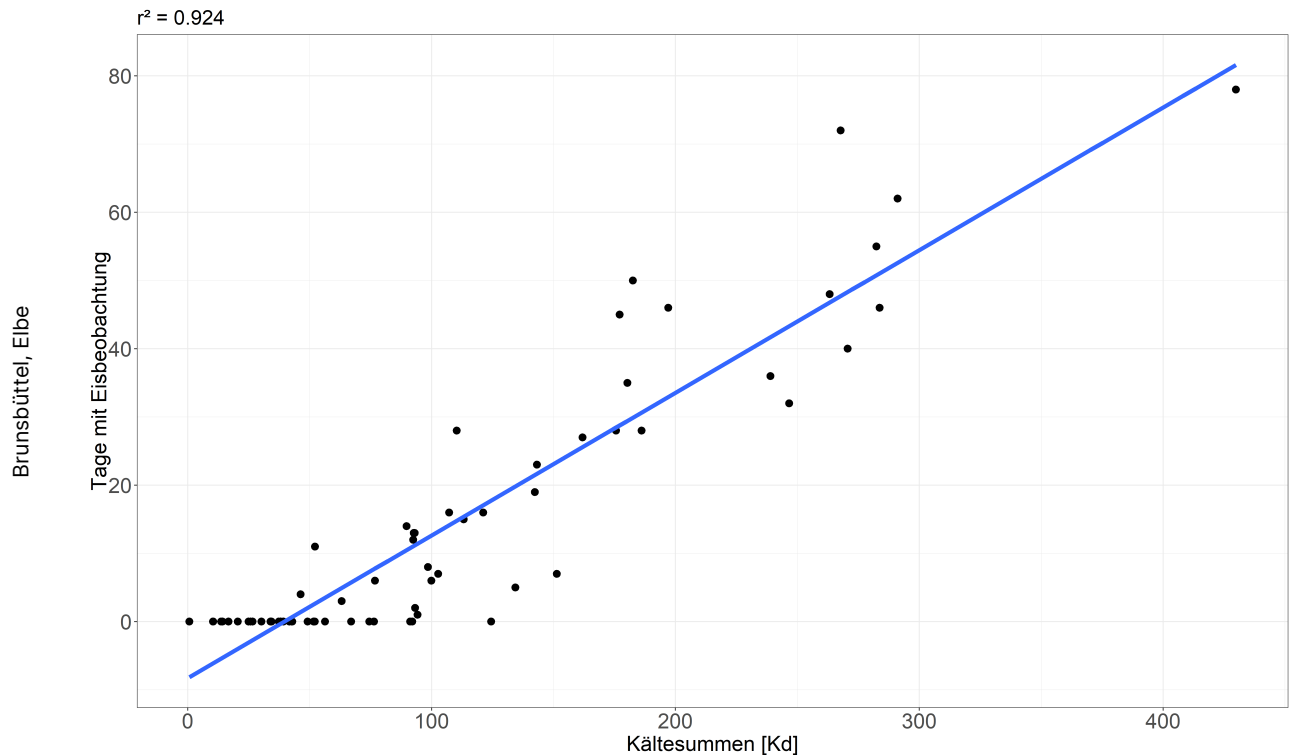
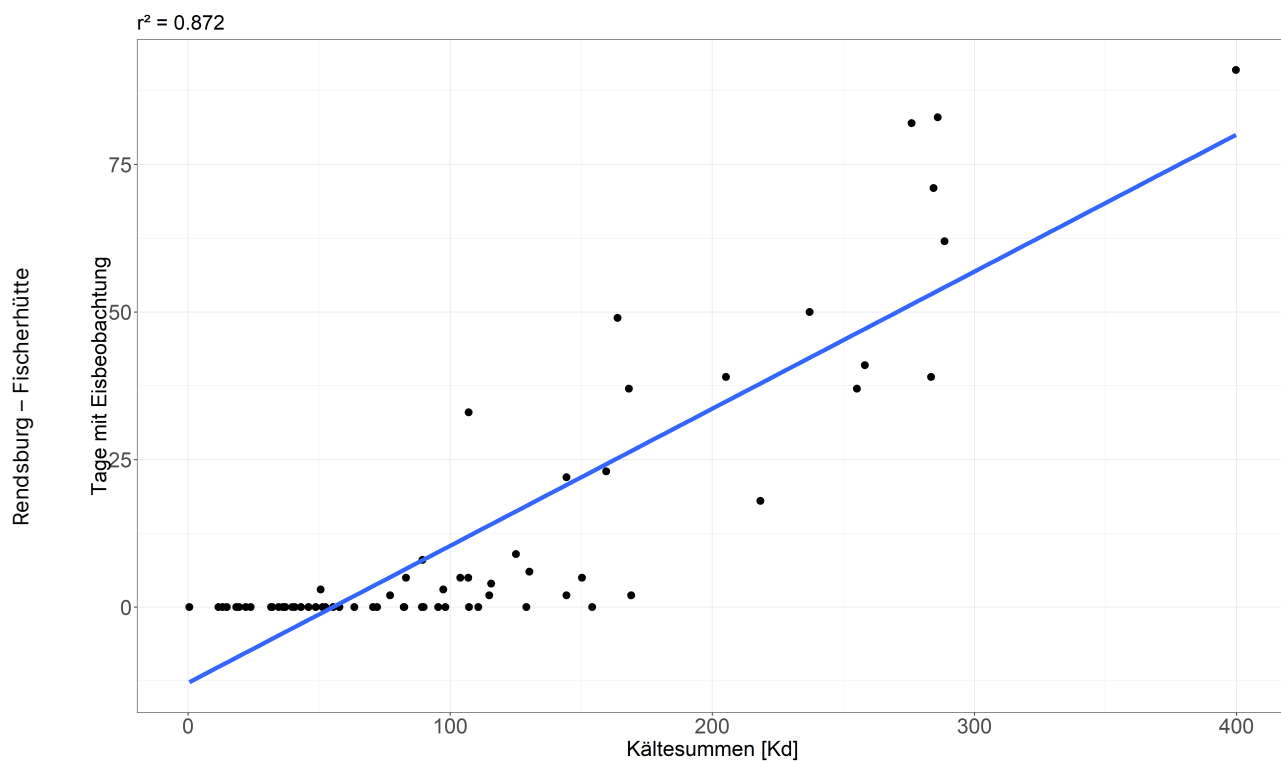
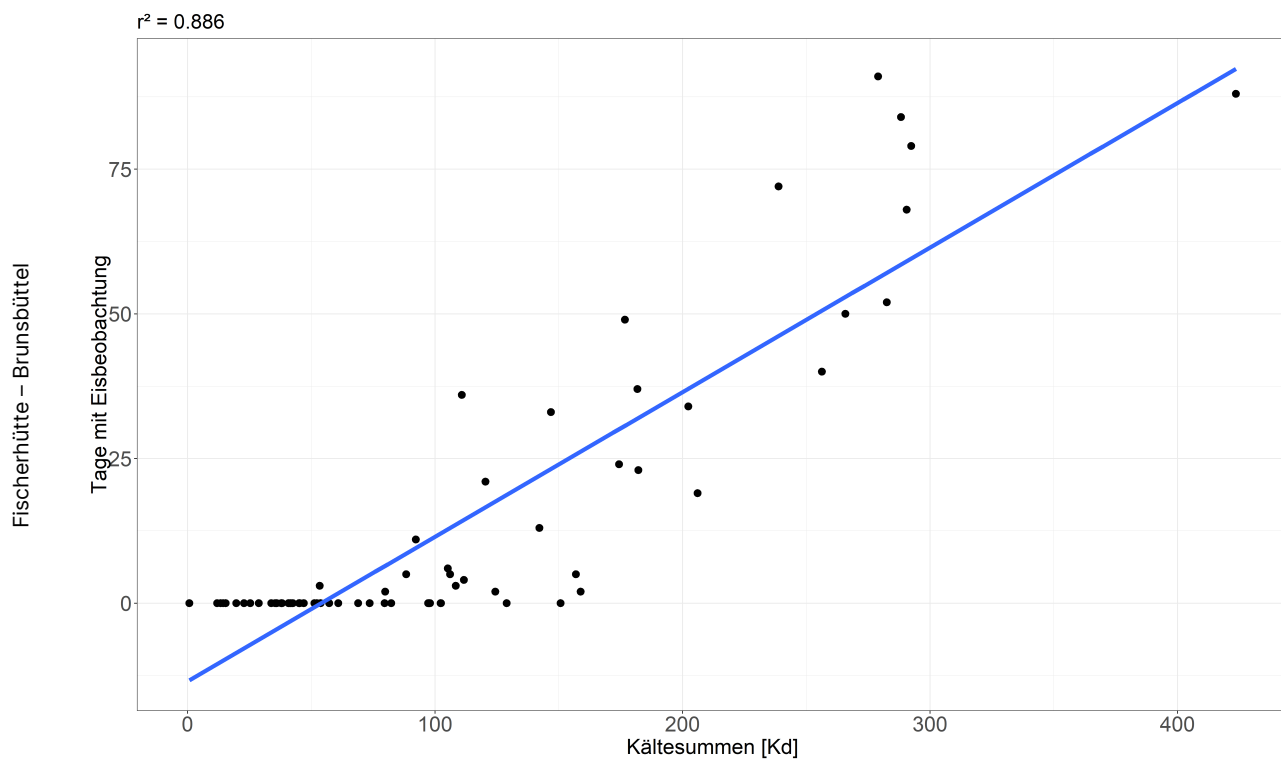


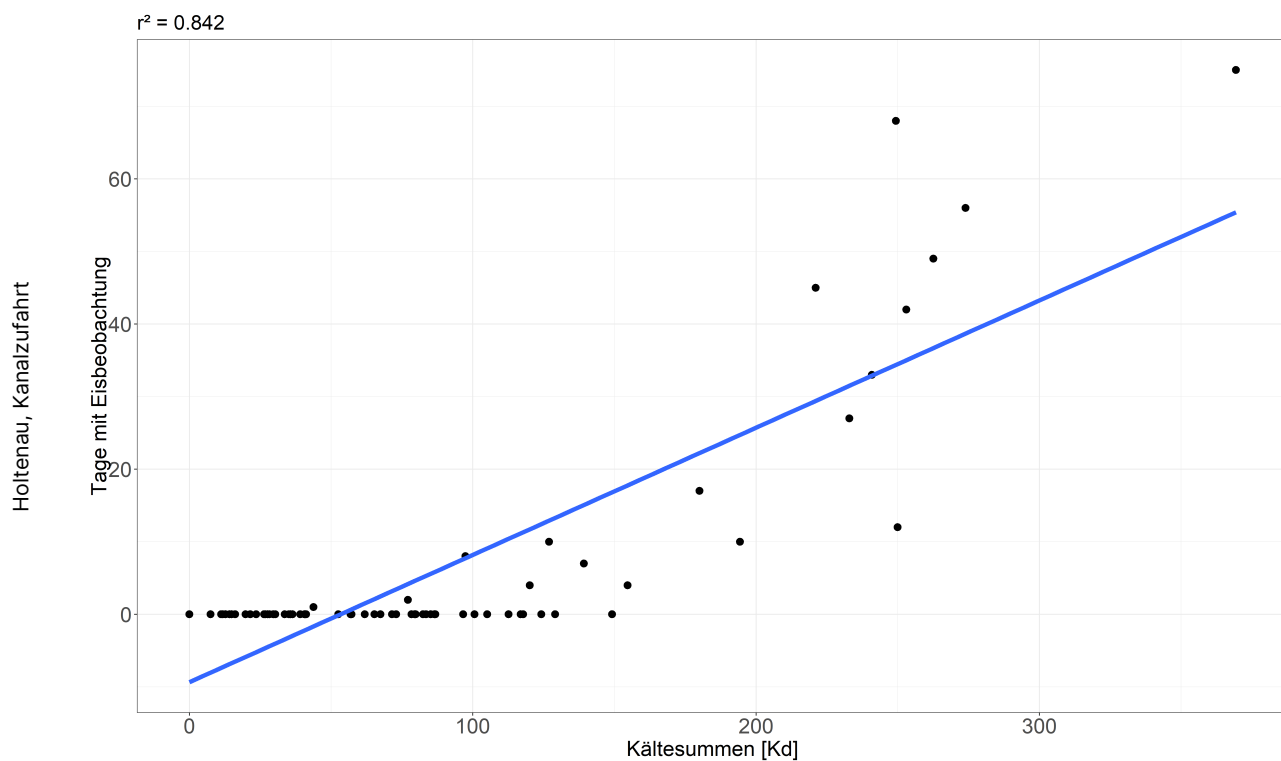
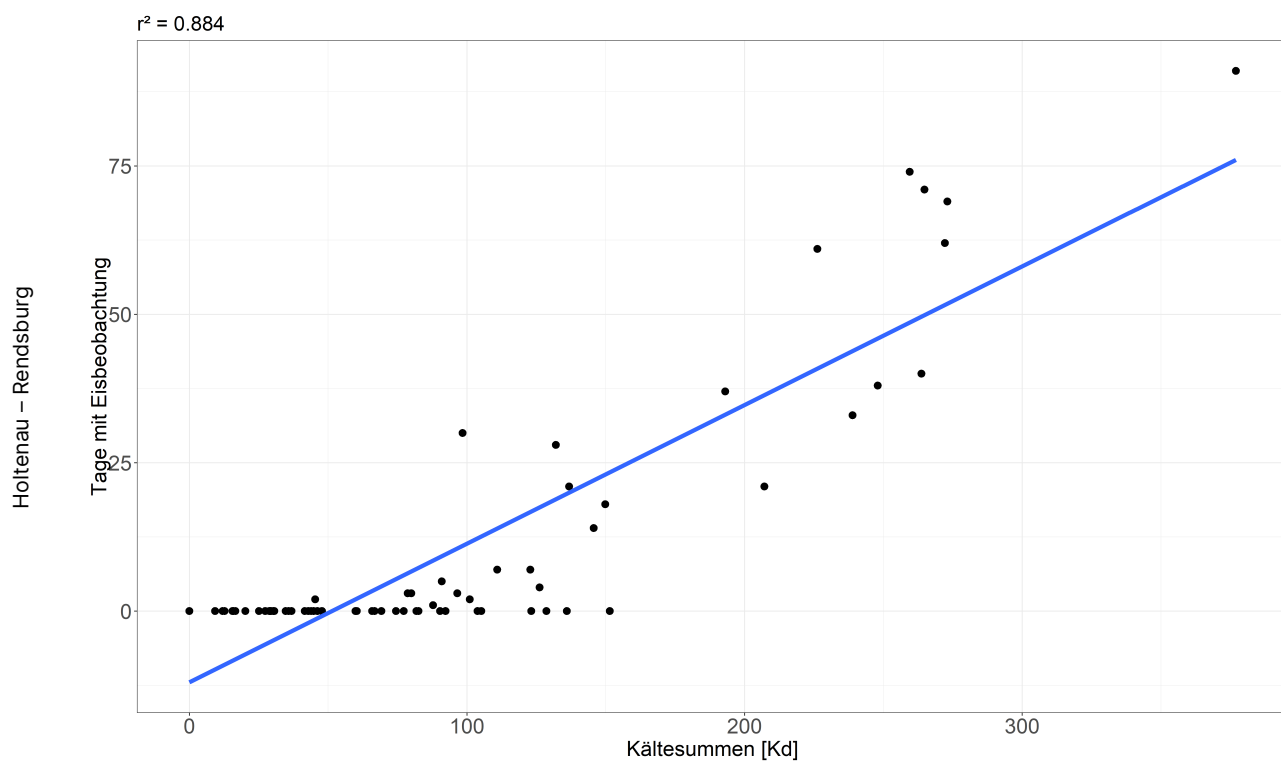
Abbildung 18: Baltic Sea Ice Codes für die Stationen entlang des NOK (Brunsbüttel, Elbe – oben; Kiel, Binnenhafen – unten). Für die Erläuterung der Codes siehe Tabelle 2 in Kapitel 2.

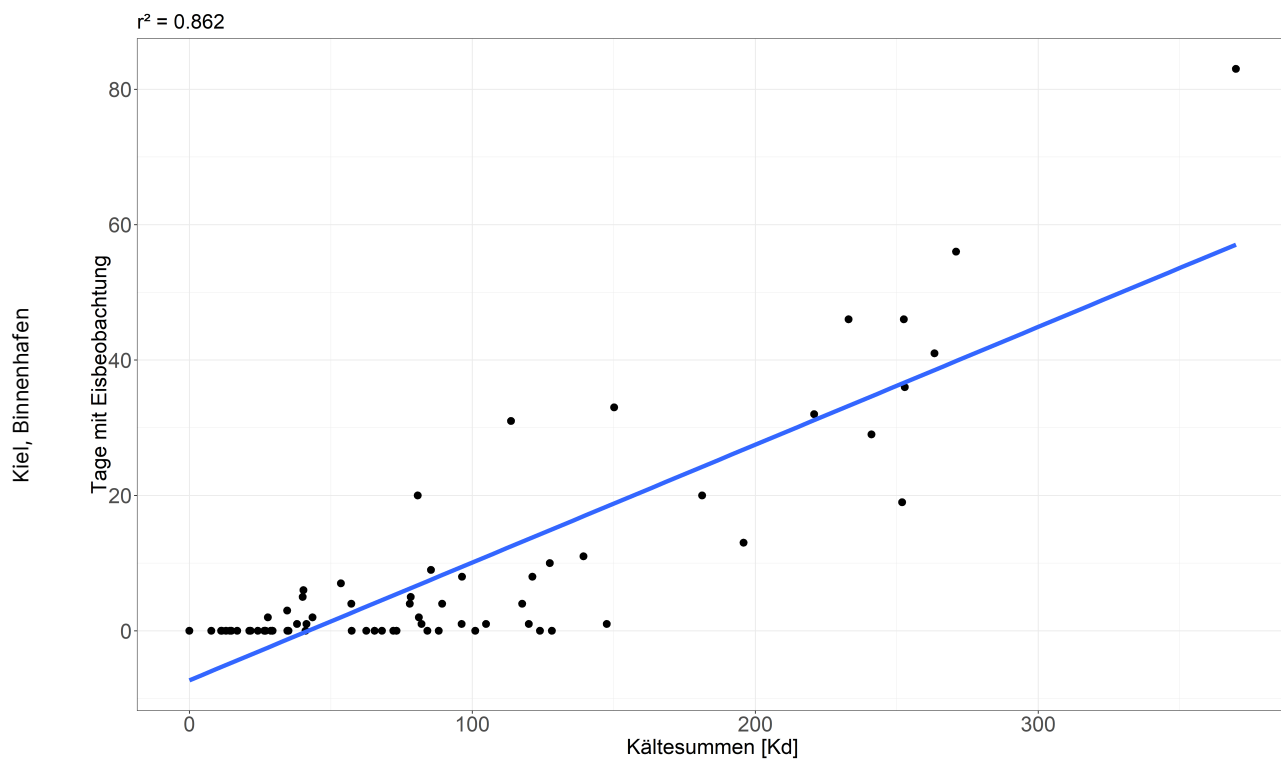
Anhang B: Grafische Auswertung der historischen Kältesummen

Korrelationen

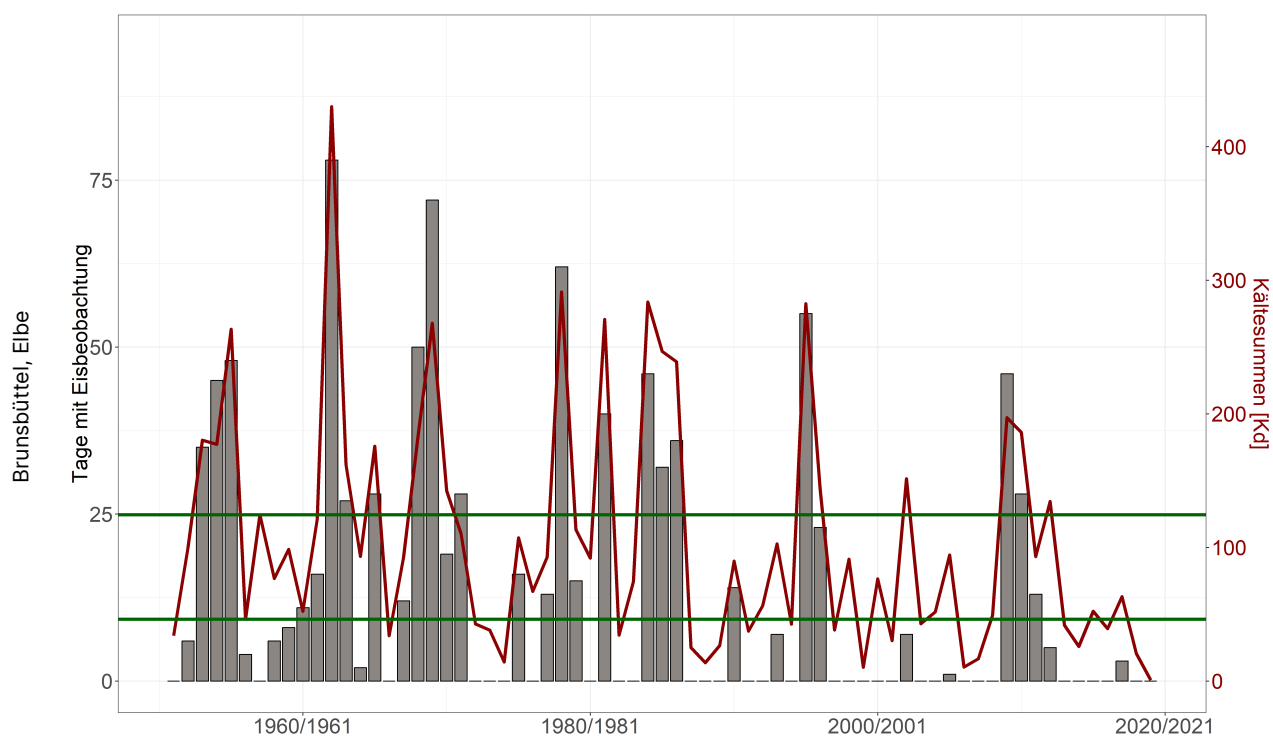


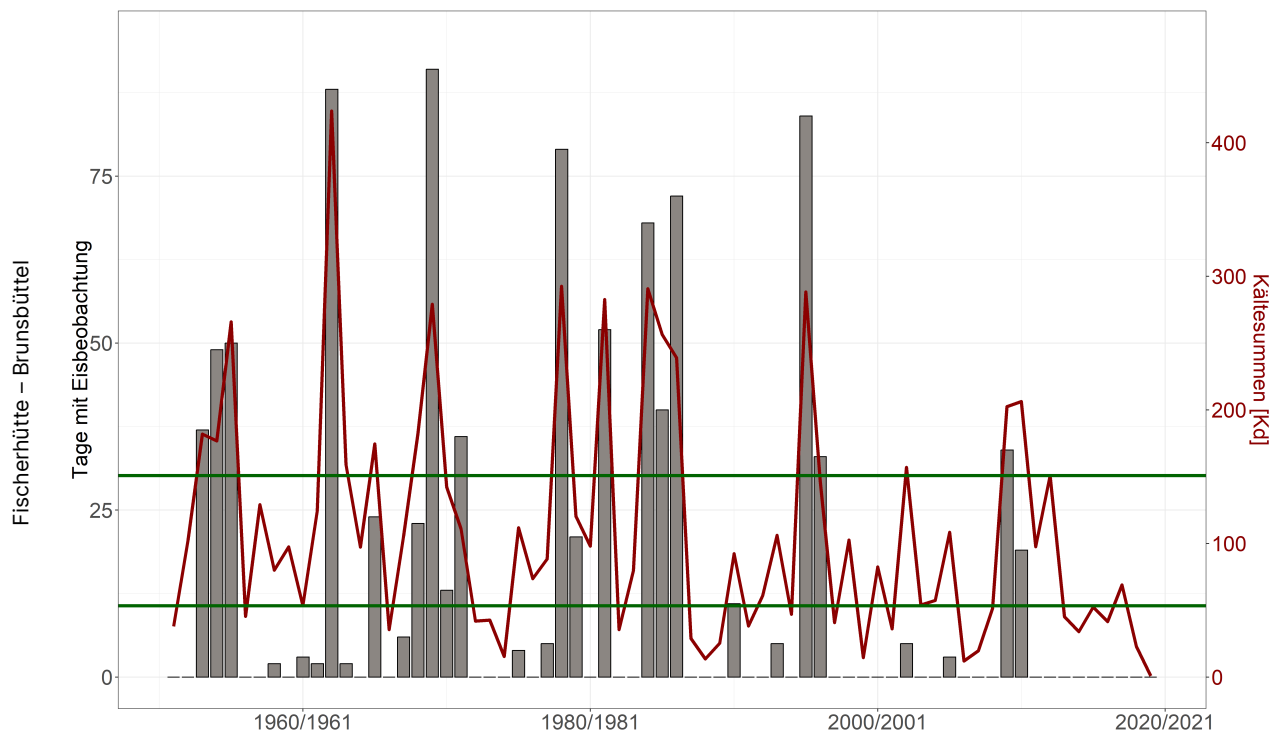
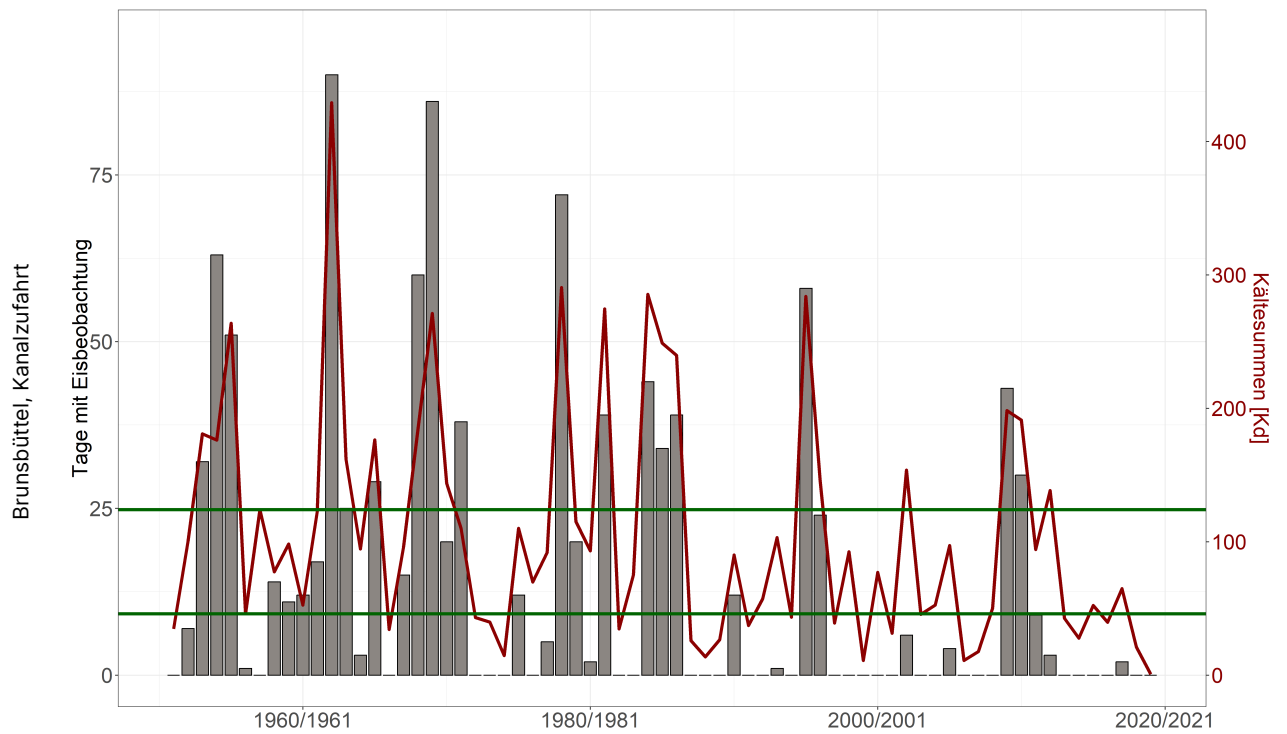


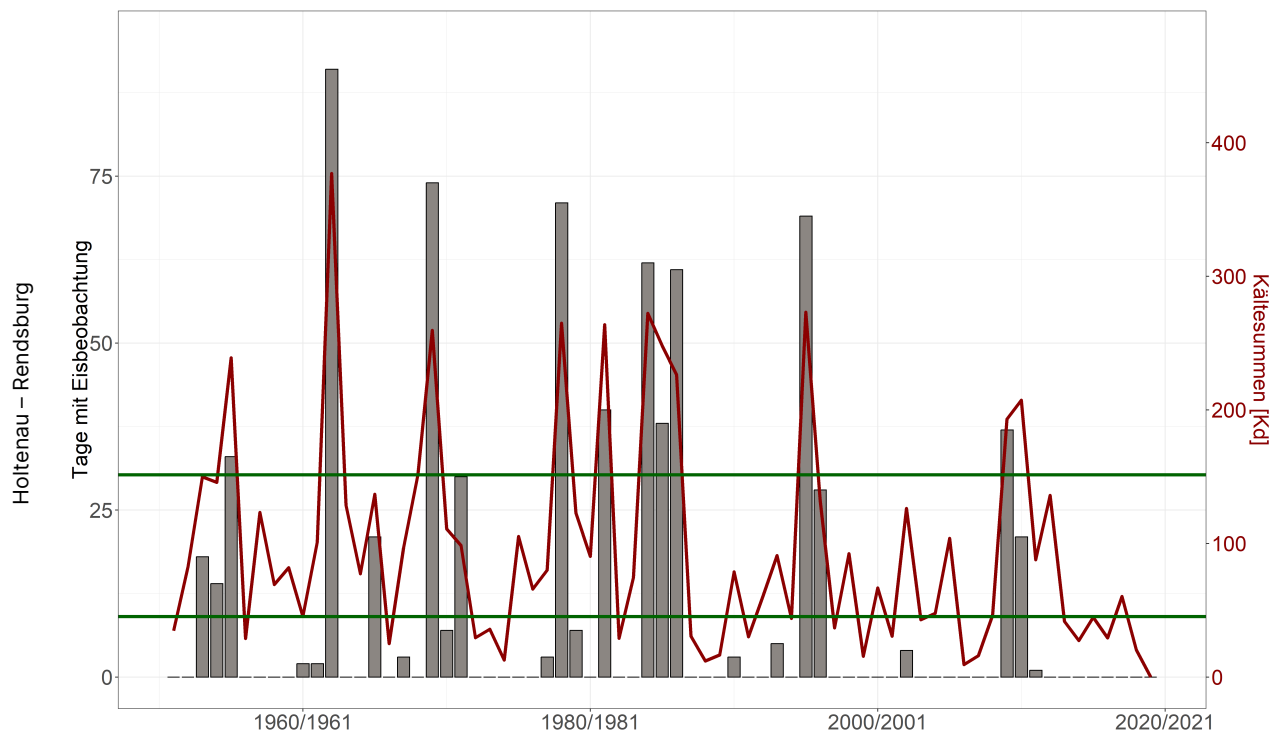
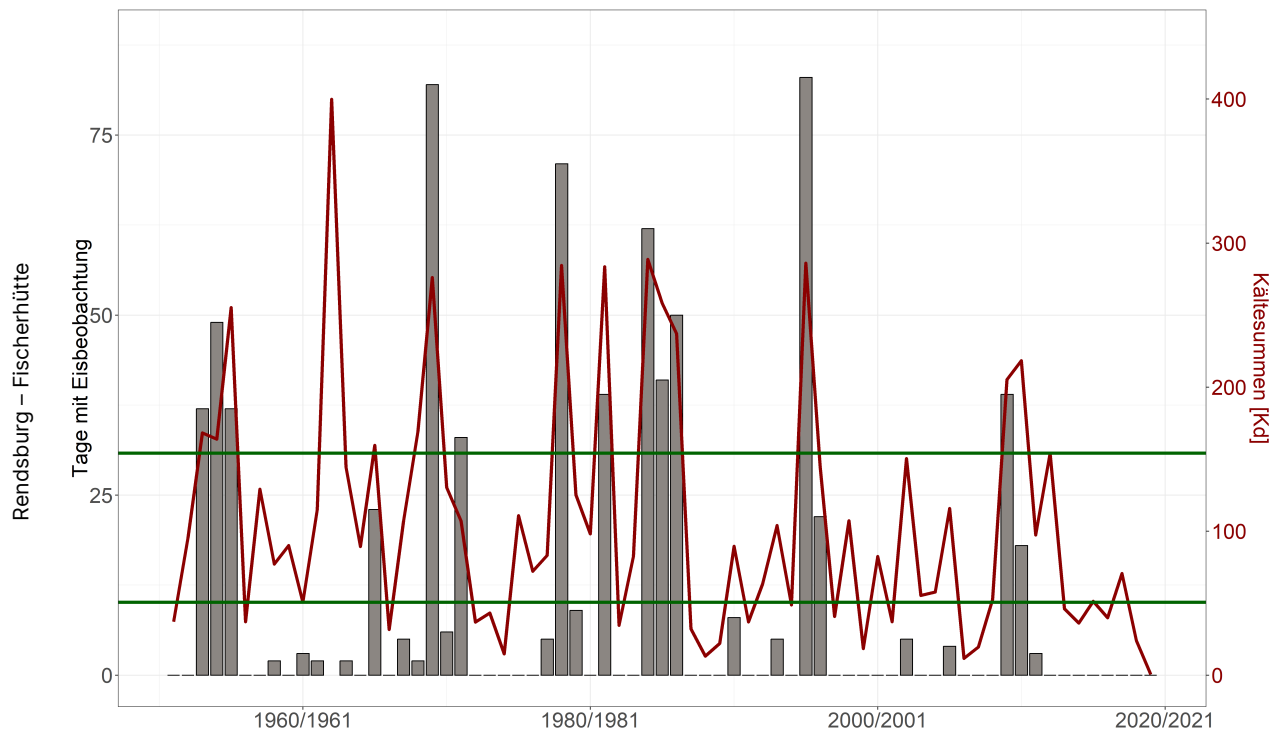


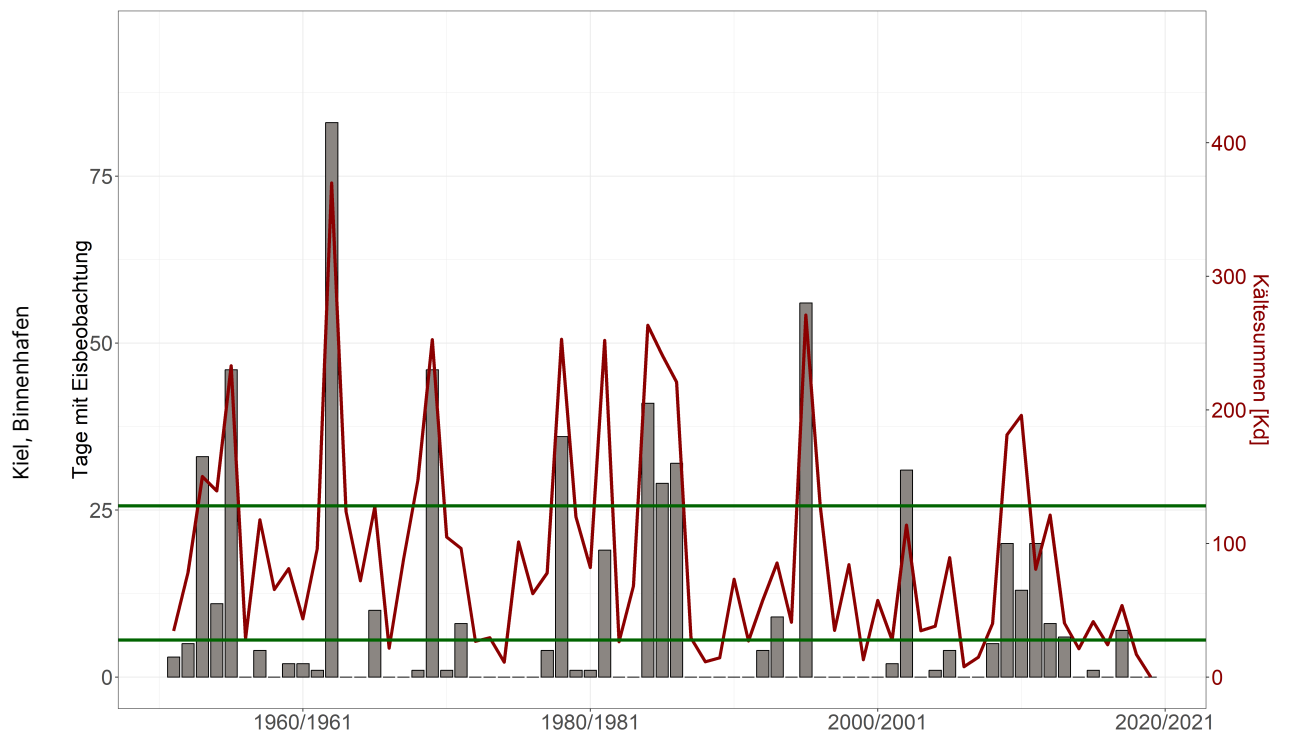
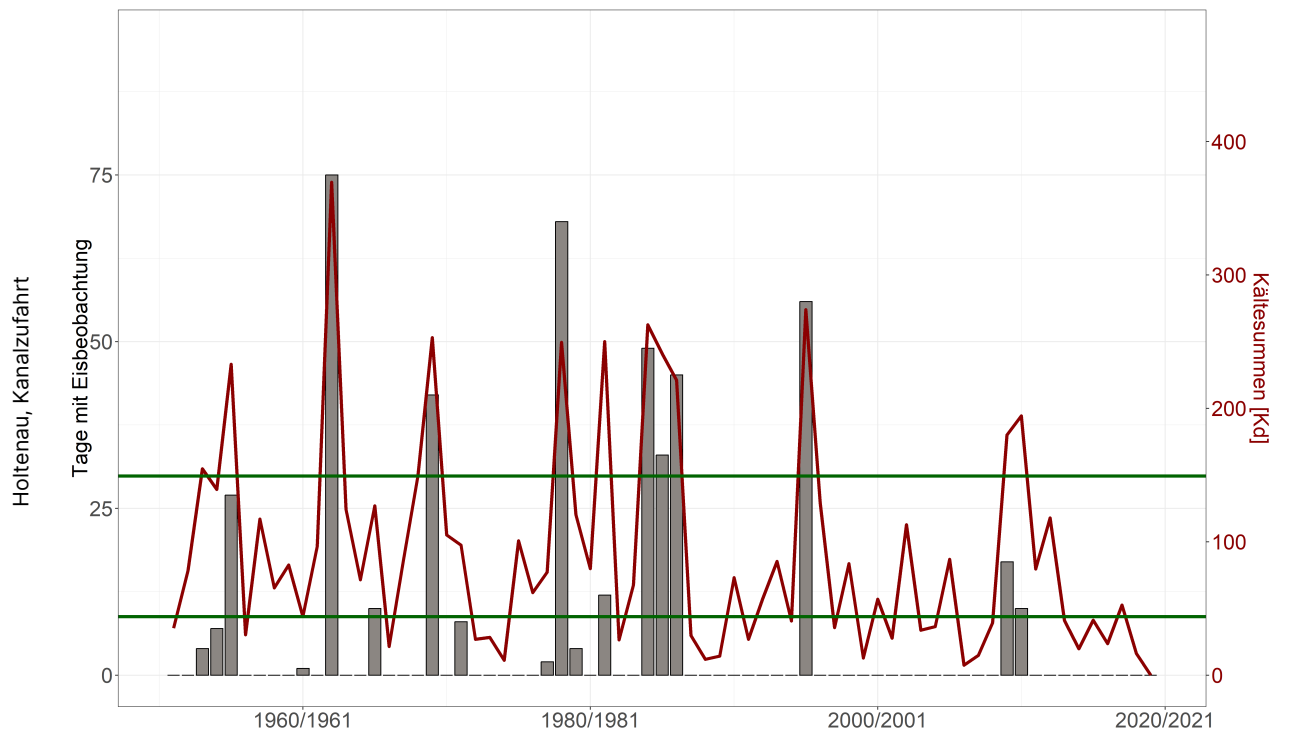


Kältesummen



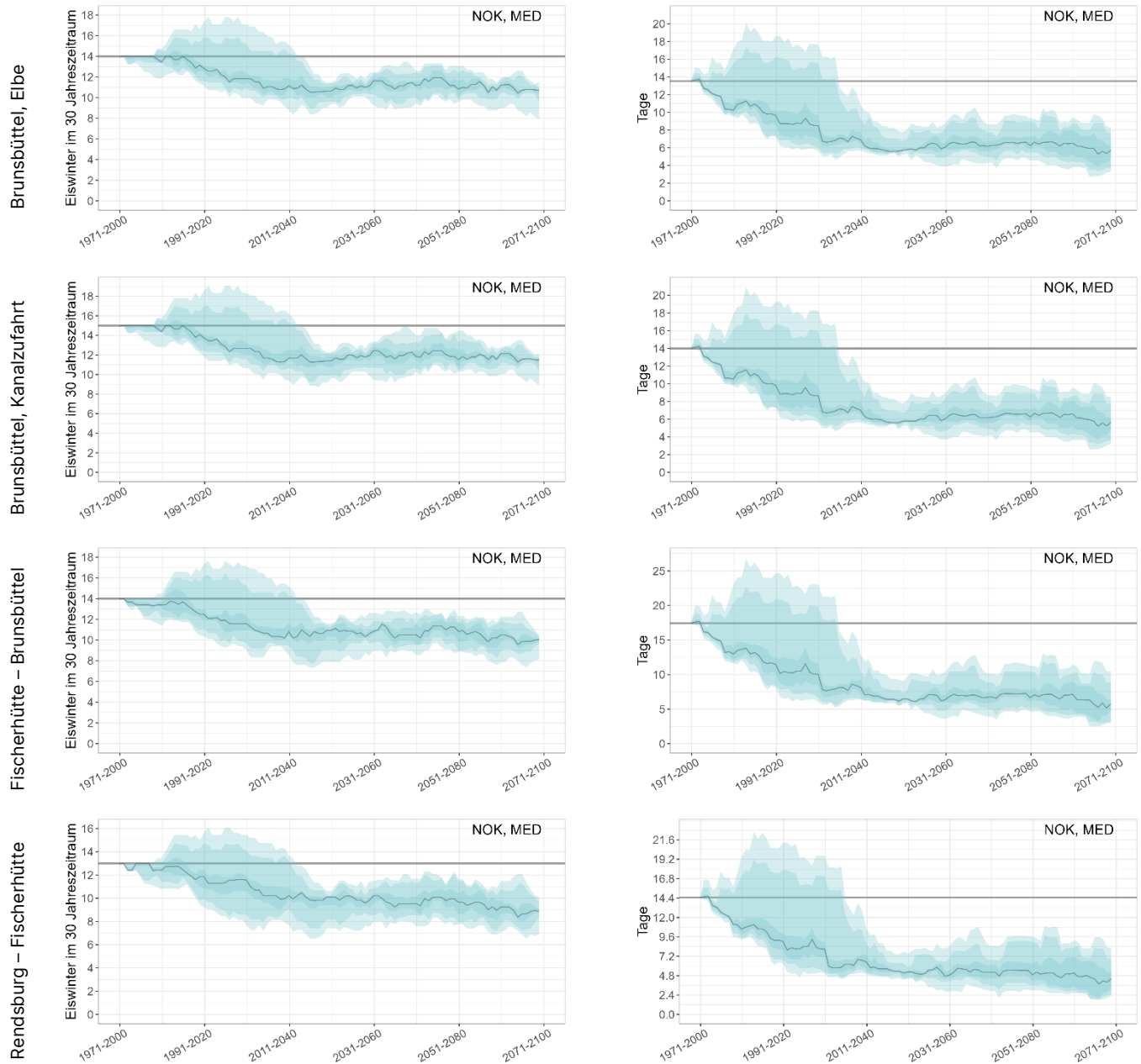






Anhang C: Grafische Auswertung der Klima- projektionen

Auswertung für RCP 2.6



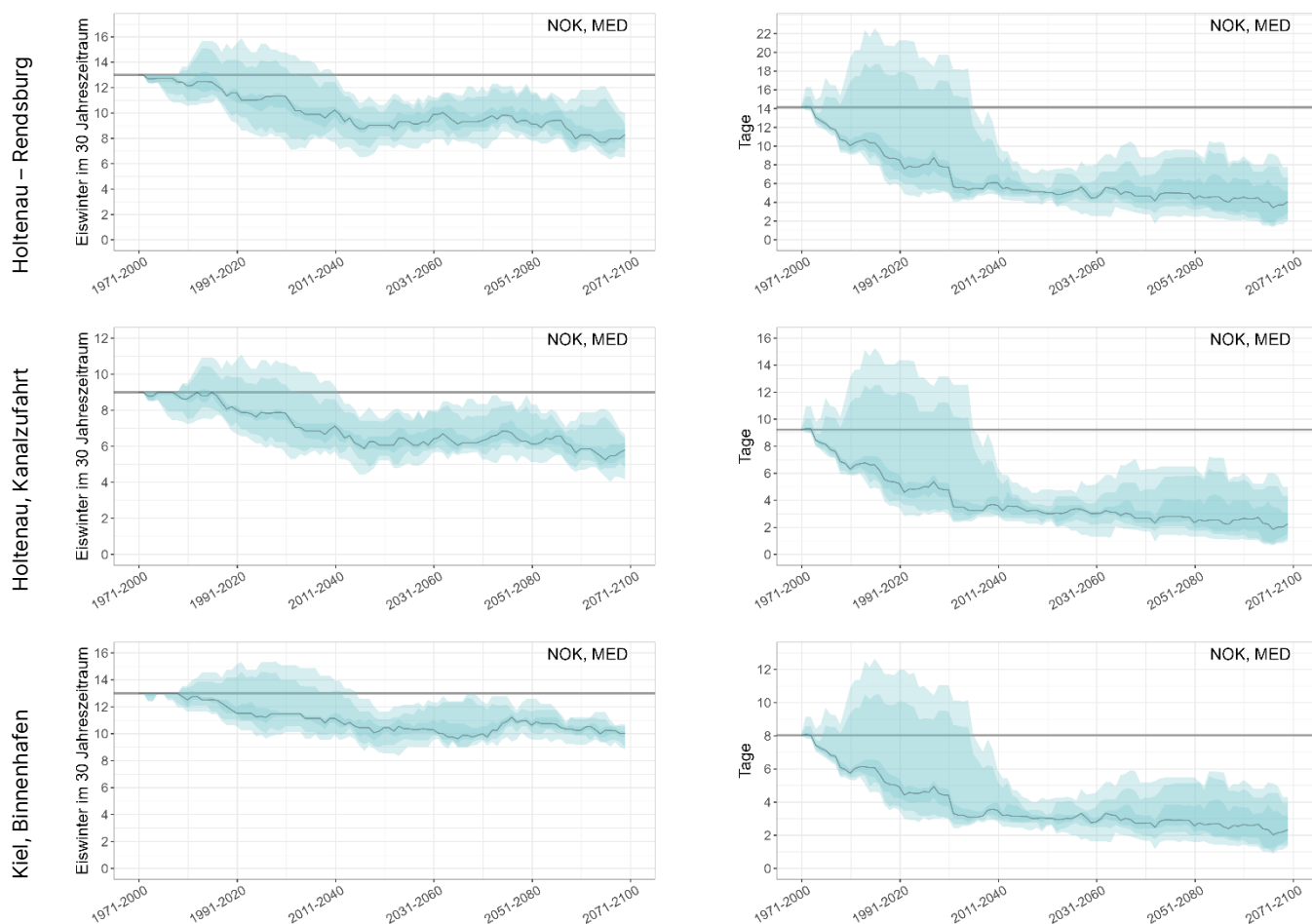
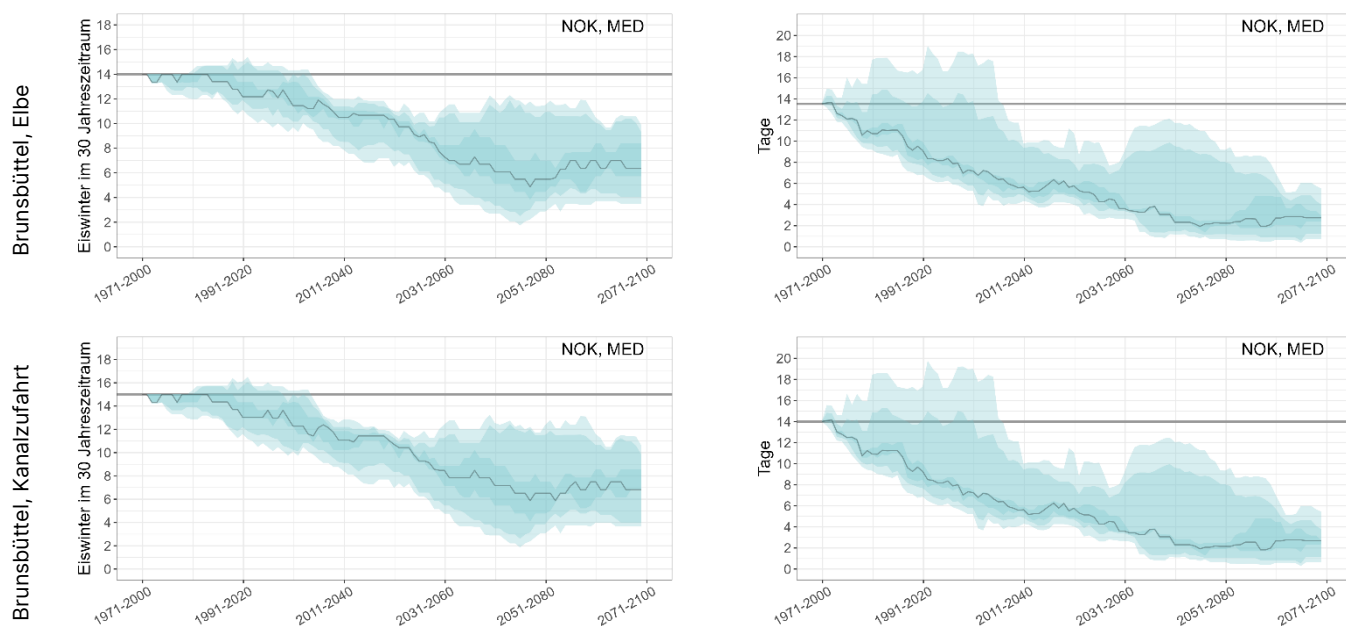


Abbildung 19: RCP 2.6, Anzahl der Eiswinter im 30 Jahreszeitraum (links) und Anzahl an Eistagen (rechts) für alle Beobachtungsstationen entlang des NOK (Brunsbüttel, Elbe – oben; Kiel, Binnenhafen – unten)

Auswertung für RCP 4.5



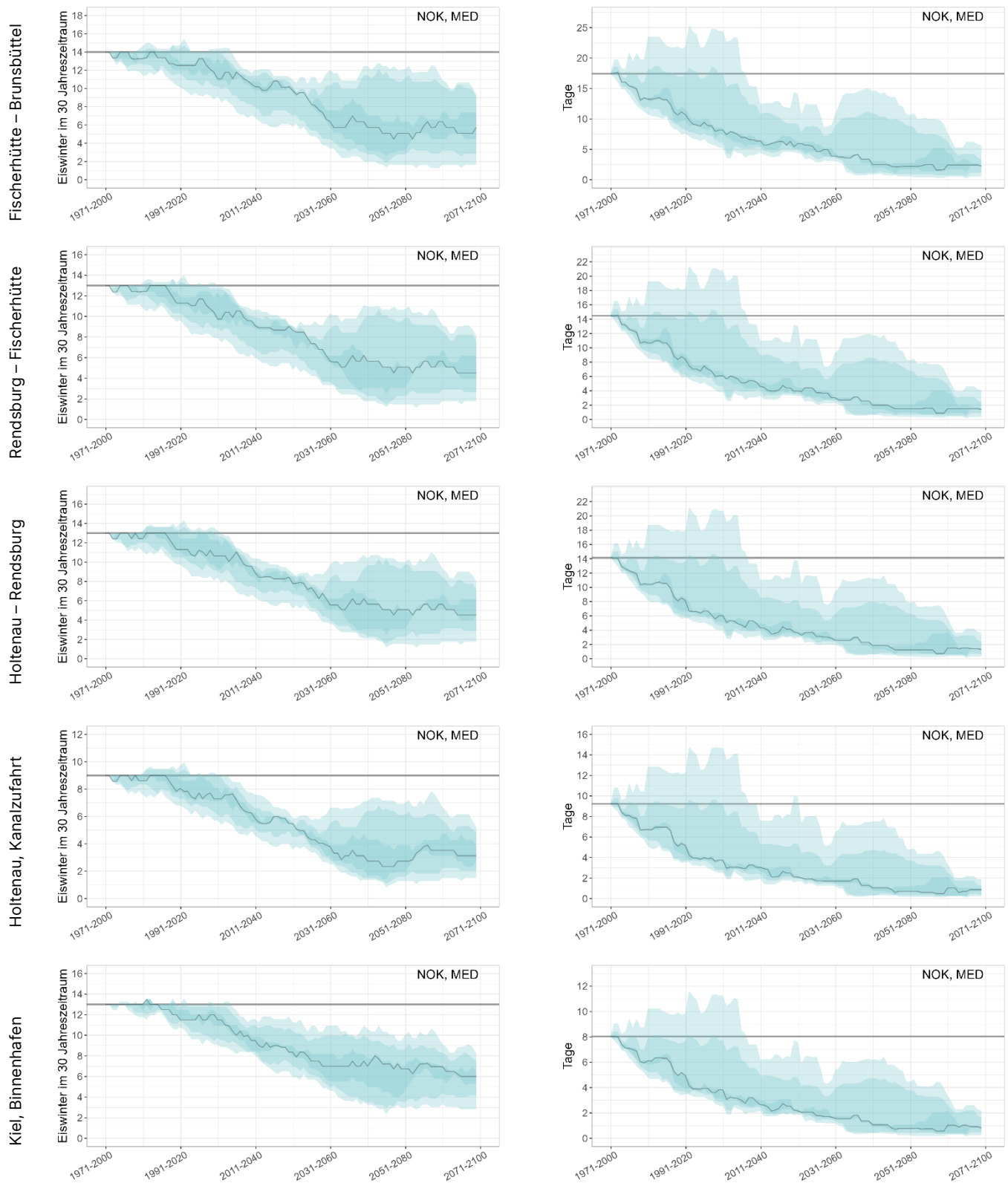
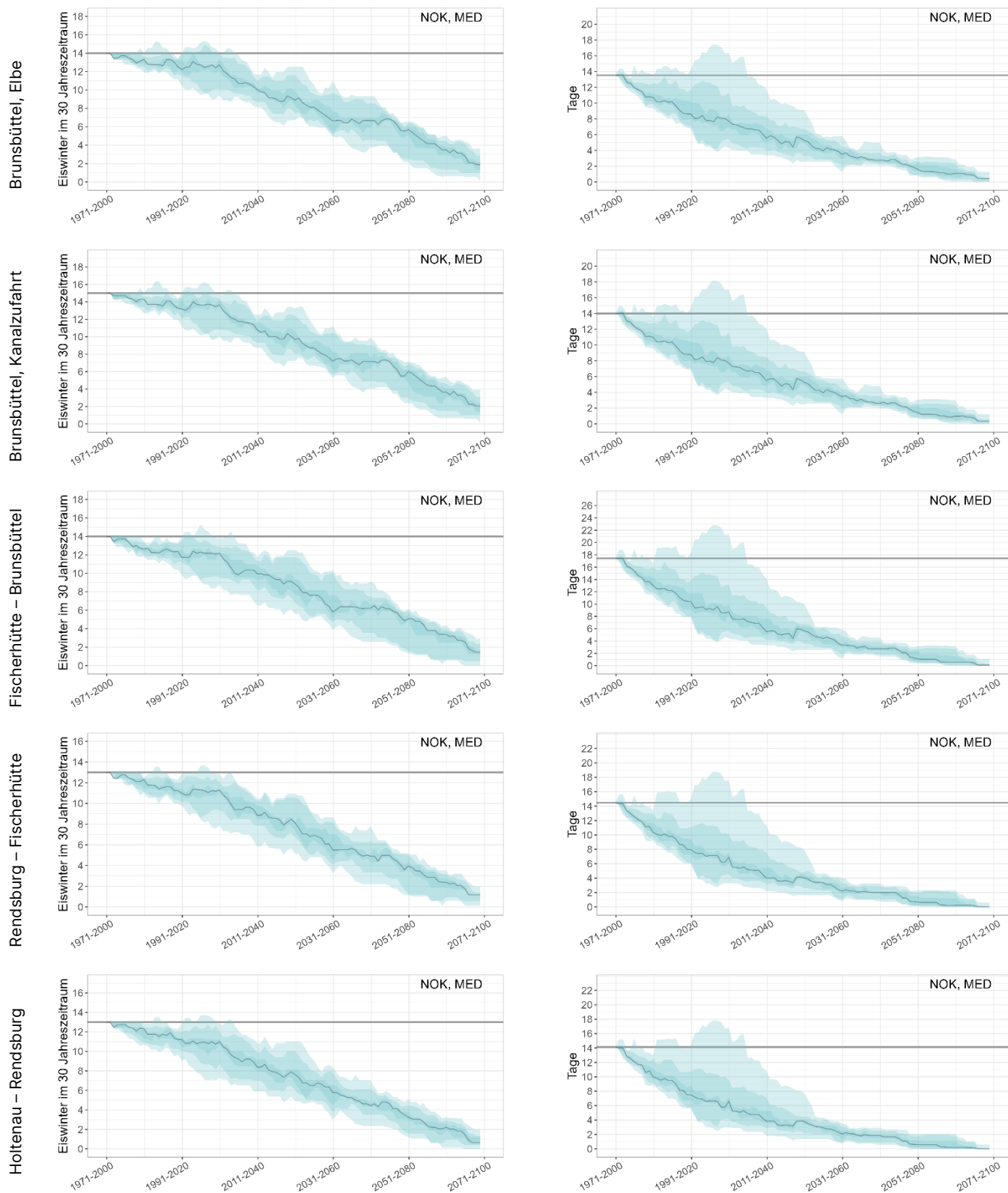


Abbildung 20: RCP 4.5, Anzahl der Eiswinter im 30 Jahreszeitraum (links) und Anzahl an Eistagen (rechts) für alle Beobachtungsstationen entlang des NOK (Brunsbüttel, Elbe – oben; Kiel, Binnenhafen – unten)

Auswertung für RCP 8.5



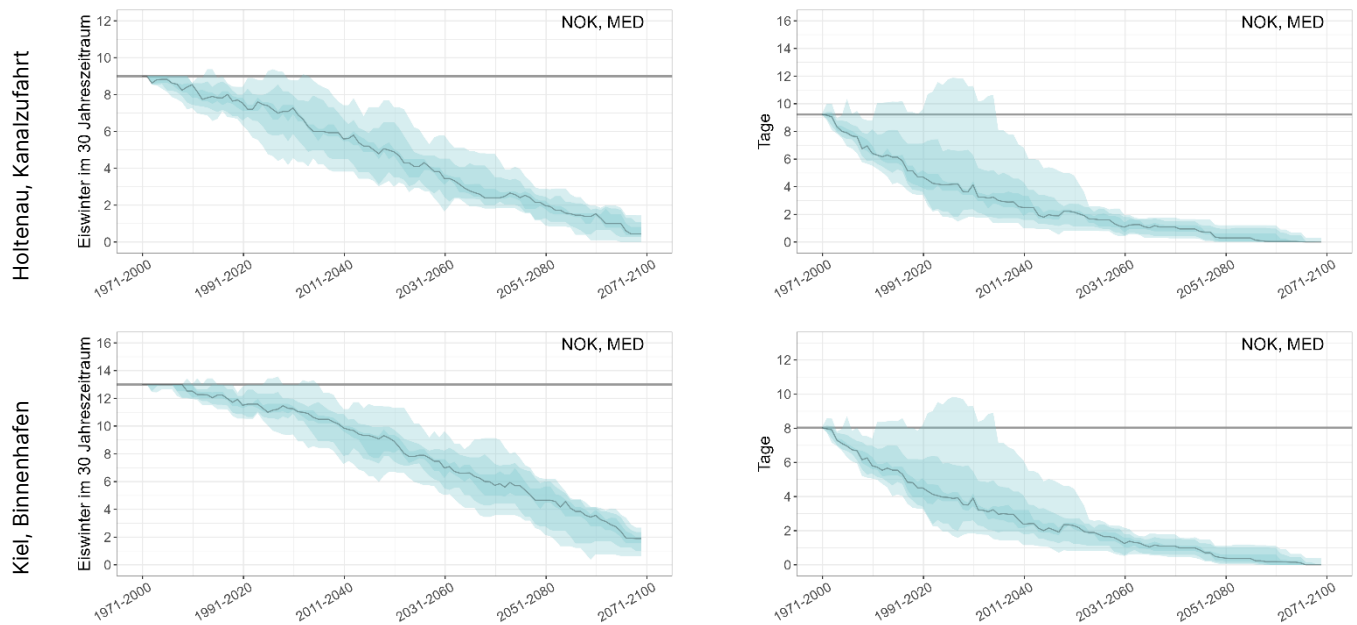
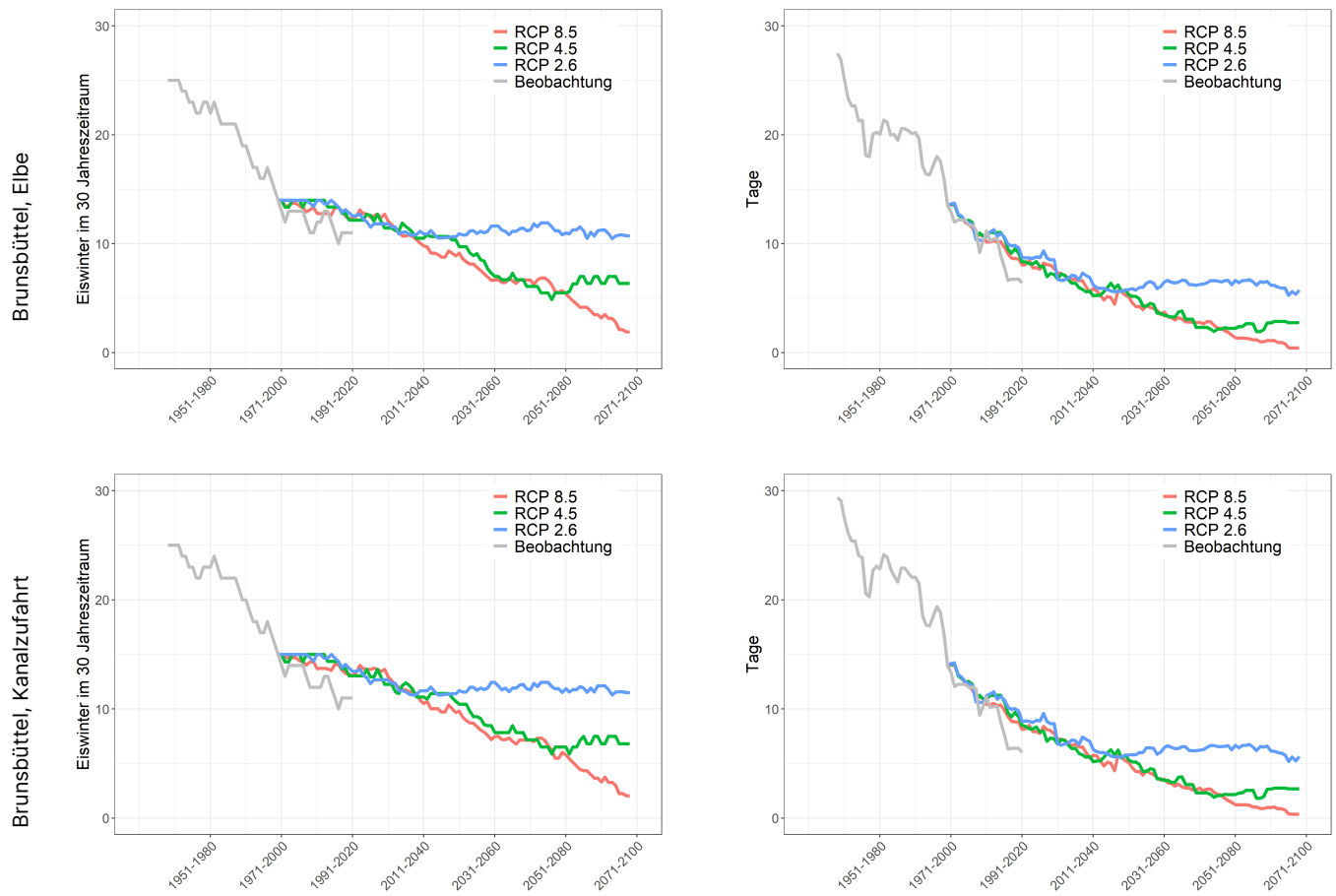
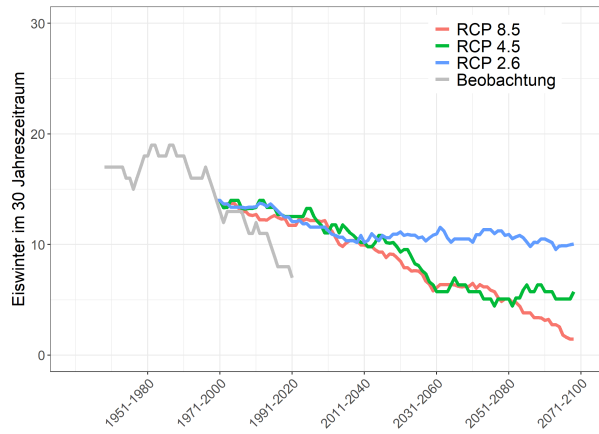


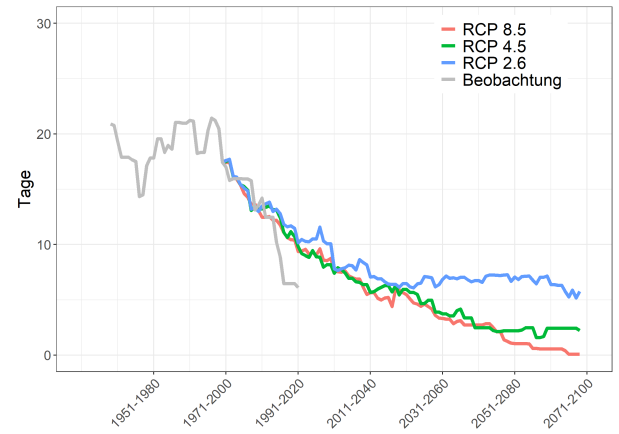
Abbildung 21: RCP 8.5, Anzahl der Eiswinter im 30 Jahreszeitraum (links) und Anzahl an Eistagen (rechts) für alle Beobachtungsstationen entlang des NOK (Brunsbüttel, Elbe – oben; Kiel, Binnenhafen – unten)



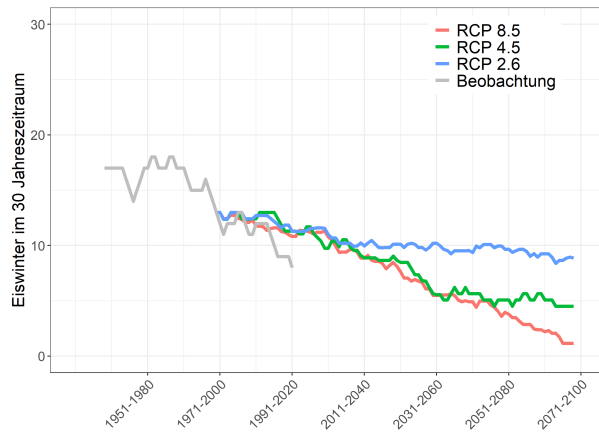
Fischerhütte – Brunsbüttel



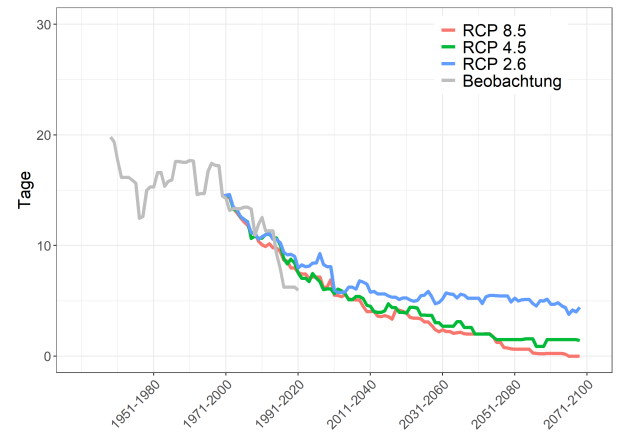
Tag



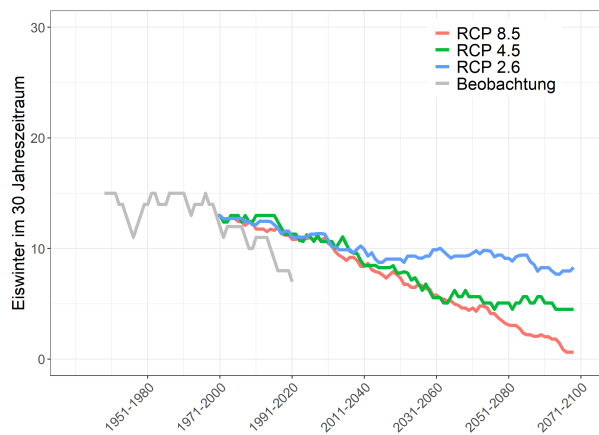
Rendsburg – Fischerhütte



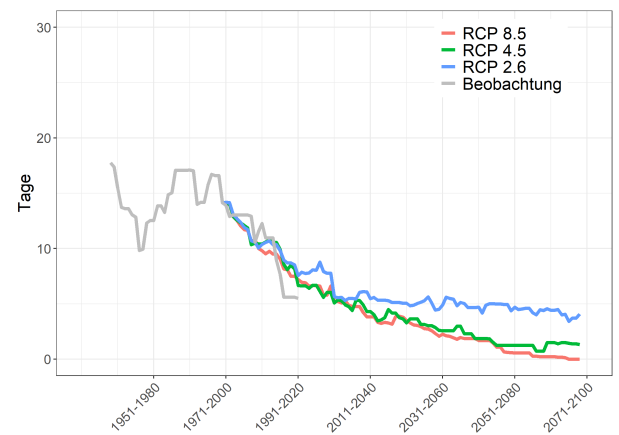
Tag



Holtenau – Rendsburg



Tag



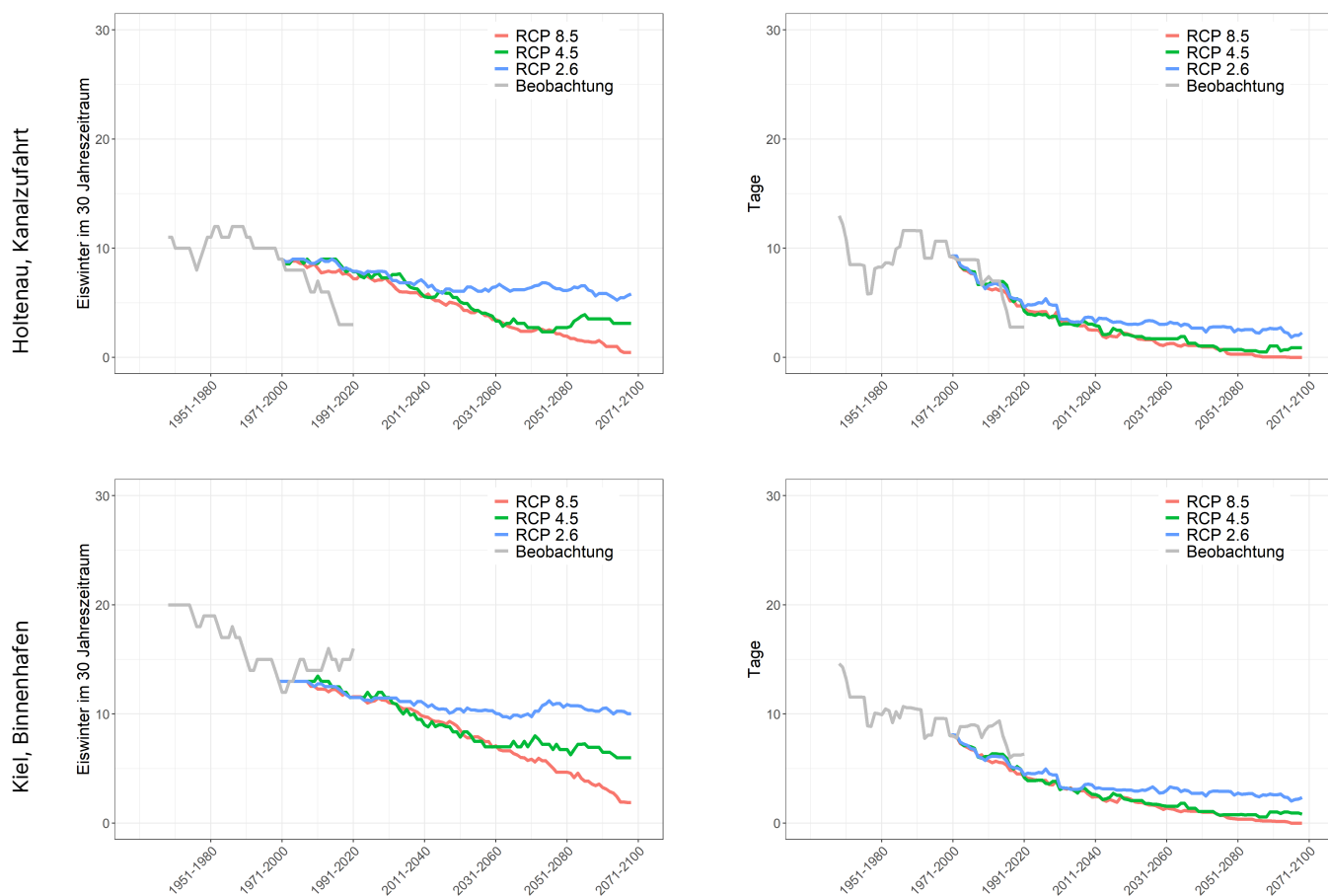


Abbildung 22: Vergleich der 30-jährigen Mediane der RCPs mit dem 30-jährigen Mittel der Beobachtung für Anzahl der Eiswinter (links) sowie Anzahl der Eistage (rechts).

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