KLIWAS
Klima · Wasser · Schifffahrt

KLIWAS Schriftenreihe
KLIWAS-43/2014

Schlussbericht
KLIWAS-Projekt 4.01

Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen und die Binnenschifffahrt in Deutschland

Koblenz, im Juli 2014

bfg Bundesanstalt für Gewässerkunde

KLIWAS

KLIWAS Schriftenreihe
KLIWAS-43/2014

Schlussbericht
KLIWAS-Projekt 4.01

Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen und die Binnenschifffahrt in Deutschland

Autoren:

Enno Nilson
Peter Krahe
Bastian Klein
Imke Lingemann
Theresa Horsten
Maria Carambia
Maria Larina
Thomas Maurer

Zitiervorschlag:
NILSON, E., KRAHE, P., LINGEMANN, I., HORSTEN, T., KLEIN, B., CARAMBIA, M., LARINA, M. (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen und die Binnenschifffahrt in Deutschland. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.01. KLIWAS-43/2014. BfG, Koblenz. DOI: 10.5675/Kliwas_43/2014_4.01
URL: http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_43_2014_4.01.pdf

Seite Kapitel

Inhaltsverzeichnis

05 TABELLENVERZEICHNIS

06 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

11 1 KURZFASSUNG

14 2 UNTERSUCHUNGSZIELE UND -GEBIET

17 3 STAND DER FORSCHUNG

19 4 DATEN UND METHODEN

19 4.1 AUFBEREITUNG UND BEWERTUNG DER KLIMAMODELLDATEN

23 4.2 HYDROLOGISCHE MODELLIERUNG UND AUSWERTUNGSSTATISTIK

27 4.3 REPRÄSENTATIVE ABFLUSSSIMULATIONEN

28 4.4 HYDRODYNAMISCHE MODELLIERUNG (RHEIN)

29 4.5 ÖKONOMISCHE AUSWERTUNGEN (RHEIN)

29 4.5.1 KOSTENSTRUKTURMODELL DER RHEINFLOTTE

31 4.5.2 VERWUNDBARKEITSANALYSE DER RHEIN-ANLIEGENDEN VERLADER

33 5 VERNETZUNG DES PROJEKTES, KOOPERATIONSPARTNER

36 6 ERGEBNISSE

36 6.1 ERREICHTER METHODISCH-WISSENSCHAFTLICHER FORTSCHRITT

37 6.2 KERNAUSSAGEN ZU DEN ERGEBNISSEN

37 6.2.1 ÄNDERUNG DES ABFLUSSGESCHEHENS IM RHEINEINZUGSGEBIET

42 6.2.2 ÄNDERUNG DES ABFLUSSGESCHEHENS IM ELBEEINZUGSGEBIET

47 6.2.3 ÄNDERUNG DES ABFLUSSGESCHEHENS IM OBEREN DONAU-EINZUGSGEBIET

51 6.2.4 ÄNDERUNG SCHIFFFAHRTSRELEVANTER KENNWERTE (RHEIN UND ELBE)

58 6.2.5 AUSWIRKUNGEN UND ANPASSUNGSOPTIONEN FÜR DIE BINNEN-SCHIFFFAHRT (RHEIN)

62 6.2.6 AUSWIRKUNGEN UND ANPASSUNGSOPTIONEN FÜR DIE VERLADENDE WIRTSCHAFT (RHEIN)

Seite Kapitel

Inhaltsverzeichnis

Seite	Kapitel	
65	6.3	EINSCHÄTZUNG ZUM GRAD DER BETROFFENHEIT DES BUNDES (BMVI, BMUB, WSV)
68	6.4	MÖGLICHE ANPASSUNGSOPTIONEN UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN
71	7	DISKUSSION UND AUSBLICK
76	8	DANKSAGUNG
77	9	LITERATUR
83	10	ABKÜRZUNGEN UND NAMENSKONVENTION

Seite

Tabelle

Tabellenverzeichnis

Seite	Tabelle	
20	1	ÜBERBLICK UND BEWERTUNG DER UNTERSUCHTEN KLIMAMODELLKETTEN
23	2	CHARAKTERISTIKA DER VERWENDETEN HYDROLOGISCHEN MODELLE UND HYDROMETEOROLOGISCHEN REIHEN FÜR DAS RHEIN-, ELBE- UND OBERE DONAUEINZUGSGEBIET.
25	3	AUSGEWÄHLTE PEGEL IM RHEINEINZUGSGEBIET
25	4	AUSGEWÄHLTE PEGEL IM ELBEEINZUGSGEBIET
25	5	AUSGEWÄHLTE PEGEL IM DONAUEINZUGSGEBIET
28	6	REPRÄSENTATIVE MODELLKETTEN, DIE FÜR DIE HYDRODYNAMISCHEN SIMULATIONSRECHNUNGEN UND DIE DARAUF AUFBAUENDE KOSTEN-STRUKTURMODELLIERUNG SOWIE DIE VERWUNDBARKEITSANALYSE VERWENDET WURDEN. AUSWAHLKRITERIUM IST DER NIEDRIGWASSER-ABFLUSS NM7Q WÄHREND DES HYDROLOGISCHEN SOMMERHALBJAHRES AN DEN PEGELN KAUB UND DUISBURG-RUHRORT
34	7	PILOTPROJEKT/PROJEKT 4.01 - KOOPERATIONEN UND AUFTRÄGE
40	8	SZENARIENKORRIDORE FÜR DIE MITTLEREN JÄHRLICHEN UND HALB-JÄHRLICHEN ABFLÜSSE (MQ) SOWIE DIE NIEDRIG- UND HOCHWASSER-ABFLÜSSE (NM7Q BZW. HM5Q) AN AUSGEWÄHLTEN PEGELN IM RHEINEINZUGSGEBIET
45	9	SZENARIENKORRIDORE FÜR DIE MITTLEREN JÄHRLICHEN UND HALB-JÄHRLICHEN ABFLÜSSE (MQ) SOWIE DIE NIEDRIG- UND HOCHWASSER-ABFLÜSSE (NM7Q BZW. HM5Q) AN AUSGEWÄHLTEN PEGELN IM ELBEEINZUGSGEBIET
50	10	SZENARIENKORRIDORE FÜR DIE MITTLEREN JÄHRLICHEN UND HALB-JÄHRLICHEN ABFLÜSSE (MQ) SOWIE DIE NIEDRIGSTEN UND HÖCHSTEN MONATLICHEN AB-FLÜSSE (NMOMQ BZW. HMOMQ) AN AUSGEWÄHLTEN PEGELN IM DONAUEINZUGSGEBIET.
66	11	ERLÄUTERUNG DER SYMBOLE IN TABELLE 12
67	12	AUSGEWÄHLTE NUTZUNGEN/FUNKTIONEN IM BEREICH WASSERWIRTSCHAFT, IN DENEN HANDLUNGSBEDARF BZGL. DER IN DIESEM BERICHT DARGELEGTEN AUSWIRKUNGEN DES KLIMAWANDELS GESEHEN WIRD, DIFFERENZIERT NACH GEBIETEN UND ZEITRÄUMEN. ZUM BEGRIFF "HANDLUNGSBEDARF" S. TEXT, ZUR SYMBOLIK S. TABELLE 11

Seite Tabelle

Tabellenverzeichnis

Seite	Tabelle	
70	13	ÜBERSICHT DER IN KLIWAS 4.01 MODELLHAFT UMGESETZTEN ANPASSUNGSOPTIONEN
85	14	ERLÄUTERUNG DER MODELLKETTENBEZEICHNUNG AM BEISPIEL DER KETTE A1B_EH5R1_CLM24_LS_HBV134_SOBEK-KLIWAS_ECM
85	15	NAMENSZUORDNUNG DER DER KLIMAMODELLKETTEN

Seite Abbildung

Abbildungsverzeichnis

Seite	Abbildung	
15	1	KARTE DER UNTERSUCHTEN EINZUGSGEBIETE UND PEGEL (BLAUE DREIECKE)
16	2	KARTE DER ABFLUSSHÖHEN UND ABFLUSSREGIME IN MITTELEUROPA
19	3	SCHEMA EINER MODELLKETTE DER HYDROLOGISCHEN KLIMAFOLGEN-FORSCHUNG
20	4	SCHEMA DES AUSWERTUNGSRAHMENS ZUR ERSTELLUNG VON ABFLUSS-SZENARIEN (LINGEMANN ET AL., 2013)
21	5	GEBIETSBEZÜGE DER HYDROLOGISCHEN MODELLE HBV134 (RHEIN), COSERO (OBERE DONAU) UND HBV-D (ELBE)
26	6	SCHEMA ZUR ABLEITUNG DER "KLIWAS-SZENARIENKORRIDORE" UND VERGLEICH MIT ANDEREN VERFAHREN ZUR BESCHREIBUNG EINES ENSEMBLES AM BEISPIEL DER ÄNDERUNGEN DES NIEDRIGWASSERABFLUSSES AM PEGEL KAUB IM HYDROLOGISCHEN SOMMERHALBJAHR (MAI-OKT., NILSON ET AL., 2011)
30	7	LINKS: RELATIONSBEZOGENE KOSTEN (AB ROTTERDAM) EXEMPLARISCH FÜR DIE MODELL-KETTE C20_EH5R1_CLM24_LS_ HBV134_SOBEK-KLIWAS_KST. RECHTS: GÜTERVERKEHRSDICHTE OHNE VERKEHR INNERHALB DER NIEDERLANDE (WSV, 2002)

Abbildungsverzeichnis

Seite	Abbildung	
39	8	ÄNDERUNGSSIGNALE FÜR DEN MITTLEREN ABFLUSS (MQ) WÄHREND DES HYDROLOGISCHEN JAHRES (NOV.-OKT.) AN AUSGEWÄHLTEN PEGELN IM RHEINEINZUGSGEBIET
39	9	ÄNDERUNGSSIGNALE FÜR DEN MITTLEREN ABFLUSS (MQ) WÄHREND DES HYDROLOGISCHEN WINTERS (NOV.-MRZ.). DARSTELLUNG WIE IN ABBILDUNG 8
39	10	ÄNDERUNGSSIGNALE FÜR DEN MITTLEREN ABFLUSS (MQ) WÄHREND DES HYDROLOGISCHEN SOMMERS (MAI-OKT.). DARSTELLUNG WIE IN ABBILDUNG 8
39	11	ÄNDERUNGSSIGNALE FÜR DEN NIEDRIGWASSERABFLUSS (NM7Q) WÄHREND DES WASSERHAUSHALTSJAHRES (APR.-MRZ.). DARSTELLUNG WIE IN ABBILDUNG 8
39	12	ÄNDERUNGSSIGNALE FÜR HOHE ABFLÜSSE (HM5Q) WÄHREND DES HYDROLOGISCHEN JAHRES (NOV.-OKT.). DARSTELLUNG WIE IN ABBILDUNG 8
43	13	ÄNDERUNGEN DES HM5Q AM PEGEL NEU DARCHAU ALS 31-JÄHRIGE GLEITENDE MITTELWERTE FÜR BEOBACHTETE PEGELDATEN (SCHWARZE LINIE) UND ZUKUNFTSPROJEKTIONEN (BUNTE LINIENSCHAR)
44	14	ÄNDERUNGSSIGNALE FÜR DEN MITTLEREN ABFLUSS (MQ) WÄHREND DES HYDROLOGISCHEN JAHRES (NOV.-OKT.) AN AUSGEWÄHLTEN PEGELN IM ELBEEINZUGSGEBIET
44	15	ÄNDERUNGSSIGNALE FÜR DEN MITTLEREN ABFLUSS (MQ) WÄHREND DES HYDROLOGISCHEN WINTERS (NOV.-MRZ.). DARSTELLUNG WIE IN ABBILDUNG 14
44	16	ÄNDERUNGSSIGNALE FÜR DEN MITTLEREN ABFLUSS (MQ) WÄHREND DES HYDROLOGISCHEN SOMMERS (MAI-OKT.). DARSTELLUNG WIE IN ABBILDUNG 14
44	17	ÄNDERUNGSSIGNALE FÜR DEN NIEDRIGWASSERABFLUSS (NM7Q) WÄHREND DES WASSERHAUSHALTSJAHRES (APR.-MRZ.). DARSTELLUNG WIE IN ABBILDUNG 14
44	18	ÄNDERUNGSSIGNALE FÜR HOHE ABFLÜSSE (HM5Q) WÄHREND DES HYDROLOGISCHEN JAHRES (NOV.-OKT.). DARSTELLUNG WIE IN ABBILDUNG 14

Seite Abbildung

Abbildungsverzeichnis

Seite	Abbildung	
48	19	NIEDRIGSTE MITTLERE MONATSABFLÜSSE IM SOMMERHALBJAHR (APRIL - SEPTEMBER) UND WINTERHALBJAHR (OKTOBER – MÄRZ) AM PEGEL DONAUWÖRTH, GESTRICHELTE LINIEN LINEARER TREND
48	20	NIEDRIGSTE MITTLERE MONATSABFLÜSSE IM WASSERHAUSHALTSJAHR AM PEGEL DONAUWÖRTH, GESTRICHELTE LINIE LINEARER TREND, ROTE LINIE 11-JAHRES MITTEL
49	21	ÄNDERUNGSSIGNALE FÜR DEN MITTLEREN ABFLUSS (MQ) WÄHREND DES HYDROLOGISCHEN JAHRES (NOV.-OKT.) AN AUSGEWÄHLTEN PEGELN IM OBEREN DONAUEINZUGSGEBIET
49	22	ÄNDERUNGSSIGNALE FÜR DEN MITTLEREN ABFLUSS (MQ) WÄHREND DES HYDROLOGISCHEN WINTERS (NOV.-MRZ.). DARSTELLUNG WIE IN ABBILDUNG 21
49	23	ÄNDERUNGSSIGNALE FÜR DEN MITTLEREN ABFLUSS (MQ) WÄHREND DES HYDROLOGISCHEN SOMMERS (MAI-OKT.). DARSTELLUNG WIE IN ABBILDUNG 21
49	24	ÄNDERUNGSSIGNALE FÜR DEN NIEDRIGSTEN MITTLEREN MONATSABFLUSS (NMOMQ) WÄHREND DES WASSERHAUSHALTSJAHRES (APR.-MRZ.). DARSTELLUNG WIE IN ABBILDUNG 21
49	25	ÄNDERUNGSSIGNALE FÜR DEN HÖCHSTEN MITTLEREN MONATSABFLUSS (HMOMQ) WÄHREND DES HYDROLOGISCHEN JAHRES (NOV.-OKT.). DARSTELLUNG WIE IN ABBILDUNG 21
53	26	ÄNDERUNGEN DER ANZAHL VON UNTERSCHREITUNGSTAGEN DES NIEDRIGEN ABFLUSSSCHWELLENWERTES FDC_Q951961-1990 (~ GLQ) IN EINEM WASSERHAUSHALTSJAHR AM PEGEL KAUB BEI VERGLEICH DER 31-JÄHRIG GLEITENDEN MITTEL BEOBACHTETER ABFLÜSSE (SCHWARZE LINIE) UND DER ABFLUSSPROJEKTIONEN (BUNTE LINIENSCHAR). FARBIG HERVORGEHOBEN SIND DIE MITTELWERTE DER IN DIESEM BERICHT AUSGEWERTETEN ZEITSCHEIBEN 1961-1990 (GRAU, REFERENZ), 2021-2050 (ROT) UND 2071-2010 (VIOLETT)
53	27	ÄNDERUNGEN IN DER HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER ANDAUERKLASSEN VON UNTERSCHREITUNGSTAGEN DES NIEDRIGEN ABFLUSSSCHWELLENWERTES FDC_Q951961-1990 (~ GLQ) IN EINEM WASSERHAUSHALTSJAHR AM PEGEL KAUB BEI VERGLEICH DER FÜR DAS ENSEMBLE VON ABFLUSSPROJEKTIONEN BERECHNETEN 30-JAHRESPERIODEN 1961-1990, 2021-2050 UND 2071-2100. DIE BALKENHÖHE ZEIGT DEN MITTELWERT UND DIE FEHLERBALKEN DIE GESAMTSPANNE (MINIMUM BIS MAXIMUM) DES ENSEMBLES

Abbildungsverzeichnis

Seite	Abbildung	
54	28	ÄNDERUNGEN DER ANZAHL VON ÜBERSCHREITUNGSTAGEN DES HOHEN ABFLUSSSCHWELLENWERTES FDC_Q011961-1990 (~ HSQ I) IN EINEM HYDROLOGISCHEN JAHR AM PEGEL KAUB. DARSTELLUNG WIE ABBILDUNG 26
54	29	ÄNDERUNGEN IN DER HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER ANDAUERKLASSEN VON ÜBERSCHREITUNGSTAGEN DES HOHEN ABFLUSSSCHWELLENWERTES FDC_Q011961-1990 (~ HSQ I) IN EINEM HYDROLOGISCHEN JAHR AM PEGEL KAUB. DARSTELLUNG WIE ABBILDUNG 27
56	30	ÄNDERUNGEN DER ANZAHL VON UNTERSCHREITUNGSTAGEN DES NIEDRIGEN ABFLUSSSCHWELLENWERTES FDC_Q951961-1990 (~ GLQ) IN EINEM WASSERHAUSHALTSJAHR AM PEGEL BARBY BEI VERGLEICH DER 31-JÄHRIG GLEITENDEN MITTEL BEOBACHTETER ABFLÜSSE (SCHWARZE LINIE) UND DER ABFLUSSPROJEKTIONEN (BUNTE LINIENSCHAR). FARBIG HERVORGEHOBEN SIND DIE MITTELWERTE DER IN DIESEM BERICHT AUSGEWERTETEN ZEITSCHEIBEN 1961-1990 (GRAU, REFERENZ), 2021-2050 (ROT) UND 2071-2010 (VIOLETT)
56	31	ÄNDERUNGEN IN DER HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER ANDAUERKLASSEN VON UNTERSCHREITUNGSTAGEN DES NIEDRIGEN ABFLUSSSCHWELLENWERTES FDC_Q951961-1990 (~ GLQ) IN EINEM WASSERHAUSHALTSJAHR AM PEGEL BARBY BEI VERGLEICH DER FÜR DAS ENSEMBLE VON ABFLUSSPROJEKTIONEN BERECHNETEN 30-JAHRESPERIODEN 1961-1990, 2021-2050 UND 2071-2100. DIE BALKENHÖHE ZEIGT DEN MITTELWERT UND DIE FEHLERBALKEN DIE GESAMTSPANNE (MINIMUM BIS MAXIMUM) DES ENSEMBLES.
57	32	ÄNDERUNGEN DER ANZAHL VON ÜBERSCHREITUNGSTAGEN DES HOHEN ABFLUSSSCHWELLENWERTES FDC_Q011961-1990 (~ HSQ) IN EINEM HYDROLOGISCHEN JAHR AM PEGEL BARBY. DARSTELLUNG WIE ABBILDUNG 30. FARBIG HERVORGEHOBEN SIND DIE MITTELWERTE DER IN DIESEM BERICHT AUSGEWERTETEN ZEITSCHEIBEN 1961-1990 (GRAU, REFERENZ), 2001-2030 (GELB), 2021-2050 (ROT) UND 2071-2010 (VIOLETT)
57	33	ÄNDERUNGEN IN DER HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER ANDAUERKLASSEN VON ÜBERSCHREITUNGSTAGEN DES HOHEN ABFLUSSSCHWELLENWERTES FDC_Q011961-1990 (~ HSQ) IN EINEM HYDROLOGISCHEN JAHR AM PEGEL BARBY. DARSTELLUNG WIE ABBILDUNG 31
59	34	ÄNDERUNGEN DER STÜCKKOSTEN FÜR TROCKENES MASSENGUT AUF DEM RHEIN FÜR 2 RELATIONEN (BERGFAHRT), 7 VERSCHIEDENE SCHIFFSTYPEN UNTER DER ANNAHME VON ZWEI ABFLUSSSZENARIEN FÜR DIE NAHE UND FERNE ZUKUNFT IM VERGLEICH ZUR REFERENZSITUATION 1961-1990

Seite Abbildung

Abbildungsverzeichnis

Seite	Abbildung	
60	35	MITTLERE ÄNDERUNG DER JÄHRLICHEN GESAMTTRANSPORTKOSTEN AUF DEM RHEIN FÜR 6 RELATIONEN VON/NACH ROTTERDAM (BERG- UND TALFAHRT) UNTER DER ANNAHME VON 5 VERSCHIEDENEN ABFLUSS-SZENARIEN (VGL. ABSCHNITT 4.4), DER HEUTIGE FLOTTENZUSAMMEN-SETZUNG (FLOTTENSZENARIO "STATUS QUO") UND DES HEUTIGEN GÜTERVERKEHRSAUFKOMMENS FÜR DIE NAHE UND FERNE ZUKUNFT IM VERGLEICH ZUR REFERENZSITUATION 1961-1990
61	36	MITTLERE WIRKUNG UNTERSCHIEDLICHER ANPASSUNGSSZENARIEN AUF DIE ÄNDERUNGEN DER JÄHRLICHEN GESAMTTRANSPORTKOSTEN AUF DEM RHEIN UNTER ANNAHME EINES PESSIMISTISCHEN SZENARIOS (MODELLKETTE: A1B_EH5R1_CCLM_LS_EPW_HBV_SOBEK-KLIWAS_KST, VGL. ABBILDUNG 35)
63	37	JAHRESVERLAUF DER MITTLEREN BETROFFENHEIT DER VERLADENDEN WIRTSCHAFT AM RHEIN IN DER NAHEN UND FERNEN ZUKUNFT IM VERGLEICH ZUR REFERENZSITUATION 1961-1990, AUSGEDRÜCKT ALS ABWEICHUNG VON DER "OPTIMALEN" (GEGENWÄRTIGEN) LAGERHALTUNG. EXEMPLARISCHE DARSTELLUNG FÜR DIE ENERGIEBRANCHE AM MITTEL- UND OBERRHEIN AUF GRUNDLAGE VON 2 VERSCHIEDENEN ABFLUSSSZENARIEN (VGL. ABSCHNITT 4.4) OHNE BERÜCKSICHTIGUNG VON ANPASSUNGSMAßNAHMEN
64	38	MITTLERE WIRKUNG UNTERSCHIEDLICHER ANPASSUNGSSZENARIEN AUF DIE ABWEICHUNGEN VON DER "OPTIMALEN" (GEGENWÄRTIGEN) LAGERHALTUNG (VGL. ABBILDUNG 37). EXEMPLARISCHE DARSTELLUNG FÜR DIE ENERGIE-BRANCHE AM MITTEL- UND OBERRHEIN AUF GRUNDLAGE EINES PESSIMISTISCHEN SZENARIOS (MODELLKETTE: A1B_EH5R1_CCLM_LS_EPW_HBV_SOBEK-KLIWAS_KST)
72	39	ÄNDERUNG DES MITTLEREN JAHRESABFLUSSES IM RHEINEINZUGSGEBIET IN DER NAHEN ZUKUNFT. EXEMPLARISCHER VERGLEICH VON KLIWAS-ERGEBNISSEN MIT ERGEBNISSEN ANDERER PROJEKTE NACH MOSER (2013, ERGÄNZT)
72	40	ÄNDERUNG DES MITTLEREN JAHRESABFLUSSES IM ELBEEINZUGSGEBIET IN DER NAHEN UND FERNEN ZUKUNFT. EXEMPLARISCHER VERGLEICH VON KLIWAS-ERGEBNISSEN (HIER: LINGEMANN ET AL., 2013) MIT ANDEREN DER LITERATUR ENTNOMMENEN ERGEBNISSEN
73	41	MITTLERER JAHRESGANG DES ABFLUSSES (MOMQ) AM PEGEL HOFKIRCHEN (OBERE DONAU) IN DER NAHEN ZUKUNFT. EXEMPLARISCHER VERGLEICH VON KLIWAS-ERGEBNISSEN MIT DEN ERGEBNISSEN VON GLOWA-DANUBE (2010) NACH KLEIN ET AL. (2012B)

1 Kurzfassung

Grundlagen

- Ausgehend von verfügbaren regionalen Klimaprojektionen und hydrologischen Modellen wurde eine **Modellkette** aufgebaut, mit der die Auswirkungen von globalen Änderungen der Zusammensetzung der Erdatmosphäre auf das spezifische Abflussgeschehen an wichtigen Pegeln von Rhein, Elbe und Donau sowie deren wichtigsten schiffbaren Nebenflüssen simuliert werden können.
- Es wurde eine Vielzahl von Abflussprojektionen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts erstellt (sog. **Multi-Modell-Ensemble**), die den Kenntnisstand der Klimamodellierung im Jahr 2012 wiedergibt und als Grundlage für die Ableitung von Abflussszenarien dient.
- Die Abflussszenarien werden in Form so genannter **Szenarienkorridore** für ausgewählte Kennwerte (mittlerer, niedriger und hoher Abfluss) und Pegel dargestellt. Diese beinhalten Informationen über Richtung und Grad der simulierten Änderungen, sowie die damit verbundenen Ungewissheiten und Unsicherheiten.
- Es wurde ein **Bewertungsschema** erarbeitet, um die ermittelten Änderungen des Abflussgeschehens in ihrer Bedeutung für die verschiedenen Handlungsfelder in transparenter Weise einzuordnen und regional und zeitlich zu priorisieren.
- Für den Rhein als der wichtigsten Wasserstraße Europas wurden für verschiedene Abflussszenarien die **Transportkosten** für einzelne Schiffstypen und die **Verwundbarkeit** der verladenden Industrie ermittelt.

Hinweise zur Interpretation

- Im vorliegenden Dokument werden langfristige Änderungen des Abflussgeschehens, gemittelt über mehrere Jahrzehnte in Vergangenheit und Zukunft betrachtet. Diesen langfristigen Änderungen ist eine hohe **natürliche Variabilität** von Jahrzehnt zu Jahrzehnt, von Jahr zu Jahr und innerhalb der Jahre überlagert. Deshalb können mehrjährige Phasen von den langfristigen durchschnittlichen Änderungen abweichen. Ebenso ist das Auftreten von sehr seltenen extremen Hoch- und Niedrigwasserereignissen unabhängig von den mittleren Entwicklungen weiterhin jederzeit möglich.
- Die Szenarienkorridore können, müssen aber nicht die "**wahre**" **Zukunft** beinhalten. Um die spezifischen Wirkungen des anthropogenen Klimawandels transparent zu machen, wurden neben den Szenarien zur Entwicklung der Treibhausgasemissionen (hier: meist SRES A1B) keine weiteren Szenarienannahmen getroffen. So bleiben weitere Einflüsse möglicher, aber ebenfalls ungewisser Ent-

wicklungen z.B. der regionalen Demographie, der Landnutzung, der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen oder der Wasserbewirtschaftung auf das Abflussgeschehen bewusst unberücksichtigt und gegenüber heute unverändert. Ob die tatsächlich eintretende Zukunft innerhalb der Szenarienkorridore liegen wird, hängt somit von den Entwicklungspfaden ab, für die sich die Gesellschaft entscheidet.

- Insofern wurde der dargelegte "**Handlungsbedarf**" unter der Prämisse abgeleitet, dass sich die Ziele des Verwaltungshandelns in Zukunft nicht ändern und die heutige Situation erhalten oder verbessert werden soll. "Handlungsbedarf" bedeutet dabei, dass einer bestimmten Kombination aus Handlungsfeld, Flussgebiet und Zeithorizont - motiviert durch die projizierten Auswirkungen des Klimawandels - seitens der verantwortlichen Verwaltungseinheiten erhöhte Aufmerksamkeit gewidmet werden sollte. Hierzu gehört auch die vertiefte Sichtung und Bewertung von möglichen Betroffenheiten des jeweiligen Handlungsfeldes. Ob sich aus dem so definierten "Handlungsbedarf" dann tatsächlich auch ein "**Anpassungsbedarf**" ableiten wird, muss dann ggf. in weiteren Analyseschritten ermittelt werden.
- Die Szenarienkorridore sind nicht als "**wahrscheinlich**" im probabilistischen Sinne zu verstehen, sondern geben je Kennwert und Pegel den Wertebereich wieder, der ausgehend von den verfügbaren und plausibilisierten Datengrundlagen besonders oft projiziert wird. Die Informationen sind insbesondere bestimmt durch
  a) die angenommene Entwicklung der Treibhausgasemissionen (meist gemäß A1B) sowie den angenommenen Zustand von Demographie, Landnutzung und Wirtschaft in Mitteleuropa,
  b) die Charakteristika und spezifischen Unsicherheiten der verfügbaren und ausgewählten Klima- und hydrologischen Modelle sowie
  c) die Wahl der Bezugsperioden und Kennwerte.

Hydrologische Auswirkungen und Handlungsbedarf

- Ausgehend von den Szenarienkorridoren wird deutlich, dass nach dem Kenntnisstand der Klimaforschung des Jahres 2012 die mit Wasserfragen befassten Geschäftsbereiche von BMVI und BMUB sowie weiteren Institutionen in der nachfolgend beschriebenen Weise durch den Klimawandel betroffen sind.
- Die vorliegenden Auswertungen spezifizieren regionale Schwerpunkte und Prioritäten des Handlungsbedarfes mit Relevanz z.B. für die Handlungsfelder Wassergewinnung, Wasserbewirtschaftung, ökologische Durchgängigkeit, Hochwasserschutz und Schiffbarkeit.
- Hinsichtlich einer Verminderung des mittleren **jährlichen Wasserdargebot**es lassen die Auswertungen bis zur Mittes des 21. Jahrhunderts in keinem der untersuchten Einzugsgebiete zeitnahen Handlungsbedarf erkennen. Diese Thematik ist jedoch weiter zu beobachten und kann bei fortschreitender

klimawandelbedingter Veränderung des Wasserhaushalts (gemäß SRES A1B) in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts vor allem für Elbe und Donau, weniger für den Rhein relevant werden.

- Zeitnahen Handlungsbedarf rufen die projizierten Änderungen in der **jahreszeitlichen Wasserverteilung** im Elbeeinzugsgebiet und im Donaueinzugsgebiet oberhalb der Innmündung hervor. Hier ist den für die nahe Zukunft projizierten abnehmenden Sommerabflüssen besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Für das Rheingebiet und die gegenwärtig schneedominierten Abflussregime der Donau zeichnet sich in dieser Hinsicht Handlungsbedarf in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts ab.
- Für Nutzungen oder Funktionen, die gegenüber **Niedrigwassersituationen** sensitiv sind, ist angesichts der vorgestellten Ergebnisse lediglich im Donaueinzugsgebiet oberhalb der Innmündung zeitnaher Handlungsbedarf angezeigt. An Rhein (unterhalb Maxau) und Elbe ist im weiteren Verlauf des Jahrhunderts Handlungsbedarf gegeben, wenn der Klimawandel wie projiziert fortschreitet.
- Für die nächsten Jahrzehnte wird eine Zunahme der mittleren **jährlichen Hochwasserabflüsse** für das Rheineinzugsgebiet außerhalb des unmittelbaren Einflussbereichs der Alpen (unterhalb Maxau) sowie für das Elbeeinzugsgebiet projiziert. In diesen Gebieten müssen demnach Betroffenheiten gegenüber Hochwasser genauer betrachtet werden. Dazu gehört auch die Bewertung von besonders seltenen bzw. extremen Hochwasserereignissen (HQ50 und größer) unter veränderten Randbedingungen, die weitere methodische Schritte erfordert.
- Ausgehend von den projizierten Änderungen des Abflussgeschehens ergibt sich hinsichtlich der **Schifffahrt** in der nahen Zukunft nur an der Donau oberhalb der Innmündung zusätzlicher Handlungsbedarf (Einschränkungen durch häufigere Niedrigwasser). An den anderen Wasserstraßen wird zunächst kein über das heutige Maß hinausgehender Handlungsbedarf gesehen. Gegen Ende des 21. Jahrhunderts wird jedoch in allen drei Einzugsgebieten eine Zunahme niedrigwasserbedingter Einschränkungen projiziert. Ausgehend von einem ungünstigen Abflussszenario errechnen sich für diese Zeit klimabedingte Steigerungen der jährlichen schiffsseitigen **Transportkosten auf dem Rhein** von rund 9% gegenüber der Gegenwart.
- **Anpassungsoptionen** bestehen u.a. für die Bereiche Schiffstechnik, Schiffsbetrieb, Flottenstruktur, Logistik und Wasserbau. Die hier simulierten Anpassungsszenarien können die negativen Auswirkungen auf die Transportkosten, die sich unter Annahme eines pessimistischen Abflussszenarios ergeben, halbieren. Aufgrund der langen Vorlaufzeit einiger Anpassungsoptionen wird zeitnaher Handlungsbedarf i.S. einer fachlichen Diskussion mit den zu beteiligenden Institutionen gesehen.

2 Untersuchungsziele und -gebiet

Die Schifffahrt ist ein wichtiger Bestandteil des europäischen Verkehrssystems und in vielen Regionen ein wesentlicher Wirtschaftsfaktor. Ihre Zuverlässigkeit hängt zu einem großen Teil von natürlichen Rahmenbedingungen ab. Der globale Klimawandel steht im Verdacht, diese Rahmenbedingungen aufgrund seines Einflusses auf den Wasserhaushalt und das Abflussgeschehen zum Nachteil der Schifffahrt zu verändern (z.B. „Ebbe für die Binnenschifffahrt“, Deutschlandfunk am 13.04.2012).

Vor diesem Hintergrund wurde der Kenntnisstand hinsichtlich der verkehrswasserwirtschaftlichen Auswirkungen klimatischer Veränderungen in Mitteleuropa im Rahmen des Forschungsprogramms KLIWAS (Pilotprojekt seit 2007 und Projekt 4.01) zusammengestellt und bewertet.

Wie nachfolgend weiter erläutert, wurde die Thematik auf die folgenden Zielstellungen heruntergebrochen:

- Erstellung eines Ensembles von Abflussprojektionen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts auf der Grundlage der verfügbaren aktuellen globalen und regionalen Klimaprojektionen,
- Einordnung und Bewertung der berechneten Abflussprojektionen im Vergleich zu den beobachteten Veränderungen im Zeitraum 1961-2010 sowie unter Berücksichtigung der daten- und modelltechnischen Unsicherheiten,
- Auswahl und Bereitstellung von Abflussprojektionen für weitergehende gewässerkundliche und wasserwirtschaftliche Klimafolgenuntersuchungen des KLIWAS-Forschungsprogramms (z.B. Auenökologie, Gewässermorphologie, Gewässergüte- und -ökologie, Wasserbewirtschaftung sowie Binnenschifffahrt),
- Aufbau und Einsatz eines Instrumentariums zur Analyse konkreter Folgen der projizierten Veränderungen für die Binnenschifffahrt (Transportkosteneffekte) und die verladende Wirtschaft sowie möglicher Anpassungsoptionen für diese Wasserstraßennutzer (nur Rhein),
- Transparente Kommunikation des gegenwärtigen Wissenstandes zu den Auswirkungen des globalen Klimawandels auf den Wasserhaushalt und das Abflussgeschehen von Rhein, Elbe und Donau sowie größerer Nebenflüsse nebst Bewertung seiner Belastbarkeit.

Abbildung 1 gibt einen Überblick der betrachteten Einzugsgebiete sowie der Pegel, für die detaillierte Auswertungen durchgeführt wurden. Die Wahl von Rhein, Elbe und Donau als Hauptuntersuchungsgebiete folgte der Priorisierung der BWaStr in der (fach-)öffentlichen Diskussion bzgl. der Betroffenheit der Binnenschifffahrt durch den Klimawandel (s. Pressemeldungen in Abschnitt 3). Ferner decken diese Einzugs-

gebiete das in Mitteleuropa anzutreffende Spektrum von Naturräumen sowie wichtige Wirtschafts- und Abflussregime ab. Der Rhein liefert die Hinterlandanbindung u.a. für Europas größten Seehafen Rotterdam und ist eine der wichtigsten Binnenwasserstraßen im Wasserstraßensystem Europas. Aufgrund seiner besonderen Rolle für die Binnenschifffahrt und die verladende Wirtschaft wurden diese Aspekte hier exemplarisch vertieft behandelt.

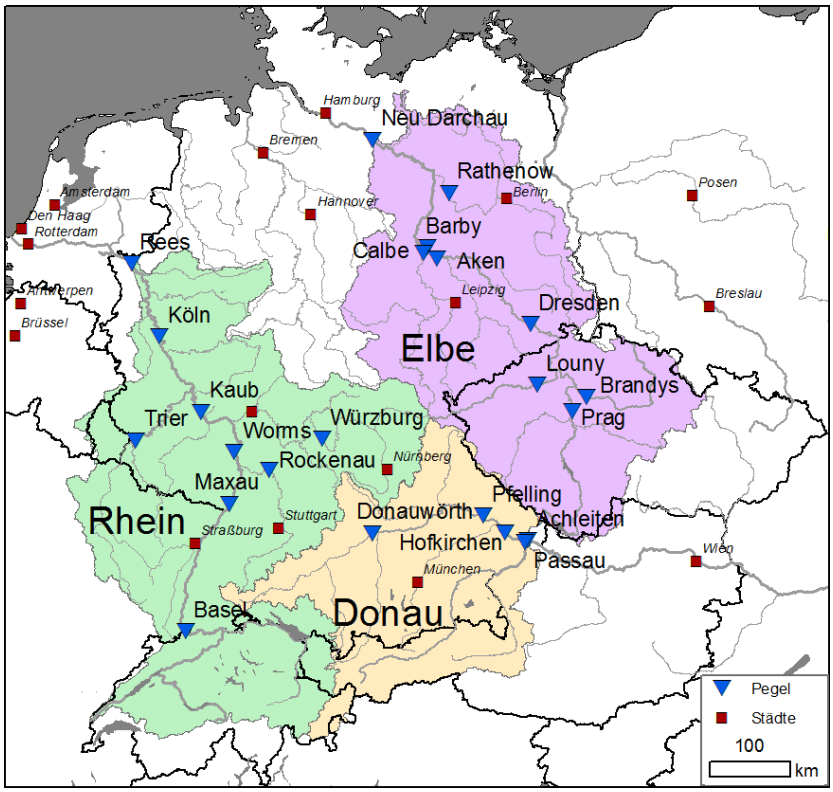

Abbildung 1: Karte der untersuchten Einzugsgebiete und Pegel (blaue Dreiecke). Ortslagen (rote Quadrate)

Der vorliegende Bericht liefert einen Überblick der wesentlichen Ergebnisse, die für die genannten Einzugsgebiete und Pegel erarbeitet wurden. Umfassendere Darstellungen sowie Verweise auf weitere Hintergründe finden sich bei Nilson et al. (2015, Rhein), Krahe et al. (2015, Elbe) und Klein et al. (2015, Donau).

Die Interpretation der ermittelten Änderungen hydrologischer Kennwerte (vgl. Abschnitt 4.2, Seite 23) muss regional differenziert erfolgen und die gegenwärtigen (beobachteten) Abflussregime in verschiedenen Einzugsgebieten und Flussabschnitten einbeziehen (Abbildung 2). Kennzeichnend sind hier folgende Regime-Typen (nach Pardé, 1933):

1. Schneeregime, die durch hohe Abflüsse in den Sommermonaten (Mai-Aug.) und niedrige Abflüsse in den Wintermonaten (Nov.-Feb.) charakterisiert sind. Sie sind überall dort vorzufinden, wo der Einfluss der Alpen bestimmend ist (Oberrhein, Donau unterstrom Inn-Zufluss).

2. Ein Regen-Schneeregime, das durch hohe Abflüsse in den Frühlingsmonaten (Mrz.-Mai) und niedrige Abflüsse in den Sommermonaten (Jul.-Nov.) geprägt ist. Sie sind an vielen Elbe-Pegeln vorzufinden.
3. Ein Regen-Regime, das typischerweise hohe Winterabflüsse (Dez.-Mrz.) und niedrige Sommerabflüsse (Jun.-Sep.) aufweist und für die Mittelgebirgsräume prägend ist.
4. Komplexe Regime, in denen sich die gegenläufigen Effekte von Schnee- (vgl. Regime 1) und Regendominanz (vgl. Regime 3) teilweise ausgleichen. Die saisonalen Unterschiede sind hier (z.B. am Rhein unterstrom der Main-Mündung oder an der Donau oberstrom der Inn-Mündung) im Vergleich zu den anderen Regimen schwach ausgeprägt.

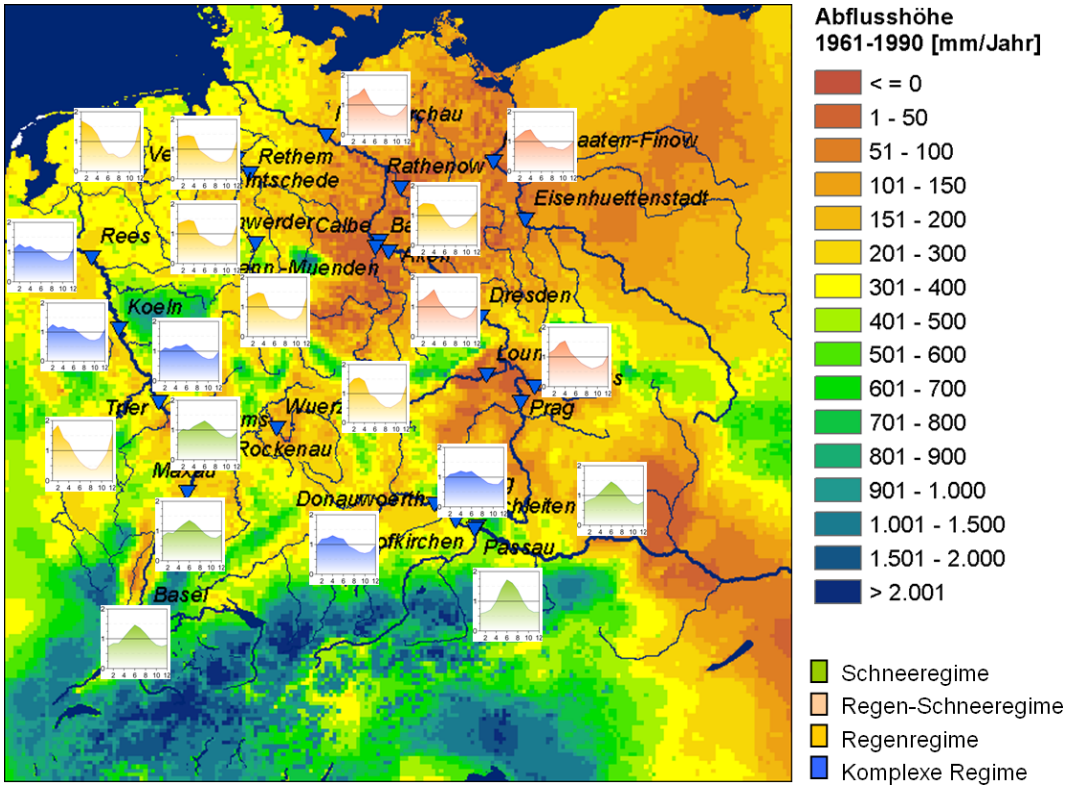

Abbildung 2: Karte der Abflusshöhen und Abflussregime in Mitteleuropa.
Die Diagramme zeigen den Saisonalitätsindex nach Pardé (Zeitraum 1961-1990), Abflusshöhe nach HAD (2003, ergänzt)

Zusätzlich erfolgt eine regionale Gliederung der genannten Abflussregime entlang der generellen klimatischen Gradienten in Mitteleuropa. So sind im Süden und Westen des Untersuchungsgebietes (z.B. Rhein, Donau) die Niederschläge deutlich höher als im Osten (z.B. Elbe), was im Osten bei einer gegenüber dem Westen nur leicht geringeren Verdunstung zu erheblich geringeren Abflüssen führt (Abbildung 2; vgl. Maurer et al, 2011).

3 Stand der Forschung

Die Literaturlage bzgl. der Klimafolgen für den Wasserhaushalt und die Schifffahrt der BWaStr Rhein, Elbe und Donau ist einerseits sehr reichhaltig, andererseits sehr heterogen. So konstatierte z.B. die IKSR (2009) nach Sichtung von rund 100 verschiedenen Quellen, dass im Rheineinzugsgebiet "detaillierte quantitative Vergleiche und regionale Differenzierungen der Änderungen […] aufgrund der Methodenvielfalt nicht möglich" sind. Auch in den anderen Einzugsgebieten unterscheiden sich verschiedene Studien (z.B. Döll, P. & Vassolo, 2002; GLOWA-Danube, 2010; Hattermann et al., 2010; Hanel et al., 2010) hinsichtlich

- der Datengrundlagen
- der Methoden (z.B. Biaskorrektur)
- des Bezugsgebietes
- des Bezugszeitraums
- der ausgewerteten Kennwerte
- der Zielrichtung und Interpretation (z.B. Extremszenario, Unsicherheitsbewertung)

Trotz dieser Schwierigkeiten, wird eine hohe Betroffenheit der Binnenschifffahrt durch den Klimawandel in der (Fach-)Öffentlichkeit diskutiert. Die vorliegende Studie leistet einen Beitrag zur Versachlichung dieser Diskussion in dem einige der genannten Defizite behoben werden. Sie

- basiert auf einem einzugsgebietsweit einheitlichen Untersuchungsansatz und Datenpool.
- berücksichtigt und bewertet alle verfügbaren Klimaprojektionen (Stand: 2012).
- nimmt das gesamte Abflussspektrum (hohe, mittlere und niedrige Abflüsse) mit Ausnahme extremer Hochwasserereignisse in den Fokus.
- liefert spezielle Auswertungen für die Binnenschifffahrt und die verladende Wirtschaft (nur für den Rhein als wichtigste Bundeswasserstraße im Binnenbereich.

Die hier dargestellten Konzepte und Ergebnisse wurden zu einem großen Teil bereits an anderer Stelle publiziert. Der jeweilige Bearbeitungsstand der Jahre 2009, 2011 und 2013 findet sich in BMVBS (2009, 2012 und 2013). Eine generelle Diskussion der Methoden lieferten Maurer et al. (2011) und Merz et al. (2012). Spezifische datentechnische und konzeptionelle Aspekte wurden z.B. bei Krahe et al. (2010; Wetterlagen), Mudelsee et al. (2010) sowie Nilson et al. (2010a; Bias-Korrektur), Nilson et al. (2012b; Klimawandel Alpenraum) und Nilson & Krahe (2012; Szenarienbildung)

beleuchtet. Krahe et al. (2009) und Bosshard et al. (2013) versuchten eine Identifikation verschiedener Unsicherheitsquellen in den Abflussprojektionen.

Eine umfassende, vergleichende Darstellung von Daten, Methoden und Ergebnissen für das **Rheineinzugsgebiet** wurde zusammen mit wasserwirtschaftlichen Institutionen aus der Schweiz, Luxemburg, den Niederlanden sowie dem Bundesland Hessen unter dem Dach der KHR erarbeitet (Projekt Rheinblick2050; Görgen et al., 2010). Die dort enthaltenen Informationen wurden aufgrund der Kohärenz des Untersuchungsrahmens und der Aufbereitung der Ergebnisse weithin zur Kenntnis genommen und haben Eingang in politische Entscheidungsprozesse gefunden. Sie stellen die Grundlage einer Szenarien-Studie der IKSR (2011) dar und wurden schließlich im Oktober 2013 durch die Umweltminister der Rheinanliegerstaaten zur Kenntnis genommen.

Die für das Rheineinzugsgebiet erarbeiteten Konzepte (Nilson et al., 2010b) wurden in analoger Weise für das **Elbeeinzugsgebiet** (z.B. Lingemann et al., 2013) und das Einzugsgebiet **der oberen Donau** (z.B. Klein et al, 2012a; Klein et al, 2012b) umgesetzt.

Spezielle Analysen hinsichtlich der Betroffenheit der **Binnenschifffahrt und der verladenden Wirtschaft** im Rheingebiet haben Holtmann et al. (2012), Scholten (2010), Scholten & Rothstein (2012), Scholten et al. (2014) Nilson et al. (2012a) und Nilson & Krahe (2013) vorgelegt.

4 Daten und Methoden

Die Simulationen des zukünftigen Wasserhaushalts und des Abflussgeschehens basieren auf einer komplexen Modellkette (Abbildung 3). Mit dieser werden mögliche Entwicklungspfade der Weltwirtschaft und ihre Auswirkungen auf das globale und regionale Klimasystem (u.a. über steigende CO_2-Emissionen und resultierendem Energiehaushalt) in Klimagrößen umgesetzt, die für den regionalen Wasserhaushalt von Bedeutung sind. Hierzu gehören die Lufttemperatur (T) und der Niederschlag (P). Vergleiche zwischen diesen Modelldaten und Beobachtungsdaten desselben Zeitraums zeigen oft systematische Unterschiede (so genannter Bias), die mittels statistischer Korrekturmodelle korrigiert werden. Auf Grundlage derart modifizierter hydrometeorologischer Größen (T* bzw. P*) werden mittels regionaler hydrologischer Modelle letztlich Änderungen des Abflusses (Q) ermittelt.

Abbildung 3: Schema einer Modellkette der hydrologischen Klimafolgenforschung.

Jedem Modell der Kette liegen Annahmen und Daten zugrunde, deren Genauigkeit begrenzt ist. Es ist gängige Praxis, durch die Verwendung verschiedener Modelle, einen Eindruck von den jeweiligen Unsicherheiten zu erlangen (sog. Multimodell-Ansatz). Der Schwerpunkt dieser Untersuchung lag auf der Darstellung der Unsicherheiten infolge unterschiedlicher meteorologischer Eingangsdaten (Klimamodellketten; vgl. Abschnitt 4.1). Andere Glieder der Modellkette wie das Biaskorrekturverfahren oder das hydrologische Modell (vgl. Abschnitt 4.2) wurden bisher nur in Fallstudien variiert (Nilson et al., 2010a; Görgen et al., 2010; hier nicht dargestellt). Entsprechend muss im Hinterkopf behalten werden, dass unter Berücksichtigung derartiger Unsicherheitsquellen die Möglichkeit besteht, dass andere Sensitivitäten ermittelt werden. Hier sind weitere wissenschaftliche Untersuchungen wünschenswert.

4.1 Aufbereitung und Bewertung der Klimamodelldaten

Tabelle 1 gibt einen Überblick der berücksichtigten Klimamodellketten. Diese unterscheiden sich in der Kombination der Elemente „Emissionsszenario“ (beobachtete Emissionen „C20“ kombiniert mit SRES-Szenarien; Nakicenovic et al., 2000), "globales Klimamodell" (GCM) und "Regionalisierungsverfahren" (RCM). Das dargestellte Multi-Modell-Ensemble repräsentiert die Datengrundlagen, die Ende 2012 verfügbar waren (Jacob 2006; Jacob et al., 2009; Meehl et al., 2007; Keuler et al.

2009; Van der Linden & Mitchell, 2009). Die verschiedenen Schritte der auf diese Daten angewendeten Aufbereitungs- und Bewertungsprozedur sind in Abbildung 4 schematisch zusammengefasst.

Tabelle 1: Überblick und Bewertung der untersuchten Klimamodellketten. "X" = bewertet und verwendet; "(X)" = bewertet, jedoch aus Konsistenzgründen (nur SRES A1B) nicht berücksichtigt; "0" = bewertet und verworfen; "RL" = Repräsentativer Lauf, der für weitere Modellierungsschritte (hier: Wirtschaft am Rhein) ausgewählt wurde; "-" = für genanntes Einzugsgebiet nicht berücksichtigt. Die mit "#" markierten Läufe enden 2050 oder davor bzw. sind zeitlich nicht kontinuierlich. Alle übrigen Läufe umfassen mindestens den Zeitraum 1961-2099. Hinweise zur Namenskonvention finden sich im Anhang (Abschnitt 10).

Nr.	Klimamodellketten (C20-SRES_GCM_RCM)	Quelle (Institution)	Rhein	Elbe	Donau	Wirtschaft
1	C20-A1B_ARPEGE_ALADIN45#	CNRM	X	X	X	
2	C20-A1B_ARPEGE_ALADIN51	CNRM	X	X	X	
3	C20-A1B_ARPEGE_HIRHAM	DMI	0	0	0	
4	C20-A1B_BCM_HIRHAM#	METNO	X	-	X	
5	C20-A1B_BCM_HIRHAM5	DMI	-	X	X	
6	C20-A1B_BCM_RCA3	SMHI	X	X	X	RL
7	C20-A1B_CGCM3_CRCM#	OURANOS	0	0	0	
8	C20-A1B_ECHAM5r1_CLM24	GKSS, MPI-M	X	X	X	RL
9	C20-A1B_ECHAM5r1_REMO-UBA	MPI-M, UBA	X	X	X	
10	C20-A1B_ECHAM5r2_CLM24	GKSS, MPI-M	X	X	X	
11	C20-A1B_ECHAM5r2_REMO-BFG	MPI-M, BfG	X	X	X	
12	C20-A1B_ECHAM5r3_HIRHAM5	DMI	0	0	0	
13	C20-A1B_ECHAM5r3_RACMO	KNMI	X	X	X	
14	C20-A1B_ECHAM5r3_RCA3	SMHI	X	X	X	
15	C20-A1B_ECHAM5r3_REGCM	ICTP	X	X	X	
16	C20-A1B_ECHAM5r3_REMO-KLM	MPI-M	X	X	X	
17	C20-A1B_ECHAM5r3_REMO-ENS	MPI-M	X	X	X	RL
18	C20-A1B_HADCMQ0_CLM24	ETHZ	X	X	X	
19	C20-A1B_HADCMQ0_HIRHAM#	METNO	X	X	X	
20	C20-A1B_HADCMQ0_HADRMQ0	HC	X	X	X	RL
21	C20-A1B_HADCMQ0_PRM#	UCLM	0	0	0	
22	C20-A1B_HADCMQ0_REMO-BFG	MPI-M, BfG	X	-	X	
23	C20-A1B_HADCMQ0_RRCM#	VMGO	0	0	0	
24	C20-A1B_HADCMQ3_HADRMQ3	HC	X	X	X	
25	C20-A1B_HADCMQ3_RCA3	SMHI	X	X	X	
26	C20-A1B_HADCMQ16_HADRMQ16	HC	0	0	0	
27	C20-A1B_HADCMQ16_RCA3	C4I	X	X	X	
28	C20-A1B_IPSL_CLM48[#]	GKSS	0	0	0	
29	C20-A1B_MIC_RACMO	KNMI	X	X	X	
30	C20-A2_ECHAM5r1_REMO-UBA	MPI-M, UBA	(X)	(X)	(X)	
31	C20-A2_ECHAM5r3_RCA3#	C4I	(X)	(X)	(X)	
32	C20-B1_ECHAM5r1_CLM24	GKSS, MPI-M	(X)	(X)	(X)	RL
33	C20-B1_ECHAM5r1_REMO-UBA	MPI-M, UBA	(X)	(X)	(X)	
34	C20-B1_ECHAM5r2_CLM24	GKSS, MPI-M	(X)	(X)	(X)	
35	C20-E1_ECHAM5Cr1_REMO-BFG	MPI-M, BfG	(X)	(X)	(X)	
36	C20-E1_ECHAM5Cr4_REMO-BFG	MPI-M, BfG	(X)	(X)	(X)	

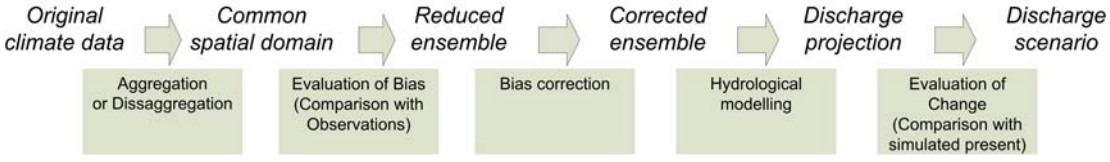

Abbildung 4: Schema des Auswertungsrahmens zur Erstellung von Abflussszenarien (Lingemann et al., 2013).

Um verschiedene Klimamodellketten vergleichend bewerten zu können, ist es in einem ersten Schritt erforderlich, die auf unterschiedlichen Rechengittern vorliegenden Originaldaten in einen gemeinsamen Raumbezug zu überführen (z.B. Krahe et al., 2009). Hier wurden alle Daten auf die jeweilige Gebietsgliederung der drei verwendeten hydrologischen Modelle HBV134 (Rhein), HBV-D (Elbe) und COSERO (obere Donau) aggregiert.

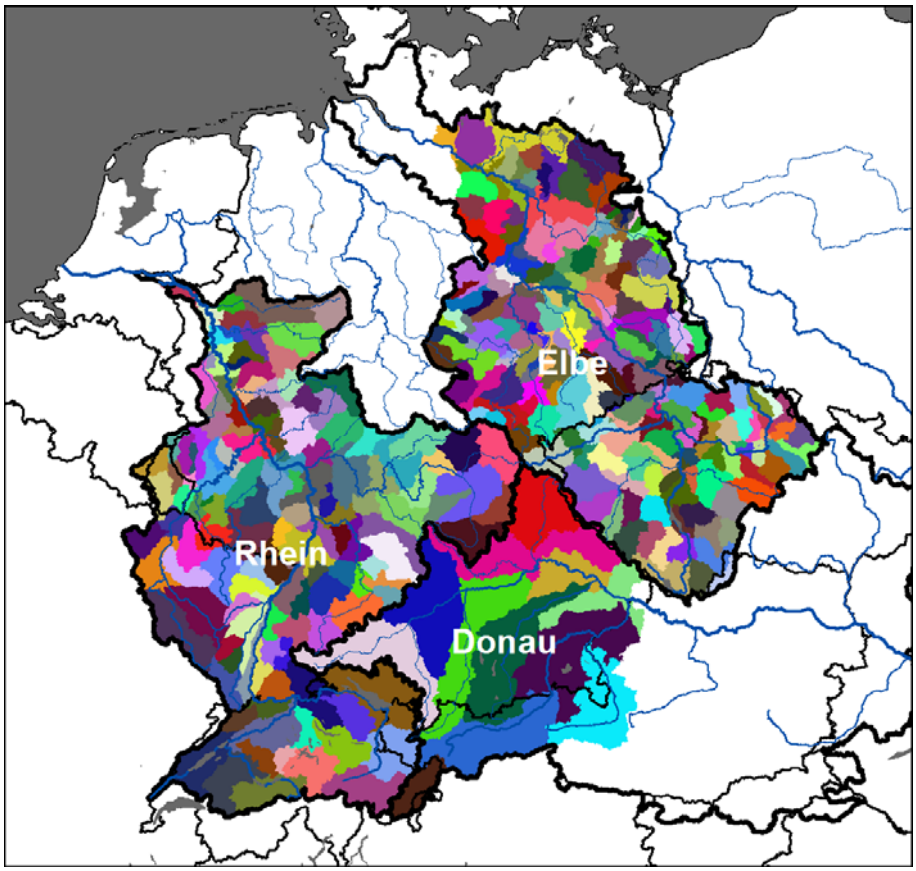

Abbildung 5: Gebietsbezüge der hydrologischen Modelle HBV134 (Rhein), COSERO (obere Donau) und HBV-D (Elbe).

In einem weiteren Schritt wurden die aufgelisteten Modellketten einer grundlegenden Plausibilitätsprüfung unterzogen. Kriterien sind hierbei die systematischen Abweichungen der modellierten Lufttemperaturen und Niederschläge von den gemessenen Werten der Periode 1961-1990 je meteorologischer Jahreszeit und Teileinzugsgebiet. Da Modelle die Realität nur angenähert abbilden können, ist es unvermeidlich, dass Ergebnisse von Klimamodellketten gewisse Abweichungen von Beobachtungsdaten zeigen. Solange interessierende Kenngrößen auf interessierenden Skalen gut abgebildet werden, ist ein Modell brauchbar. Kommt es zu systematischen Abweichungen (sog. Bias), kann dieser durch Bias-Korrekturverfahren reduziert oder eliminiert werden. Einzelne Ketten verfehlen die Beobachtungen jedoch so weit, dass ein Einsatz für die hydrologische Klimafolgenanalyse nicht sinnvoll scheint. Somit wurde das Ensemble auf Grundlage der Bias-Prüfung um 7 Modellketten reduziert (vgl., Nilson

et al. 2010b, Nilson et al., 2012, Lingemann et al. 2013), die für eine oder mehrere Jahreszeiten einen besonders hohen Bias aufweisen ("0" in Tabelle 1).

Wie aus Tabelle 1 hervorgeht, ist das Klimamodellensemble recht unausgewogen. So basieren die mit Abstand meisten Projektionen auf dem Emissionsszenario A1B, während andere Emissionsszenarien (A2, B1 oder E1) in der Klimafolgenforschung kaum berücksichtigt wurden. Aus Gründen der Konsistenz mit anderen Projekten innerhalb und außerhalb des Forschungsverbundes KLIWAS beschränken sich somit die hier vorgestellten Auswertungen auf das Emissionsszenario A1B. Infolgedessen reduziert sich das Ensemble der Projektionen um weitere 7 Modellketten ("(X)" in Tabelle 1). Auswertungen, die andere Emissionsszenarien einbeziehen finden sich z.B. bei Nilson et al. (2010c).

Somit bleiben nach der Bewertung des Bias und der Einschränkung auf das Emissionsszenario A1B für Rhein, Elbe und Donau jeweils etwa 20 Zukunftssimulationen für die weitere Analyse übrig[1]. Für diese Klimamodellketten muss der Bias korrigiert werden, um sie für die Wasserhaushaltsmodellierung einsetzen zu können. Dabei werden die je Modellkette simulierten Temperatur- und Niederschlagswerte anhand vieljähriger monatlicher und teileinzugsgebietsbezogener Skalierungsfaktoren auf das Niveau der Beobachtungsdaten, die den hydrologischen Modellen zugrunde liegen, linear skaliert. Implizit wird angenommen, dass die für die Periode 1961-1990 bestimmten Skalierungsfaktoren für den gesamten Untersuchungszeitraum (1950-2100) gültig sind. Das hier verwendete Linear Scaling-Verfahren folgt Lenderink et al. (2007). Es hat sich im Vergleich zu anderen Bias-Korrekturverfahren (Moment Scaling, Quantile Mapping) für die hier verwendeten Kennwerte des Hoch-, Mittel- und Niedrigwasserbereichs als geeignet erwiesen (vgl. Nilson et al., 2010a). Andere Verfahren sind bei vergleichbarem Ergebnis technisch aufwändiger (Moment Scaling), beeinflussen das ursprüngliche Änderungssignal der Klimamodelle (Quantile Mapping, Kling et al., 2012) oder übernehmen die Abfolge meteorologischer Ereignisse aus der Beobachtung statt aus der Zukunftssimulation (Delta Change).

[1] Rhein (21/18 Projektionen), Elbe (20/18 Projektionen), obere Donau (22/19 Projektionen) für die nahe/ferne Zukunft. Die Abweichungen zwischen den Einzugsgebieten sind dem Projektverlauf geschuldet.

4.2 Hydrologische Modellierung und Auswertungsstatistik

Die hydrologische Modellierung erfolgt mit verschiedenen semidistributiven konzeptionellen Modellen (vgl. Tabelle 2). Der Ansatz folgt für die drei Einzugsgebiete dem weit verbreiteten HBV Modell (Bergström 1995), jedoch gibt es zwischen den Flussgebieten Unterschiede. Diese bestehen u.a. in den verarbeiteten hydrometeorologischen Eingangsgrößen, die aus den unterschiedlichen Verdunstungsansätzen herrühren. Ferner werden für den Rhein und die Elbe Tageswerte ausgegeben, während für die obere Donau nur Monatswerte vorliegen. Dies führt zu gewissen Einschränkungen bei den auswertbaren Kennwerten.

Tabelle 2: Charakteristika der verwendeten hydrologischen Modelle und hydrometeorologischen Reihen für das Rhein-, Elbe- und obere Donaueinzugsgebiet.

	Rhein	Elbe	Obere Donau
Modellsystem	HBV-SMHI	HBV-D	COSERO
Auflösung, räumlich; vgl. Abbildung 5	134 TEZG	190 TEZG	12 TEZG
Auflösung, zeitlich	Tage	Tage	Monate
Verdunstung	Penman Wendling	mod. Blaney-Criddle (T ≥ 5°C), Ivanov (T < 5°C)	Turc, korr. mit Penman-Monteith
Wasserwirtschaft	keine	keine	13 größte Speicher
Met. Input	P, T, RG	P, T	P, T, SD
Meteorologisches Beobachtungsprodukt	CHR_OBS	HYRAS	Stationsdaten & HISTALP
Literatur	Bergström, (1995); Eberle et al. (2005)	Bergström, (1995); Lautenbach (2005); Lingemann et al. (2014)	Nachtnebel et al. (1993); Kling et al. (2007)

Die ausgewerteten Kennwerte decken das gesamte Abflussspektrum ab. Ausgewertet werden Änderungen:

1) des mittleren jährlichen natürlichen **Wasserdargebot**es anhand des mittleren Abflusses (MQ) im hydrologischen Jahr (Monate Nov.-Okt.)
2) der mittleren **Saisonalität** des Abflusses anhand des mittleren Abflusses (MQ) im hydrologischen Winter- (Monate Nov.-Apr.) und Sommerhalbjahr (Mai-Okt.)
3) des **Niedrigwasserabflusses** anhand der niedrigsten über 7-Tage gemittelten Tagesabflusswerte (NM7Q, Rhein, Elbe) bzw. anhand des niedrigsten Monatsabflusses (NMoMQ, Donau) in einem Wasserhaushaltsjahr (Apr.-Mrz.)

4) des **Hochwasserabflusses** (hoher Abfluss) anhand der höchsten über 5 Tage gemittelten Tagesabflusswerte (HM5Q, Rhein, Elbe) bzw. anhand des höchsten Monatsabflusses (HMoMQ, Donau) in einem hydrologischen Jahr (Monate Nov.-Okt.)
5) **niedrigwasserbedingter Schifffahrtseinschränkungen** anhand der mittleren Unterschreitungsdauer eines niedrigen Schwellenwertes. Dieser Schwellenwert entspricht dem 95. Perzentil der Abflussdauerkurve in der Referenzperiode, d.h. dem Abfluss, der im Mittel der Periode 1961-1990 an rund 18 Tagen unterschritten wurde ($FDCQ_95_{1961\text{-}1990}$).
6) **hochwasserbedingter Schifffahrtseinschränkungen** anhand der mittleren Überschreitungsdauer eines hohen Schwellenwertes. Dieser Schwellenwert entspricht dem 1. Perzentil der Abflussdauerkurve in der Referenzperiode, d.h. dem Abfluss, der im Mittel der Periode 1961-1990 an rund 4 Tagen pro Jahr überschritten wurde ($FDCQ_01_{1961\text{-}1990}$).

Alle Kennwerte berücksichtigen jeweils mehrere Tageswerte des Abflusses und sind somit robust gegenüber einzelnen ausreißenden Ereignissen. Sie geben Hinweise darauf, ob und ggf. wo sich bestimmte Themen (Wasserdargebot, durchschnittliche Hochwasser- und Niedrigwasserhöhen) im Mittel verändern und diesen daher erhöhte Aufmerksam gewidmet werden sollte. In Anbetracht der relativ kurzen Zeitreihen und der im Extrembereich besonders großen Unsicherheiten (vgl. Maurer et al., 2011) wurde bewusst auf die Auswertung von seltenen und extremen Ereignissen - z.B. Hochwasser mit Jährlichkeit HQ50 und größer - verzichtet. Dieser Aspekt bedarf i.d.R. weiterer Analyseschritte und vertiefter Untersuchungen ("Handlungsbedarf" i.S. dieses Berichts; vgl. Abschnitt 6.3).

Die Auswertungen werden für die in Tabelle 3 bis Tabelle 5 bzw. in Abbildung 1 aufgeführten Pegel dargestellt. Sie erfolgen in Anlehnung an Leitlinien der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) für 30-jährige Zeiträume. Diese definiert "Klima" als statistische Beschreibung des „mittleren Wetters“ an einem Ort in Form von Mittelwerten und Variabilitäten relevanter Größen (z.B. Temperatur, Niederschlag), klassischerweise über eine Periode von 30 Jahren (WMO, 2011). "Klimawandel" ist gegeben, wenn sich dieses „mittlere Wetter“ nachhaltig, d.h. ebenfalls über mehrere Jahrzehnte, ändert. Analog ergibt sich aus dem „mittleren Wetter“ ein „mittleres Abflussgeschehen“. Im vorliegenden Bericht werden dementsprechend durchschnittliche langfristige Änderungen der genannten Kennwerte des Abflussgeschehens infolge des Klimawandels ermittelt. Diesen Änderungen ist jedoch eine hohe Variabilität von Jahrzehnt zu Jahrzehnt, von Jahr zu Jahr und innerhalb der Jahre überlagert. Deshalb können mehrjährige Phasen von den langfristigen Änderungen abweichen. Ebenso sind extreme Hoch- und Niedrigwasserereignisse unabhängig von den mittleren Entwicklungen jederzeit möglich.

Tabelle 3: Ausgewählte Pegel im Rheineinzugsgebiet.

Abk.	Pegelname	Fluss	AEo
BASE	Basel	Rhein	35897
MAXA	Maxau	Rhein	50196
ROCK	Rockenau	Neckar	12710
WORM	Worms	Rhein	68827
WUER	Würzburg	Main	13996
KAUB	Kaub	Rhein	103488
TRIE	Trier	Mosel	23857
KOEL	Köln	Rhein	144232
REES	Rees	Rhein	159300

Tabelle 4: Ausgewählte Pegel im Elbeeinzugsgebiet.

Abk.	Pegelname	Fluss	AEo
BRAN	Brandys	Elbe	13109
PRAH	Prag	Moldau	26731
LOUN	Louny	Eger	4962
DRES	Dresden	Elbe	53096
AKEN	Aken	Elbe	70093
CAGR	Calbe	Saale	23719
BARB	Barby	Elbe	94060
RATH	Rathenow	Havel	19288
NEUD	Neu Darchau	Elbe	131950

Tabelle 5: Ausgewählte Pegel im Donaueinzugsgebiet.

Abk.	Pegelname	Fluss	AEo
DONA	Donauwörth	Donau	15092
PFEL	Pfelling	Donau	37687
HOFK	Hofkirchen	Donau	47496
PAIN	Passau	Inn	26063
ACHL	Achleiten	Donau	76660

Als Referenzperiode wird - in Anlehnung an die derzeit gültige Standardnormalperiode der WMO - der Zeitraum 1961-1990 definiert. Alle Änderungen werden gegenüber dieser Periode angegeben, wobei die simulierte Gegenwart der jeweiligen Modellkette zugrunde gelegt wird. Im Fokus stehen die Zeitscheiben 2021-2050 (auch: "Nahe Zukunft", "Mitte des 21. Jahrhunderts") und 2071-2100 (auch: "Ferne Zukunft", "Ende des 21. Jahrhunderts"). Die erste Zeitscheibe ("Nahe Zukunft") wurde vor dem Hintergrund gewählt, dass in Anbetracht der z.T. erheblichen zeitlichen Vorläufe in der Maßnahmenplanung zeitnaher Handlungsbedarf bestünde, falls die für diese Zeit simulierten Änderungen als relevant eingestuft würden. Die zweite Zeitscheibe ("Ferne Zukunft") gibt Hinweise auf mögliche, extreme Entwicklungen, die sich unter der Annahme weiter steigender Treibhausgasemissionen ergeben könnten.

Aufgrund der zuvor genannten Unsicherheiten der Klimasimulationen, streuen die Auswertungen des Multimodell-Ensembles für einige Kennwerte und Pegel in weiten Grenzen. Üblicherweise ist die Streuung umso größer je kleiner das Gebiet, je extremer der Kennwert und je ferner der simulierte Zukunftszeitraum ist. Innerhalb dieser Ergebnisspannen zeigt das Ensemble von Projektionen jedoch Strukturen (vgl. Abbildung 6). So fallen nicht selten viele Projektionen in einen relativ engen Ergebniskorridor während die extremen Ränder nur durch einige wenige Projektionen besetzt sind. Die Verteilung der Ergebnisse kann in Form eines Mittelwertes ("Multi-Modell-Mittelwert") oder als Box-Whisker-Statistiken (Minimum, Maximum, Quartile oder 15. und 85. Quantil, Median) beschrieben werden. Die Mittelwertbildung hat den entscheidenden Nachteil, dass sie Informationen bzgl. der Ergebnisbandbreite und

damit der Unsicherheit vernachlässigt. Die Ermittlung von Gesamtspannen oder Quantilen kann zu einer Überbetonung von Randwerten führen, da eine Einengung der Bandbreite symmetrisch erfolgt und die innere Struktur des Ensembles nicht erfasst wird.

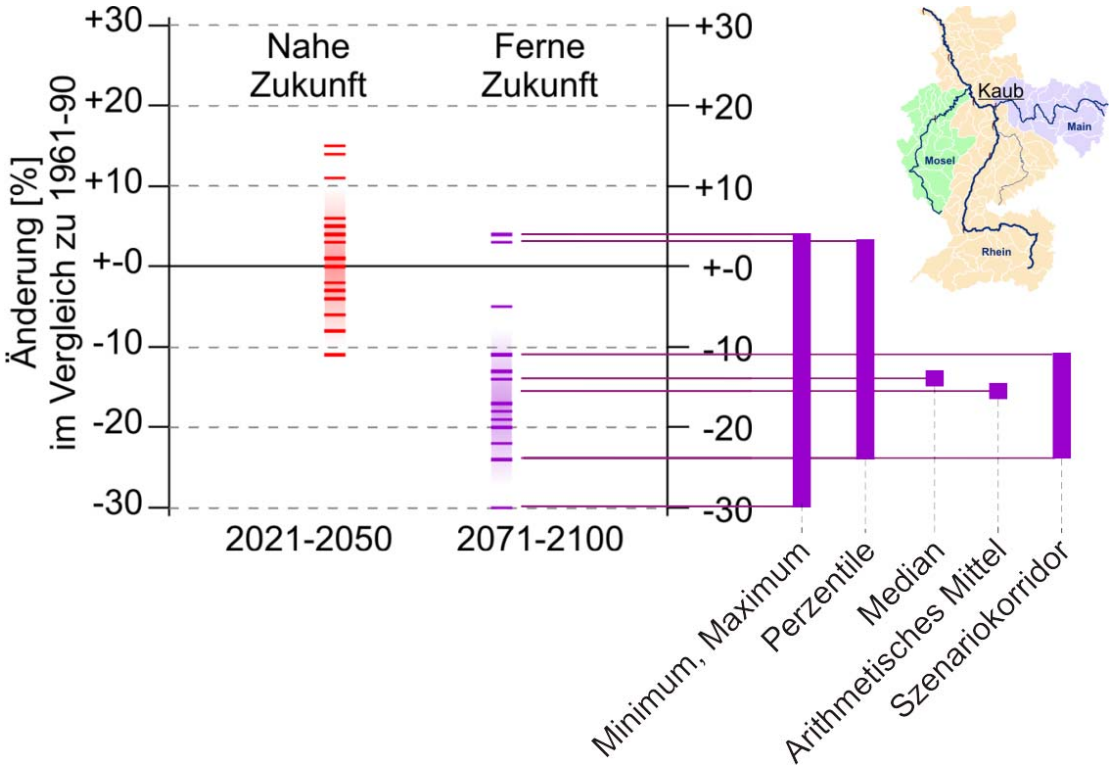

Abbildung 6: Schema zur Ableitung der "KLIWAS-Szenarienkorridore" und Vergleich mit anderen Verfahren zur Beschreibung eines Ensembles am Beispiel der Änderungen des Niedrigwasserabflusses am Pegel Kaub im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai-Okt., Nilson et al., 2011).

Aus diesem Grund wird eine Beschreibung des Ensemble-Ergebnisses auf Grundlage einer Clusteranalyse vorgeschlagen. Einen Entwurf und eine Kritik dieses Verfahrens haben Nilson & Krahe (2012) vorgelegt und die Bezeichnung "Szenarienkorridore" eingeführt. Für die hier dargestellten Szenarienkorridore wurde eine agglomerative hierarchische Clusteranalyse (z.B. Murtagh et al., 1985) verwendet, die sich an dem Abstand zwischen allen Elementpaaren (Projektionsergebnissen) für einen ausgewählten Kennwerte und Pegel orientiert (Single Linkage).

Konkret werden zwei Kriterien angewendet:

- Kriterium 1: Eine Projektion gehört nicht zum Cluster, wenn die Distanz zum Nachbarn mehr als das Doppelte der Distanz beträgt, die sich ergäbe, wenn alle Projektionen gleichmäßig zwischen Minimum und Maximum verteilt wären.
- Kriterium 2: Wenn diesem Cluster weniger als 75% aller Projektionen angehören, wird sukzessive das nächst kleinere Teilcluster hinzugefügt bis mehr als 75% aller

Projektionen berücksichtigt sind. In den Ergebnistabellen (vgl. Abschnitt 6.2) sind die anhand von Kriterium 2 abgeleiteten Szenarienkorridore mit (*) markiert.

Die so ermittelten Ergebnisbandbreiten werden auf 5% gerundet. In den Ergebnistabellen (vgl. Abschnitt 6.2) werden Zu- und Abnahmen durch die Farben Blau bzw. Orange hervorgehoben, wenn mindestens ¾ der Bandbreite des Szenarienkorridors auf einer Seite der Nulllinie liegt; anderenfalls wird die Farbe Grau gewählt (z.B. Orange bei -30% bis +10%, Grau bei -25% bis +10%).

Die Wahl der genannten Kriterien und Klassifizierungen erfolgte einheitlich für die drei betrachteten Einzugsgebiete, alle Pegel und alle Kennwerte (insgesamt 230 Auswertungen). Sie führte zu einer im Flusslängsschnitt und im Vergleich unterschiedlicher Kennwerte konsistenten Erfassung der Szenarienkorridore. In Einzelfällen ergaben sich jedoch aufgrund relativ kleiner Unterschiede in der Struktur des Ensembles Sprünge der ausgewiesenen Korridore. In diesen Fällen wurden die in den Ergebnistabellen (vgl. Abschnitt 6.2) angegebenen Wertebereiche manuell angepasst und mit (a) markiert.

4.3 Repräsentative Abflusssimulationen

Die projizierten Abflüsse stellen Eingangsdaten für verschiedene weitere Modellierungsschritte dar (z.B. die hydrodynamische Modellierung, vgl. Abschnitt 4.4). Da diese Schritte teilweise sehr rechenintensiv oder nicht auf Ensemblesimulationen ausgelegt sind, können in der (gegenwärtigen) Praxis ggf. nur wenige ausgewählte Mitglieder des Projektionsensembles verarbeitet werden.

Bei der Auswahl bieten die Szenarienkorridore eine Entscheidungshilfe. Greift man jeweils die am oberen und unteren Rand der Szenarienkorridore gelegenen Mitglieder heraus (sog. repräsentative Simulationen; Nilson & Krahe, 2012), reduziert sich die Anzahl der zu verarbeitenden Simulationen auf bis zu zwei (sofern nur ein Zukunftszeitraum, ein Pegel und nur ein Kennwert als relevant betrachtet wird). Gleichzeitig bleibt ein Großteil der Bandbreite des Ensembles und damit die Unsicherheitsinformation erhalten.

Die simulierten täglichen Abflüsse der angegebenen Modellketten stehen als Zeitreihen zur Verfügung. Ferner können die zugehörigen hydrometeorologischen Größen (Lufttemperatur, Niederschlag, Sonnenscheindauer/Globalstrahlung etc.) der entsprechenden Modellketten herangezogen werden, sofern sie für den folgenden Modellierungsschritt (z.B. Modellierung der Wassertemperatur, chemischer und gewässerökologischer Prozesse) erforderlich sind.

Im nachfolgenden Abschnitt 4.4 ist die Umsetzung des Vorgehens anhand des Kriteriums "Sommerniedrigwasser" exemplarisch für die hydrodynamische Modellierung am Rhein beschrieben (vgl. Tabelle 6).

Tabelle 6: Repräsentative Modellketten, die für die hydrodynamischen Simulationsrechnungen und die darauf aufbauende Kostenstrukturmodellierung sowie

die Verwundbarkeitsanalyse verwendet wurden. Auswahlkriterium ist der Niedrigwasserabfluss NM7Q während des hydrologischen Sommerhalbjahres an den Pegeln Kaub und Duisburg-Ruhrort

Modellkettenbezeichnung[2]	**verfügbar für Zeitraum**	**Repräsentativ für die Sommerniedrigwassersituationen…**
A1B_BCM_RCA	01.01.1964-22.12.2099	in der nahen Zukunft, geringer Abflussrückgang
A1B_HCQ0_HRQ0	01.01.1954-10.12.2099	in der nahen Zukunft, starker Abflussrückgang
B1_EH5r1_CLM24	01.01.1963-31.12.2100	in der fernen Zukunft, geringer Abflussrückgang
A1B_EH5r1_CLM24	01.01.1963-31.12.2100	in der fernen Zukunft, starker Abflussrückgang
A1B_EH5r3_REMO	01.01.1954-31.12.2100	Referenzkette KLIWAS

4.4 Hydrodynamische Modellierung (Rhein)

Mit dem Schritt der hydrodynamischen Modellierung werden die projizierten Abflüsse in Wassertiefen und Strömungsgeschwindigkeiten überführt. Die Arbeiten wurden exemplarisch für den Rhein mit dem 1D-hydrodynamischen Modell SOBEK-RE durchgeführt. Das Modell umfasst die frei fließende Strecke unterhalb der Staustufe Iffezheim (Rhein-km 334) bis zum Pannerdensche Kop in den Niederlanden (Rhein-km 858). Es berücksichtigt die größten Nebenflüsse des Rheins als laterale Randbedingung (Neckar, Main, Nahe, Lahn, Mosel, Sieg, Ruhr, Lippe). Die instationären Berechnungen mit SOBEK-Rhein-KLIWAS wurden unter Annahme einer stabilen Sohle des Jahres 2004 und unter Annahme hydrodynamisch wirksamer Maßnahmen (z.B. Hochwasserschutz) des Jahres 2009 durchgeführt. Das Modelllayout von SOBEK-RE wurde gegenüber der bei Meißner (2008) und Meijer (2009) dokumentierten Variante leicht vereinfacht (Reduzierung des Zeitschrittes auf 4 h, weniger Randbedingungen), um Simulationen über bis zu 150 Jahre durchführen zu können. Diese Modellvariante wird im Folgenden als SOBEK-KLIWAS bezeichnet. Weitere Einzelheiten finden sich bei Nilson et al. (2015).

Als Randbedingungen für die durchgeführten SOBEK-KLIWAS-Simulationen wurden vier repräsentative Abflusssimulationen (vgl. Abschnitt 4.3 und Tabelle 6) heran-

[2] (zu ergänzen durch "…_LS_EPW_HBV134_SOBEK-KLIWAS"

gezogen. Diese wurde nach dem Kriterium Sommerniedrigwasser (NM7Q) an zwei schifffahrtsrelevanten Pegeln (Kaub und Duisburg-Ruhrort) ausgewählt[3]. Eine weitere Simulation ("A1B-EH5r3-RE-ENS") wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit für das gesamte Forschungsprogramm KLIWAS vorgeschrieben.

SOBEK-KLIWAS liefert für Querprofile im Abstand von ca. 500 m tägliche Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten, die z.B. für die Kostenstrukturmodellierung der Rheinflotte (Abschnitt 4.5) herangezogen wurden.

4.5 Ökonomische Auswertungen (Rhein)

4.5.1 Kostenstrukturmodell der Rheinflotte

Die Kostenstrukturmodellierung (KST) ermöglicht die Simulation von langfristigen Auswirkungen von Änderungen der Fahrwasserverhältnisse (Wassertiefen und Strömungsgeschwindigkeiten) auf die schiffsseitig entstehenden Kosten des Binnenschiffstransportes (Holtmann et al., 2011). Dabei beeinflusst zunächst die Wassertiefe des flachsten Wasserstraßensegmentes auf einer Transportroute den möglichen Tiefgang und damit die maximale Zuladung und Auslastung des Schiffes (sog. abladerelevante Wassertiefe). Gleichzeitig wirken sich geringe Wassertiefen und hohe Strömungsgeschwindigkeiten ungünstig auf den Leistungsbedarf und die mögliche Geschwindigkeit und damit auf die Fahrzeit aus (sog. vortriebsrelevante Wassertiefe).

Diese Zusammenhänge gelten für jede Schiffsklasse, jede (tagesaktuelle) Wassertiefe und jeden Tiefgang jeweils individuell. Sie wurden im Rahmen des Projektes anhand eines hierfür entwickelten Modells quantifiziert und analysiert. Dabei wurden 7 verschiedene Schiffstypen mit ihren unterschiedlichen Tiefgängen und 6 Transportrelationen berücksichtigt (Holtmann et al., 2011; Renner et al., 2014). Ausgewertet wurden die Relationen zwischen Rotterdam und den Häfen Duisburg-Ruhrort, Köln, Koblenz, Mainz, Mannheim bzw. Basel. Die verschiedenen Schiffstypen wurden je Relation zu verschiedenen Flottenvarianten zusammengestellt, die üblicherweise auf den entsprechenden Routen unterwegs sind (z.B. 4x4 Schubverbände nur am Niederrhein). Abbildung 7 (links) zeigt exemplarisch die resultierenden Kosten für die Berg- bzw. Talfahrt der im Jahr 2010 vorhandenen Flotte ("Status Quo") auf den verschiedenen Relationen.

Weiterhin wurden - in Abwandlung der "Status Quo"-Flotte - verschiedene Flottenszenarien entworfen, um die Wirkung bestimmter Anpassungsmaßnahmen zu verdeutlichen. So geht das Szenario "Trend zu großen Schiffen" von einer Fortsetzung des derzeit zu verzeichnenden Trends zu größeren Schiffskörpern aus, das Szenario "Trend zu kleinen Schiffen" im Zeitverlauf zunächst eine Abschwächung des bisheri-

[3] Das zugrundeliegende Ensemble von Abflussprojektionen entspricht dem bei Nilson et al. (2010c) beschriebenen Bearbeitungsstand und ist nicht 100%ig identisch mit dem in diesem Bericht vorgestellten Ensemble.

gen Trends und im Weiteren (zweite Hälfte des Jahrhunderts) dann eine Trendumkehr. Das Szenario "Innovative Flotte" berücksichtigt eine Reihe von schiffstechnischen und betrieblichen Maßnahmen, die darauf abzielen die gegenwärtigen Schiffe leichter und flexibler einsetzbar zu machen. Schließlich wurde im Modell ein wasserbauliches Anpassungsszenario ("Mittelrhein +20 cm") angenommen, das von einer teilweisen Entschärfung der derzeit wichtigsten Engstelle ausgeht (vgl. Abschnitt 6.2, Seite 62).

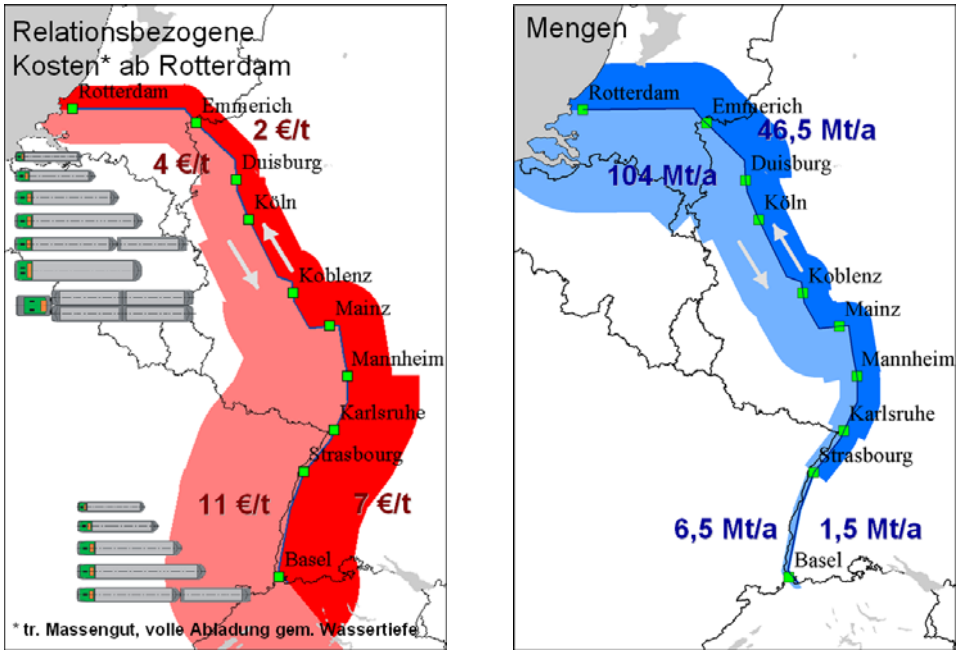

Abbildung 7: Links: Relationsbezogene Kosten (ab Rotterdam) exemplarisch für die Modell-Kette C20_EH5r1_CLM24_LS_ HBV134_SOBEK-KLIWAS_KST. Rechts: Güterverkehrsdichte ohne Verkehr innerhalb der Niederlande (WSV, 2002).

Ausgangspunkt für die Kostenstrukturmodellierung bilden die in Abschnitt 4.5 vorgestellten Wassertiefen- und Strömungsprojektionen auf Basis der repräsentativen Abflusssimulationen (Abschnitt 4.4). Diese Daten wurden aus Gründen der Rechenkapazität für fünfzehn nach hydrodynamischen Kriterien definierte Segmente des Rheins räumlich aggregiert. Für jedes Segment liegen tägliche Daten der minimalen Wassertiefe (relevant für die Abladung), der mittleren Wassertiefe und der Strömungsgeschwindigkeit (beide relevant für den Vortrieb) vor. Für das staugeregelte Segment oberstrom Iffezheim (nicht durch SOBEK-KLIWAS abgedeckt, vgl. Abschnitt 4.5) wurde eine konstante Wassertiefe von 4,00 m angenommen. Für den Deltarhein unterstrom des Pannerdenschen Kops (ebenfalls nicht durch SOBEK-KLIWAS abgedeckt) wurden die Werte des oberstromigen Segments beibehalten. Zur Ermittlung der Kosten auf den unterschiedlichen Transportrelationen "durchfährt" in der Modellierung jeder Schiffstyp alle auf dieser Relation liegenden Segmente. Alle Relationen werden jeden Tag bedient. Die Abladung der Schiffe ist dabei nur durch die Wasser-

tiefe limitiert. Die landseitige Transportnachfrage wird in diesem Schritt als unbegrenzt angesehen.

Bei Ermittlung der mittleren jährlichen Gesamtkosteneffekte im System "Rhein" wurden neben den Fahrwasserszenarien und den Anpassungsszenarien alle weiteren Rahmenbedingungen bewusst konstant gehalten, um die Wirkung des Klimawandels auf das Abflussgeschehen und die darauf zielenden Anpassungsmaßnahmen separat interpretieren zu können. Hierzu gehören neben Kostenbestandteilen wie Brennstoffkosten, Personalkosten und Zinsen auch Aspekte wie der Transportbedarf. Als Mengengerüst wurde für die hier vorgestellten Auswertungen das Güteraufkommen des Jahres 2000 angenommen (vgl. Abbildung 7, rechts). Dieses Jahr kann im Vergleich mit den Jahren 2007 bis 2012 (DESTATIS, 2007-2012) als "mittleres" Transportjahr betrachtet werden.

4.5.2 Verwundbarkeitsanalyse der Rhein-anliegenden Verlader

Neben der Betroffenheit der Binnenschifffahrt auf dem Rhein wurde auch untersucht, inwieweit die verladenden Unternehmen entlang des Rheins betroffen sind und inwieweit sich eine mögliche Betroffenheit auf das Unternehmerverhalten auswirkt. Hierbei wurde bewusst nicht versucht, „top-down“ von der gesamtökonomischen Entwicklung auf das Verhalten des einzelnen Unternehmens zu schließen, sondern „bottom-up“ beim einzelnen Unternehmen anzusetzen und dessen spezifische Rahmenbedingungen und Verhaltensweisen zu berücksichtigen.

Die wesentlichen Methoden der Datenerhebung sowie das resultierende Datenkollektiv sind bei Scholten (2010) beschrieben. Auf dieser Grundlage wurde ein Index abgeleitet, mit dessen Hilfe sich die Verwundbarkeit unterschiedlicher Unternehmensgruppen gegenüber Niedrigwassersituationen quantitativ darstellen und vergleichen lässt. Eine ausführliche Beschreibung findet sich bei Scholten & Rothstein (2012).

Als Maßzahl der Betroffenheit der verladenden Wirtschaft wurde die prozentuale Abweichung von der "optimalen" (d. h. unter gegenwärtigen Bedingungen realisierten) Lagerhaltung verwendet. Der Grad, in dem die optimale Lagerhaltung unter gegebenen Abflussbedingungen und Wassertiefeneinschränkungen erreicht werden kann, hängt wesentlich von der jeweils gewählten Schiffsgrößenklasse (unter 1.350 t, zwischen 1.400 t und 3.000 t, 3.700 t oder größer) sowie dem Anteil des Binnenschiffstransport am Transportmix eines Unternehmens (unter 20 %, zwischen 20 und 40 %, über 50 %) ab. Diese Informationen wurden durch eine Unternehmensbefragung erhoben. Ebenfalls auf Grundlage der Befragung wurden verschiedene Anpassungsszenarien generiert.

Weitere wichtige Grundlage der Verwundbarkeitsanalyse waren Fahrrinnentiefen (vgl. Abschnitt 4.5) auf Basis der repräsentativen Abflusssimulationen, die die Bandbreite möglicher Entwicklungen des Niedrigwasserabflusses abdecken (Abschnitt 4.3). Weitere Zukunftsentwicklungen (z. B. gesamtwirtschaftliche Rahmenbedingun-

gen) werden bewusst auf heutigem Niveau konstant gehalten, da der Fokus auf der Sensitivität gegenüber möglichen zukünftig auftretenden Abflussverhältnissen liegt.

5 Vernetzung des Projektes, Kooperationspartner

Die vorgestellten Arbeiten wurden als Pilotprojekt „KLIWAS“ bereits zwei Jahre vor dem des BMVBS-Forschungsprogramms KLIWAS (2009-2013) begonnen. Ziel der Vorlaufphase war es, wichtige konzeptionelle und methodische Grundlagen für das Forschungsprogramm am Beispiel des Rheins zu erarbeiten. Insofern wurde im Projektrahmen nicht nur der Aspekt „Wassermenge“ bearbeitet, sondern das System Wasserstraße als Ganzes, d.h. inklusive meteorologischer und wirtschaftlicher Aspekte. Entsprechend interdisziplinär setzte sich die Projektarbeitsgruppe zusammen und entsprechend breit ist die Palette der durchgeführten Arbeitspakete und erstellten Produkte. Besonders zu nennen sind hier die Beiträge des Max-Planck-Institutes für Meteorologie (MPI-M, Dr. Daniela Jacob, Dr. Katharina Bülow, Claas Teichmann), dessen Mitarbeiter z.B. neue regionale Klimasimulationen beigesteuert haben, die Arbeiten des Zentrums für Schiffstechnik und Transportsysteme (DST, Berthold Holtmann, Volker Renner), mit dessen Hilfe die Effekte des Klimawandels auf die Kosten des Binnenschiffstransports berechnet werden konnten sowie die an der Hochschule Rottenburg und Universität Würzburg (Dr. Anja Scholten, Prof. Benno Rothstein) durchgeführten Befragungen der Rhein-anliegenden Industrie. Eine Übersicht der Kooperationen und Auftragsvergaben befindet sich in Tabelle 7.

Seit Beginn des Forschungsprogramms KLIWAS im Jahr 2009 wurde das Pilotprojekt unter dem Kürzel „KLIWAS 4.01“ geführt und lieferte zahlreiche Datengrundlagen und Impulse für andere Arbeitsgruppen innerhalb des Forschungsverbundes. Dabei wurde der für den Rhein erprobte Ansatz für die Einzugsgebiete der Elbe und der oberen Donau übernommen. Zu nennen sind hier insbesondere Abflussprojektionen, die in den Berichten von Seiffert et al. (2014; 2.04, Wasserbau, Ästuar), Schröder & Wurms (2014; 4.03, Wasserbau, Binnen), Hillebrandt et al. (2014; 5.01, Sedimenthaushalt, Binnen), Hardenbicker et al. (2014; 5.02, Gewässerqualität, Binnen) und Mosner et al. (2014; 5.06, Auenökologie) Verwendung finden, aber auch regionale Klimaprojektionen und Wetterlagen-Indizes, die in die Arbeiten von Frick et al. (2014, 1.01; hydromet. Referenzdaten), Plagemann et al. (2014; 1.02, Klimaszenarien Binnen) und Bülow et al. (2014; 2.01, Klimaszenarien Nordsee) eingegangen sind.

Die im Projektrahmen erarbeiteten Daten (v.a. die Wasserhaushaltsgrößen) und Informationen wurden mit Blick auf die Bundeswasserstraßen erstellt. Sie sind jedoch nicht nur für verkehrswasserwirtschaftliche Fragestellungen innerhalb Deutschlands relevant, sondern betreffen nahezu alle Bereiche der überregionalen Wasserwirtschaft. Sie wurden daher auch außerhalb des KLIWAS-Forschungsverbundes bzw. der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes im nationalen und internationa-

len Kontext nachgefragt; z.B. durch verschiedene BMBF-KLIMZUG-Projekte (KLIMZUG-Nord, REGKLAM, DYNAKLIM), die Bundesländer Hessen (Kooperationsvereinbarung), Bayern (Verwaltungsvereinbarung), Nordrhein-Westfalen (LANUV-NRW), Sachsen (Projekt KLIWES), die Internationalen Kommissionen zum Schutz des Rheins (IKSR) und der Elbe (IKSE) oder die Zentralkommission für Rheinschifffahrt (ZKR).

Durch diese projekt- und länderübergreifende Vernetzung konnten die erstellten Daten weiter verbreitet, validiert, verglichen und so letztlich in ihrer Aussagekraft gestärkt werden. Besonders intensiv war dieser Austausch in thematisch verwandten Projekten, die mit direkter Beteiligung der KLIWAS-4.01-Mitarbeiter durchgeführt wurden. Somit fließen in diesen Bericht nicht nur Erkenntnisse aus KLIWAS selbst, sondern auch aus den EU-Projekten AdaptAlp[4] und ECCONET[5] sowie insbesondere aus dem Projekt Rheinblick2050[6] der Internationalen Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR) ein.

Tabelle 7: Pilotprojekt/Projekt 4.01 - Kooperationen und Aufträge

Thema	Kooperationspartner/ Auftragnehmer	Inhalt	Ansprechpartner (extern)
Klima	Deutscher Wetterdienst (DWD), Offenbach	HYRAS: Erstellung hydrometeorologischer Referenzdaten	Dr. Annegret Gratzki
Klima	MeteoSolutions GmbH, Darmstadt	Bewertung von Wetterlagen globaler Klimamodelle (oWLK_GCM und pWLK_GCM_plus)	Jürgen Lang
Klima	Max-Planck Institut für Meteorologie (MPI-M), Hamburg	TP4.01.1 Klima	Dr. Daniela Jacob
Klima	Max Planck Institut für Meteorologie (MPI-M), Hamburg	REMO-BFG	Dr. Daniela Jacob
Klima	Meteorologisches Institut der Universität Bonn	Kooperation: für die wissenschaftliche Zusammenarbeit in Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Meteorologie-Hydrologie	Prof. Dr. Andreas Hense
Klima	Meteorologisches Institut der Universität Bonn	MOS_REMO: Statistische Nachbehandlung von Regionalen Klimasimulationen	Prof. Dr. Andreas Hense
Klima	Ingenieurbüro IAWG, Ottobrunn	MOBS: Vergleichende Untersuchung meteorologischer Observationsprodukte	Dr. Winfried Willems
Klima	Ingenieurbüro IAWG, Ottobrunn	Konvertierung von WETTREG 2010 Daten in das WasimETH-Format (kurz: WR2010_Konvert)	Dr. Winfried Willems

[4] www.adaptalp.org
[5] www.ecconet.eu
[6] www.chr-khr.org/projects/rheinblick2050

Thema	Kooperationspartner/ Auftragnehmer	Inhalt	Ansprechpartner (extern)
Klima	Ingenieurbüro IAWG, Ottobrunn	Reformatierung von RCM-Daten (kurz: RCM-Format)	Dr. Winfried Willems
Klima	Forschungszentrum Karlsruhe GmbH	CCLM4.8: Bereitstellung und Dokumentation des RCMs CCLM4.8	Dr. Gerd Schädler
Hydrologie	Büro für Angewandte Hydrologie, Berlin	ArcEGMO_Havel: Wasserhaushaltsmodellierung mit ArcEGMO im Einzugsgebiet der Havel	Dr. Bernd Pfützner
Hydrologie	Ingenieurbüros HYDROTEC, Aachen, und AQUANTEC, Karlsruhe	LARSIM_ME: Aufbau eines Wasserhaushaltsmodells LARSIM für Mitteleuropa	Ulrich Wolf-Schumann
Hydrologie	Ingenieurbüro HYDRON, Karlsruhe	WH-Simulationen_COSMO-CLM42_WETTREG_bis_Worms	Dr. Kai Gerlinger
Hydrologie	Pöyry Energie GmbH, Wien	COSERO: Wasserbilanzmodellierung und Auswirkungen der Klimaänderungen für den deutschen Abschnitt der Donau	Dr. Harald Kling
Hydrologie	Ingenieurbüro Ludwig, Karlsruhe	LARSIM18: Erstellung eines Wasserhaushaltsmodells für das internationale Rheineinzugsgebiet bis Lobith	Dr. Karl Gerd Richter
Hydrologie	Institut für Umweltsystemforschung der Universität Osnabrück	Beschaffung eines hydrologischen Modells für Teileinzugsgebiete der Elbe (HBV-D)	Dr. Jürgen Berlekamp
Binnenschifffahrt	Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme, Duisburg	TP4.01.3 Binnenschifffahrt (Rhein)	Berthold Holtmann
Binnenschifffahrt	Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme, Duisburg	Binnenschifffahrt (Pilotstudie Elbe)	Berthold Holtmann
Wirtschaft	Universitäten Rottenburg und Würzburg	TP4.01.4 Verladende Wirtschaft (Rhein)	Dr. Anja Scholten, Prof. Dr. Benno Rothstein
Wirtschaft	Universitäten Rottenburg und Würzburg	TP4.01.4 Verladende Wirtschaft (Elbe)	Prof. Dr. Benno Rothstein
Wirtschaft	Universitäten Rottenburg und Würzburg	Gütergruppen- und Raum-zeitlich differenzierte Auswertung von Hafenumschlagszahlen in extremen Niedrigwassersituationen (Hafen_NW)	Dr. Anja Scholten, Prof. Dr. Benno Rothstein
Wirtschaft	Universität Rottenburg	Untersuchungen zu möglichen Konsequenzen klimabedingter Wassertemperaturänderungen am Rhein im Rahmen des Projektes KLIWAS 4.01. Fallbeispiel Elektrizitätsproduktion im Rhein-Neckarraum (KLIWAS_ELEKTRO)	Prof. Dr. Benno Rothstein

6 Ergebnisse

6.1 Erreichter methodisch-wissenschaftlicher Fortschritt

Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse beruhen auf einem Ensemble von ca. 20 unterschiedlichen Klimamodellketten, in denen fünf globale Klimamodelle (GCM), die in einigen Fällen in bis zu drei Realisierungen vorliegen (EH5, HC), mit acht verschiedenen regionalen Klimamodellen gekoppelt sind. Die Simulationen des Ensembles wurden anhand von Plausibilitätskriterien (saisonaler Temperatur- und Niederschlagsbias) sowie aus Gründen der Konsistenz mit anderen Projekten (Einschränkung auf SRES A1B) aus einem umfangreicheren Ensemble ausgewählt. Die Temperatur- und Niederschlagsfelder (für den Rhein auch die Globalstrahlung) der Klimamodellketten wurden Bias-korrigiert (lineare Skalierung) und als Eingangsdaten für die semidistributiven konzeptionellen hydrologischen Modelle HBV134 (Rhein), HBV-D (Elbe) bzw. COSERO (obere Donau) verwendet (vgl. Abschnitt 4).

Mit dem gewählten Vorgehen wurde ein bewertetes und besonders umfangreiches **Ensemble von Abflussprojektionen** vorgelegt, das den Kenntnisstand der europäischen Klimaforschung im Jahr 2012 weitgehend abbildet und ein Spektrum möglicher Änderungen des natürlichen Wasserhaushalts in Mitteleuropa wiedergibt. Auf dieser Grundlage werden Änderungssignale und bestehende Unsicherheiten deutlich und die Belastbarkeit von Aussagen bzgl. möglicher Klimafolgen besser bewertbar.

Mit dem **Konzept der Szenarienkorridore** werden wesentliche Merkmale des Ensembles von Abflussprojektionen erfasst und in einem überschaubaren Zahlenwerk für den Entscheider greifbar. Ferner stehen mit den **repräsentativen Projektionen** Arbeitsgrundlagen für in der Modellkette nachgeschaltete Modelle und Arbeiten zur Verfügung, die im Datenvolumen deutlich reduziert sind, aber dennoch die derzeit bekannte Bandbreite möglicher Änderungen erfassen.

Vier repräsentative Simulationen wurden mit Blick auf mögliche Entwicklungen der Sommerniedrigwasser an schifffahrtskritischen Rheinpegeln für weitere Modellierungsschritte ausgewählt. Unter der Annahme dieser unterschiedlichen zukünftigen Abflussverhältnisse wurden mit dem hydrodynamischen Modell SOBEK-KLIWAS für den Rhein Fahrwasserbedingungen bis in das Jahr 2100 simuliert. Diese bildete wiederum die Grundlage für eine **Kostenstrukturmodellierung der Rheinflotte** sowie für eine **Verwundbarkeitsanalyse der am Rhein ansässigen Wirtschaftsbranchen**.

Für diese Wirtschaftsbereiche wurden zahlreiche **Anpassungsoptionen** formuliert und soweit möglich deren **Wirkung** zur Begrenzung der Auswirkungen des Klimawandels quantifiziert.

6.2 Kernaussagen zu den Ergebnissen

Die Ergebnisse zu den möglichen klimabedingten Veränderungen des Abflussgeschehens können hier nur exemplarisch erläutert werden. Im Fokus stehen dabei neben den Änderungen für den mittleren (MQ), unteren (NM7Q) und oberen (HM5Q) Abflussbereich an Rhein, Elbe und Donau sowie die für Belange der Schifffahrt wichtigen Unter- und Überschreitungen von Schwellenwerten. Die hydrologischen Auswertungen werden für die in Abbildung 1 dargestellen Pegel gezeigt. Weitere detaillierte Informationen sind den flussgebietsbezogenen Berichten von Nilson et al. (2015, Rhein), Krahe et al. (2015, Elbe) und Klein et al. (2015, Donau) zu entnehmen.

Es ist darauf hinzuweisen, dass außerhalb der nachfolgend interpretierten Szenarienkorridore einige wenige Projektionen andere (extremere oder gegenläufige) Entwicklungen anzeigen. Diese Projektionen sind gemäß der in Abschnitt 4.1 dargestellten Kriterien ebenfalls als plausibel einzuordnen und aus dieser Perspektive ebenso möglich wie die Projektionen innerhalb der Korridore, die lediglich Verdichtungen innerhalb des Ensembles anzeigen. Sofern "worst case" Szenarien gefragt sind, wären die Minimal bzw. Maximalwerte des Ensembles ggf. den Szenarienkorridoren vorzuziehen. Auch steht es frei, je nach Aufgabenstellung und Randbedingungen (z.B. Sicherheitsbedürfnis, materielle Spielräume) noch darüber hinaus gehende Szenarien festzulegen. Ferner ist anzumerken, dass nicht alle Szenarienkorridore durch gleichermaßen dichte und eindeutige Cluster definiert sind. Entsprechende Hinweise werden am Ende von Abschnitt 4.2 und den nach folgenden Tabellen mit den Markierungen "*" und "a" gegeben.

6.2.1 Änderung des Abflussgeschehens im Rheineinzugsgebiet

Die Änderungen des Abflussgeschehens sind für die ausgewählten Pegel und Kennwerte in Abbildung 8 bis Abbildung 12 dargestellt und in Tabelle 8 in Form von Szenarienkorridoren zusammengefasst.

Der **mittlere jährliche Abfluss** (MQ, Abbildung 8) zeigt für die nahe Zukunft gegenüber der Referenzsituation Zunahmen. Die Szenarienkorridore erstrecken sich an den Pegeln des Hauptstroms meist von 0% bis +10%, für das Ende des Jahrhunderts sind die Änderungen überwiegend indifferent (ca. +/-15%). Einzelne Projektionen weisen für die nahe Zukunft höhere Zunahmen (bis +15%) und für die ferne Zukunft größere Abnahmen (bis -20%) auf. An den Nebengewässern ergeben sich sowohl für die nahe als auch für die ferne Zukunft überwiegend Zunahmen. Die Bandbreite ist hier hauptsächlich aufgrund der kleineren Einzugsgebietsflächen höher.

Ausgehend von den vorliegenden Projektionen ist rheinweit nicht mit einer Verknappung der Wasserressourcen insgesamt zu rechnen. Aufgrund von Veränderungen der Wasserhaushaltsgrößen (z.B. Schneeauf- und -abbau, Verdunstung) und des Abflussregimes ergeben sich jedoch Änderungen in der jahreszeitlichen Verteilung. So nehmen **die mittleren Winterabflüsse** (MQ, Nov.-Apr., Abbildung 9) an allen Pegeln und in beiden Zukunftszeiträumen zu. Die Änderungen liegen dabei am Hauptstrom im Bereich von +5% bis +20% (nahe Zukunft) bzw. +5% bis +30% (ferne Zukunft)

und reichen an den Nebengewässern bis +30% bzw. +40%. Höhere Niederschläge, die die ebenfalls steigenden Verdunstungsverluste während des Winters überkompensieren, bieten hier einen Erklärungsansatz.

Demgegenüber zeigen die projizierten **mittleren Sommerabflüsse** (MQ, Mai-Okt., Abbildung 10) in den nächsten Jahrzehnten an den meisten Pegeln im Mittel keine deutliche Änderung (meist +/-10%); lediglich für den Pegel Würzburg zeigt der Szenarienkorridor eine Richtung an (Zunahmen bis +15%), die durch ansteigende Niederschläge im Maingebiet erklärt werden kann. Für das Ende des 21. Jahrhunderts werden jedoch deutliche Abnahmen von -10% bis -30%, am Pegel Trier bis -35% projiziert. Je nach Abflussregime sind hier unterschiedliche Erklärungsansätze heranzuziehen. In den heutigen Schneeregimen oberstrom der Mainmündung wirken (a) eine reduzierte Speicherung von Niederschlägen in Form von Schnee, (b) eine höhere aktuelle Verdunstung sowie (c) eine Niederschlagsabnahme in den Sommermonaten zusammen; in den heutigen Regenregimen schlägt ausschließlich die Niederschlagsabnahme zu Buche. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Schneeregime heute im Sommer besonders abflussreich und die Regenregime zeitgleich relativ abflussarm sind. Die absoluten Änderungen sind dementsprechend sehr unterschiedlich. Für das Gebiet oberstrom des Pegels Basel ergibt sich eine Verringerung der Abflusshöhe von bis zu -165 mm (entsprechend rd. 30% im Sommer-MQ) und für das Gebiet oberstrom des Pegels Trier von bis zu -40 mm (entsprechend rd. 35% im Sommer-MQ).

Mit den Änderungen der Wasserhaushaltsgrößen gehen regimespezifische Änderungen der mittleren Niedrig- und Hochwasserabflüsse einher. So zeigen die **Niedrigwasserabflüsse** (NM7Q) bis zur Jahrhundertmitte überall dort eine zunehmende Tendenz, wo heute Einflüsse des Schneeregimes vorherrschen. Hier führen die höheren und bereits für den Monat Oktober zunehmenden winterlichen Direktabflüsse zu weniger intensiven Niedrigwassersituationen. Insgesamt betragen die Zunahmen 10% oder weniger. Außerhalb des Einflussbereichs des Schneeregimes (z.B. an den Pegeln der Mittelgebirgsflüsse Neckar und Mosel) vermitteln die Szenarienkorridore ein indifferentes Bild (+/-10%). Ausnahme ist hier erneut der Pegel Würzburg (Main) der überwiegend steigende Niedrigwasserabflüsse zeigt (0 bis +15%). Für das Ende des Jahrhunderts werden an den meisten Pegeln deutliche Abnahmen des Niedrigwasserabflusses simuliert. Die untere Grenze der Szenarienkorridore liegt an den Rheinpegeln meist bei -15%, während am Neckarpegel Rockenau und am Moselpegel Trier eine Reduktion des Niedrigwasserabflusses von bis zu -35% bzw. bis zu -50% möglich erscheinen.

Auch bezüglich der Entwicklungen im oberen Abflussbereich fallen Eigenarten der unterschiedlichen Abflussregimes auf. So zeigen praktisch alle Projektionen für **hohe Abflüsse** (HM5Q) im Einflussbereich der Mittelgebirge infolge zunehmender Winterniederschläge in beiden Zukunftszeiträume steigende Tendenzen bis +20%, während sich an den Pegel in Alpennähe (vgl. Basel und Maxau, in der fernen Zukunft auch Worms) keine eindeutigen Änderungen feststellen lassen, d.h. Abnahmen und Zunahmen in etwa gleich häufig projiziert werden.

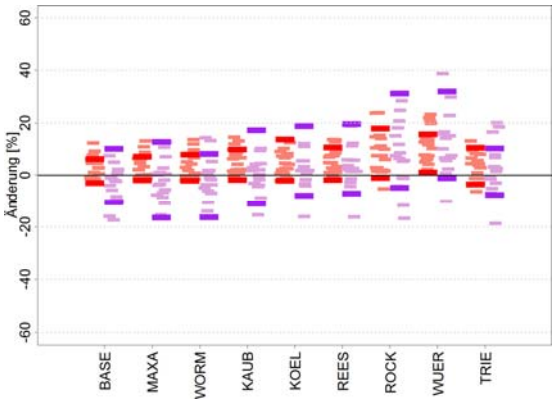

Abbildung 8: Änderungssignale für den mittleren Abfluss (MQ) während des hydrologischen Jahres (Nov.-Okt.) an ausgewählten Pegeln im Rheineinzugsgebiet.
Verhältnis vieljähriger Mittelwerte in der nahen und fernen Zukunft (2021-2050, rot bzw. 2071-2100, violett) gegenüber der Referenzperiode (1961-1990). Ausgewertet wurden 21 Abflussprojektionen für die nahe und 17 für die ferne Zukunft. Jede Linie zeigt das Ergebnis einer Modellkette. Die Ränder der Szenarienkorridore sind hervorgehoben.

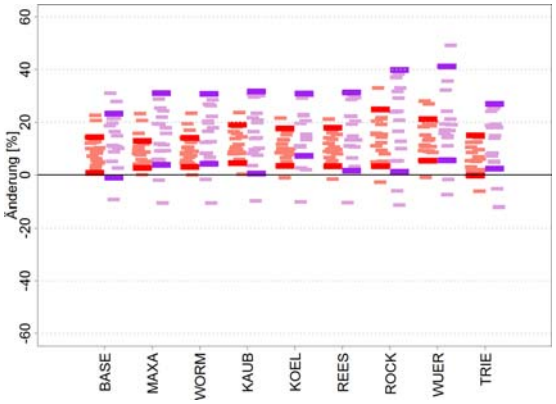

Abbildung 9: Änderungssignale für den mittleren Abfluss (MQ) während des hydrologischen Winters (Nov.-Mrz.). Darstellung wie in Abbildung 8.

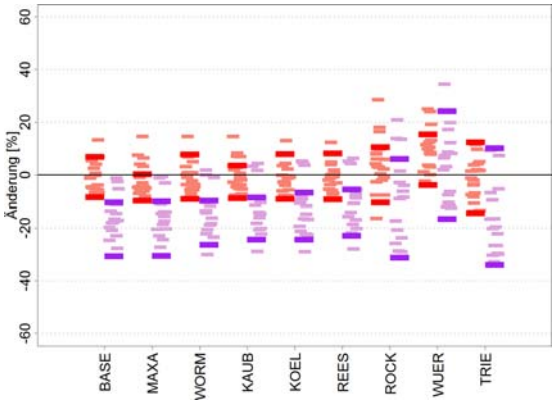

Abbildung 10: Änderungssignale für den mittleren Abfluss (MQ) während des hydrologischen Sommers (Mai-Okt.). Darstellung wie in Abbildung 8.

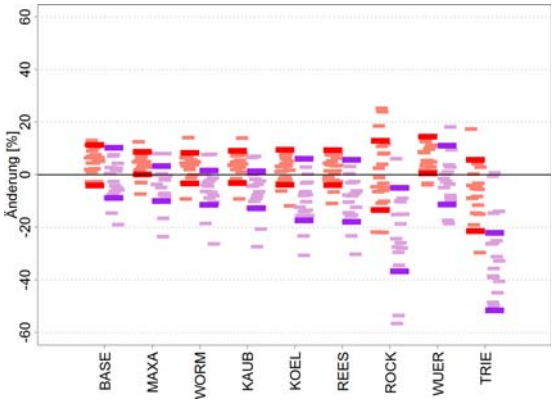

Abbildung 11: Änderungssignale für den Niedrigwasserabfluss (NM7Q) während des Wasserhaushaltsjahres (Apr.-Mrz.). Darstellung wie in Abbildung 8.

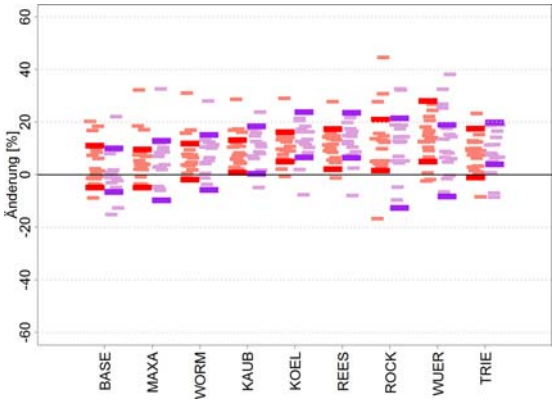

Abbildung 12: Änderungssignale für hohe Abflüsse (HM5Q) während des hydrologischen Jahres (Nov.-Okt.). Darstellung wie in Abbildung 8.

Tabelle 8: Szenarienkorridore für die mittleren jährlichen und halbjährlichen Abflüsse (MQ) sowie die Niedrig- und Hochwasserabflüsse (NM7Q bzw. HM5Q) an ausgewählten Pegeln im Rheineinzugsgebiet.
Datengrundlage wie in Abbildung 8 bis Abbildung 12. Die Bandbreiten repräsentieren Cluster innerhalb des Ensembles in dem eine Mehrheit der Simulationen (mindestens 75%) besonders eng beieinander liegt (vgl. Erläuterungen auf Seite 26). Mit (*) markierte Korridore sind vergleichsweise schlecht abgrenzbar. Mit (a) markierte Korridore wurden aufgrund einer Konsistenzprüfung im Flusslängsschnitt manuell angepasst. Eine blaue Hinterlegung zeigt eine tendenzielle Abflusszunahme an, eine orange Hinterlegung verweist entsprechend auf eine Abnahme; ein indifferentes Änderungssignal ist grau hinterlegt. Zum Vergleich sind die bis heute beobachteten Änderungen im Vergleich der Periode 1981-2010 mit der Referenz (1961-1990) angegeben.

Parameter	Pegel	Beobachtung (1961-1990)	Beobachtung (1981-2010)	Nahe Zukunft (2021-2050)	Ferne Zukunft (2071-2100)
		[m^3/s]	[%]	[%]	[%]
MQ Hydrologisches Jahr (Nov.-Okt.)	Basel	1065	+1.4	-5 bis +5	-10 bis +10
	Maxau	1255	+2.1	0 bis +5	-15 bis +15 (*)
	Worms	1427	+2.2	0 bis +10	-15 bis +10
	Kaub	1710	+2.4	0 bis +10	-10 bis +15
	Köln	2189	+1.2	0 bis +15	-10 bis +20 (*)
	Rees	2370	+0.8	0 bis +10	-5 bis +20
	Rockenau (Neckar)	137	+7.1	0 bis +20	-5 bis +30 (*)
	Würzburg (Main)	112	+14.1	0 bis +15	0 bis +30 (*)
	Trier (Mosel)	288	+3.5	-5 bis +10	-5 bis +10
MQ Hydrologischer Winter (Nov.-Apr.)	Basel	884	+4.2	0 bis +15	0 bis +25
	Maxau	1130	+5.5	+5 bis +15	+5 bis +30
	Worms	1344	+5.7	+5 bis +15	+5 bis +30
	Kaub	1706	+6.0	+5 bis +20	0 bis +30 (*)
	Köln	2380	+4.3	+5 bis +20	+5 bis +30
	Rees	2607	+4.0	+5 bis +20	0 bis +30 (*)
	Rockenau (Neckar)	170	+10.2	+5 bis +25	0 bis +40 (*)
	Würzburg (Main)	146	+15.3	+5 bis +20	+5 bis +40 (*)
	Trier (Mosel)	410	+7.1	0 bis +15	+5 bis +25
MQ Hydrologischer Sommer (Mai-Okt.)	Basel	1248	-1.4	-10 bis +5	-30 bis -10
	Maxau	1385	-1.6	-10 bis +10 (a)	-30 bis -10
	Worms	1511	-1.7	-10 bis +10	-25 bis -10
	Kaub	1712	-1.8	-10 bis +10 (a)	-25 bis -10
	Köln	1996	-3.4	-10 bis +10	-25 bis -5
	Rees	2134	-4.2	-10 bis +10	-25 bis -5
	Rockenau (Neckar)	103	+1.4	-10 bis +10	-30 bis +5 (*)
	Würzburg (Main)	78	+12.0	-5 bis +15	-15 bis +25 (*)
	Trier (Mosel)	166	-7.0	-15 bis +10	-35 bis +10 (*)

Parameter	Pegel	Beobachtung (1961-1990)	Beobachtung (1981-2010)	Nahe Zukunft (2021-2050)	Ferne Zukunft (2071-2100)
		[m^3/s]	[%]	[%]	[%]
NM7Q Wasserhaushaltsjahr (Apr.-Mrz.)	Basel	519	+4.90	-5 bis +10	-10 bis +10
	Maxau	635	+6.6	0 bis +10	-10 bis +5
	Worms	705	+6.6	-5 bis +10	-10 bis +0
	Kaub	827	+7.2	-5 bis +10	-15 bis +0
	Köln	1009	+4.8	-5 bis +10	-15 bis +5
	Rees	1119	+4.7	-5 bis +10	-20 bis +5
	Rockenau (Neckar)	44	+6.1	-15 bis +15	-35 bis -5
	Würzburg (Main)	40	+24.6	0 bis +15	-10 bis +10
	Trier (Mosel)	64	-5.3	-20 bis +5	-50 bis -20
HM5Q Hydrologisches Jahr (Nov.-Okt.)	Basel	2176	+8.3	-5 bis +10	-5 bis +10
	Maxau	2669	+7.3	-5 bis +10	-10 bis +15
	Worms	3142	+7.0	0 bis +10	-5 bis +15
	Kaub	3937	+11.2	0 bis +15	0 bis +20
	Köln	5768	+11.3	+5 bis +15	+5 bis +25
	Rees	6071	+12.9	0 bis +20	+5 bis +25
	Rockenau (Neckar)	643	+17.0	0 bis +20	-10 bis +20 (*)
	Würzburg (Main)	472	+20.0	+5 bis +30	-10 bis +20 (*)
	Trier (Mosel)	1481	+15.0	0 bis +20	+5 bis +20

Die genannten Tendenzen finden sich bereits in den Beobachtungsdaten wieder (Vergleich der Perioden 1961-1990 und 1981-2010; vgl. Tabelle 8). Je nach Kennwert scheinen die für die Jahrhundertmitte projizierten Änderungen - bezogen auf den jeweils äußeren Rand des Szenarienkorridors - bereits zu einem Drittel (mittlerer Winterabfluss) bis zur Hälfte (Niedrigwasser) realisiert zu sein. Dabei ist allerdings zu beachten und ggf. im Detail zu untersuchen, dass die beobachteten Änderungen nicht nur klimatischen Ursprungs sind, sondern auch anthropogene Einflüsse beinhalten können (z.B. die Wasserüberleitung aus dem Donaugebiet am Pegel Würzburg).

6.2.2 Änderung des Abflussgeschehens im Elbeeinzugsgebiet

Die Änderungen des Abflussgeschehens sind für die ausgewählten Pegel und Kennwerte in Abbildung 14 bis Abbildung 18 dargestellt und in Tabelle 9 in Form von Szenarienkorridoren zusammengefasst.

Die Projektionen lassen bis zur Mitte des 21. Jahrhundert keine kritische Verknappung der Wasserressourcen im Elbeeinzugsgebiet erkennen. Für den **mittleren jährlichen Abfluss** (MQ) ergeben sich gegenüber der Referenzperiode 1961-1990 leichte Änderungen im Bereich zwischen -10% bis +15%. Gegen Ende des 21. Jahrhunderts deutet eine Mehrzahl der Projektionen jedoch auf eine Abnahme der Jahresabflüsse hin, die bis -25% betragen kann und primär durch eine Abnahme der Abflüsse in den Sommermonaten bedingt ist (s.u.).

Die **mittleren Winterabflüsse** (MQ, Nov.-Apr.) zeigen weder in der nahen noch in der fernen Zukunft klare Änderungstendenzen. Die Szenarienkorridore liegen in der nahen Zukunft relativ eng beieinander (an mehreren Pegeln +/-5%), gegen Ende des Jahrhunderts weitet sich die Spanne jedoch in beide Richtungen auf (-20% bis + 15%). Für diesen Zeithorizont ist daher keine klare Aussage möglich.

Hinsichtlich der **mittleren Sommerabflüsse** (MQ, Mai-Okt.) in der nahen Zukunft deutet eine Mehrheit der Projektionen auf eine Abnahme bis -15% hin, jedoch gibt es an allen Pegel auch mehrere Projektionen mit leicht positiver Tendenz (+5%). Klare Änderungssignale werden für die ferne Zukunft simuliert. Hier bewirken starke Abnahmen von bis zu -30% an allen betrachteten Pegeln (außer Rathenow) die beschriebene Verschiebung des mittleren jährlichen Abflusses in den negativen Bereich.

Die **Niedrigwasserabflüsse** (NM7Q) zeigen bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts keine klare Änderungstendenz. Die projizierten Werte streuen an den meisten Pegeln im Bereich von +/-10% um die Werte der Referenzperiode 1961-1990. Eindeutige Abnahmen werden an allen Pegeln erst für die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts simuliert. Die Niedrigwasserabflüsse liegen hier um bis zu 30% unter dem Referenzniveau. Die Bandbreite der Ergebnisse ist jedoch groß. Verschiedene Projektionen liegen noch leicht im positiven Bereich.

Die Hochwasserabflüsse (**oberer Abflussbereich,** HM5Q) weisen für die beiden betrachteten Zukunftszeiträume keine bzw. eine leicht abnehmende Tendenz auf (Wertebereiche von -10% bis +10% bzw. -15% bis +5%). Die gesamte Streuung innerhalb des Ensembles ist jedoch enorm und beträgt mitunter +-30% und mehr.

Am Beispiel der Hochwasserabflüsse zeigt sich deutlich, dass bereits die Wahl der Bezugszeiträume erheblich auf die ermittelten Änderungssignale auswirken kann. Aus Abbildung 13 geht hervor, dass der obere Abflussbereich im Elbeeinzugsgebiet, hier exemplarisch für den Pegel Neu Darchau dargestellt, eine bemerkenswerte multidekadische Variabilität zeigt. So geht der Periode 2021-2050, die das besagte indifferente Signal aufweist, eine Phase voraus, in der eine klare Mehrheit der Simulationen auf eine Zunahme hoher Abflüsse hindeutet. Für den in diesem Bericht nicht fo-

kussierten Zeitraum 2001-2030 (gelbe Markierung) ergibt sich ein Szenarienkorridor von -5% bis +20%), der mit den beobachteten Tendenzen (Schwarze Kurve) kongruent ist.

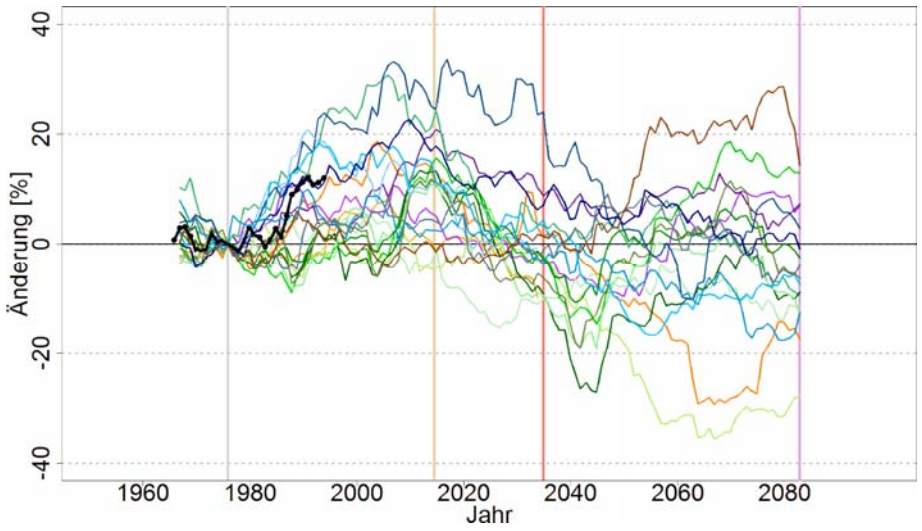

Abbildung 13: Änderungen des HM5Q am Pegel Neu Darchau als 31-jährige gleitende Mittelwerte für beobachtete Pegeldaten (schwarze Linie) und Zukunftsprojektionen (bunte Linienschar).
Farbig hervorgehoben sind die Mittelwerte der Zeitscheiben 1961-1990 (grau, Referenz), 2001-2030 (gelb), 2021-2050 (rot) und 2071-2010 (violett).

Mit Ausnahme der Hochwasserkennwerte liegen die beobachteten Änderungen (Vergleich der Periode 1981-2010 zu 1961-1990; vgl. Tabelle 9) der vergangenen Jahre überwiegend innerhalb der für die nahe Zukunft (2021-2050) simulierten Szenarienkorridore. Die an den meisten Pegeln beobachtete leichte Zunahme der mittleren Winterabflüsse liegt eher im oberen Bereich der für die Jahrhundertmitte simulierten Korridore. Die beobachtete Abnahme der mittleren Sommerabflüsse deckt sich hinsichtlich der Richtung mit den Simulationen und zeigt, dass - bezogen auf den äußeren Rand des Szenarienkorridors - bereits 1/3 bis 2/3 der für die Jahrhundertmitte simulierten Änderungen realisiert sind. Bzgl. der Entwicklungen im Niedrigwasserbereich zeigen weder die Beobachtungen noch die Simulationen einheitliche Änderungstendenzen für die betrachteten Pegel. Gegenläufige Entwicklungen zeigen sich für den oberen Abflussbereich. Hier liegen die beobachteten Änderungen zumeist oberhalb der simulierten Wertebereiche. Eine mögliche Erklärung ist hier das Auftreten von außergewöhnlich großen Hochwasserereignissen (z.B. 2002 und 2006) in der Periode 1981-2010 gegenüber der relativ hochwasserarmen Periode 1961-1990. Am Pegel Rathenow liegen die beobachteten Abflüsse gleich für mehrere Kennwerte außerhalb der durch die Szenarienkorridore umspannten Bandbreite. Die beobachteten starken Abnahmen sind vermutlich Ausdruck der geänderten Bewirtschaftungspraxis im Spree-Havel-Gebiet seit 1990.

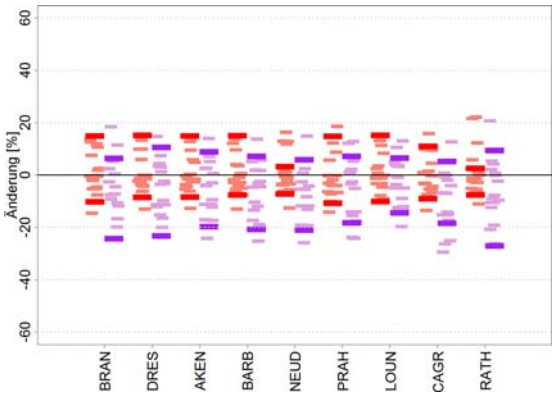

Abbildung 14: Änderungssignale für den mittleren Abfluss (MQ) während des hydrologischen Jahres (Nov.-Okt.) an ausgewählten Pegeln im Elbeeinzugsgebiet..
Verhältnis vieljähriger Mittelwerte in der nahen und fernen Zukunft (2021-2050, rot bzw. 2071-2100, violett) gegenüber der Referenzperiode (1961-1990). Ausgewertet wurden 20 Abflussprojektionen für die nahe und 18 für die ferne Zukunft. Jede Linie zeigt das Ergebnis einer Modellkette. Die Ränder der Szenarienkorridore sind hervorgehoben.

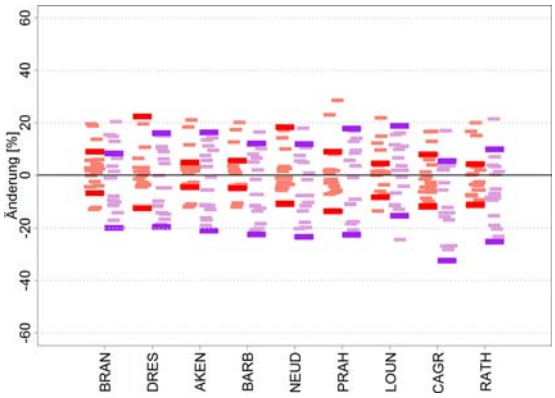

Abbildung 15: Änderungssignale für den mittleren Abfluss (MQ) während des hydrologischen Winters (Nov.-Mrz.). Darstellung wie in Abbildung 14.

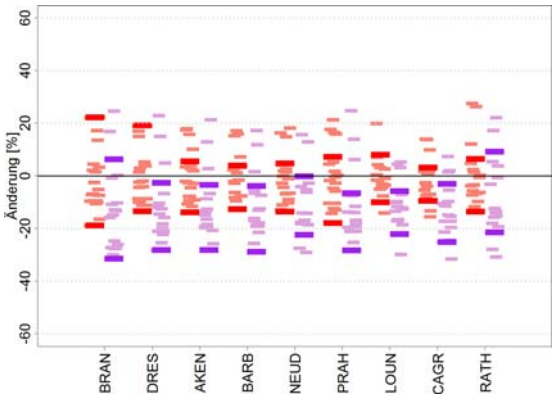

Abbildung 16: Änderungssignale für den mittleren Abfluss (MQ) während des hydrologischen Sommers (Mai-Okt.). Darstellung wie in Abbildung 14.

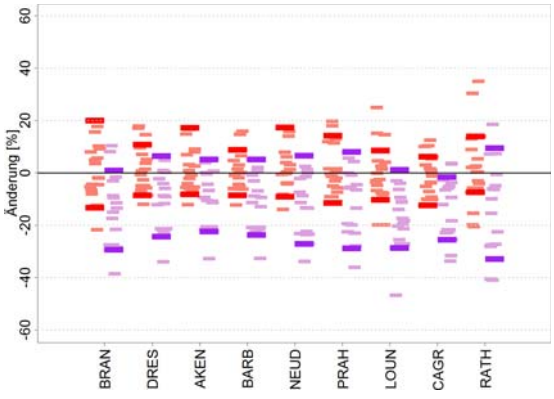

Abbildung 17: Änderungssignale für den Niedrigwasserabfluss (NM7Q) während des Wasserhaushaltsjahres (Apr.-Mrz.). Darstellung wie in Abbildung 14.

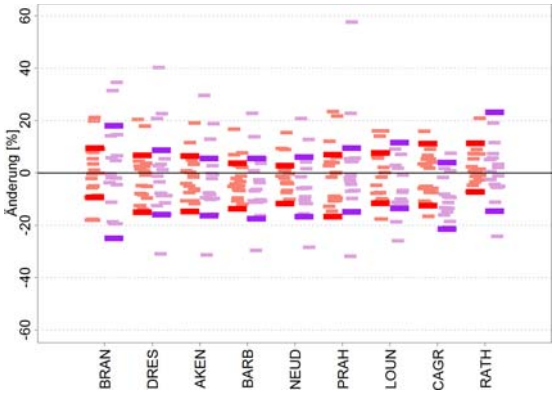

Abbildung 18: Änderungssignale für hohe Abflüsse (HM5Q) während des hydrologischen Jahres (Nov.-Okt.). Darstellung wie in Abbildung 14.

Tabelle 9: Szenarienkorridore für die mittleren jährlichen und halbjährlichen Abflüsse (MQ) sowie die Niedrig- und Hochwasserabflüsse (NM7Q bzw. HM5Q) an ausgewählten Pegeln im Elbeeinzugsgebiet.
Datengrundlage wie in Abbildung 14 bis Abbildung 18. Die Bandbreiten repräsentieren Cluster innerhalb des Ensembles in dem eine Mehrheit der Simulationen (mindestens 75%) besonders eng beieinander liegt (vgl. Erläuterungen auf Seite 26). Mit (*) markierte Korridore sind vergleichsweise schlecht abgrenzbar. Mit (a) markierte Korridore wurden aufgrund einer Konsistenzprüfung im Flusslängsschnitt manuell angepasst. Eine blaue Hinterlegung zeigt eine tendenzielle Abflusszunahme an, eine orange Hinterlegung verweist entsprechend auf eine Abnahme; ein indifferentes Änderungssignal ist grau hinterlegt. Zum Vergleich sind die bis heute beobachteten Änderungen im Vergleich der Periode 1981-2010 mit der Referenz (1961-1990) angegeben.

Parameter	Pegel	Beobachtung (1961-1990)	Beobachtung (1981-2010)	Nahe Zukunft (2021-2050)	Ferne Zukunft (2071-2100)
		[m^3/s]	[%]	[%]	[%]
MQ Hydrologisches Jahr (Nov.-Okt.)	Brandys			-10 bis +15	-25 bis +5 (*)
	Dresden	331	+2.4	-10 bis +15	-25 bis +10 (*)
	Aken	453	-2.2	-10 bis +15	-20 bis +10 (*)
	Barby	571	-2.7	-5 bis +5 (a)	-20 bis +5
	Neu Darchau	730	-3.4	-5 bis +5	-20 bis +5
	Prag (Moldau)			-10 bis +15	-20 bis +5
	Louny (Eger)			-10 bis +15	-15 bis +5
	Calbe-Grizehne (Saale)	125	-5.2	-10 bis +10	-20 bis +5
	Rathenow (Havel)	92	-13.7	-5 bis +5	-25 bis +10 (*)
MQ Hydrologischer Winter (Nov.-Apr.)	Brandys			-5 bis +10	-20 bis +10
	Dresden	396	+7.0	-5 bis +10 (a)	-20 bis +15 (*)
	Aken	547	+1.8	-5 bis +5	-20 bis +15 (*)
	Barby	691	+1.3	-5 bis +5	-20 bis +10 (*)
	Neu Darchau	880	+1.2	-5 bis +5 (a)	-25 bis +10 (*)
	Prag (Moldau)			-15 bis +10	-20 bis +20 (*)
	Louny (Eger)			-10 bis +5	-15 bis +20 (*)
	Calbe-Grizehne (Saale)	152	-0.3	-10 bis +10	-30 bis +5 (*)
	Rathenow (Havel)	117	-10.8	-10 bis +5	-25 bis +10 (*)
MQ Hydrologischer Sommer (Mai-Okt.)	Brandys			-15 bis +5 (a)	-30 bis +5 (*)
	Dresden	271	-5.7	-15 bis +5 (a)	-30 bis 0 (*)
	Aken	365	-9.5	-15 bis +5	-30 bis -5
	Barby	459	-10.0	-10 bis +5	-30 bis -5
	Neu Darchau	589	-11.1	-15 bis +5	-20 bis 0
	Prag (Moldau)			-20 bis +5	-30 bis -5
	Louny (Eger)			-10 bis +10	-20 bis -5
	Calbe-Grizehne (Saale)	98	-12.7	-10 bis +5	-25 bis -5
	Rathenow (Havel)	69	-19.4	-15 bis +5	-20 bis +10 (*)

Parameter	Pegel	Beobachtung (1961-1990)	Beobachtung (1981-2010)	Nahe Zukunft (2021-2050)	Ferne Zukunft (2071-2100)
		[m^3/s]	[%]	[%]	[%]
NM7Q Wasserhaushaltsjahr (Apr.-Mrz.)	Brandys			-15 bis +20 (*)	-30 bis 0 (*)
	Dresden	131	+0.8	-10 bis +10	-25 bis +5 (*)
	Aken	185	-2.8	-10 bis +15	-20 bis +5
	Barby	240	+0.3	-10 bis +10	-25 bis +5 (*)
	Neu Darchau	316	-6.0	-10 bis +20 (*)	-25 bis +5 (*)
	Prag (Moldau)			-10 bis +15	-30 bis +10 (*)
	Louny (Eger)			-10 bis +10	-30 bis 0
	Calbe-Grizehne (Saale)	57	-7.8	-10 bis +5	-25 bis 0
	Rathenow (Havel)	29	-36.6	-5 bis +15	-35 bis +10 (*)
HM5Q Hydrologisches Jahr (Nov.-Okt.)	Brandys			-10 bis +10	-25 bis +20 (*)
	Dresden	1106	+19.5	-15 bis +5	-15 bis +10
	Aken	1464	+7.9	-15 bis +5	-15 bis +5
	Barby	1729	+8.5	-15 bis +5	-15 bis +5
	Neu Darchau	1783	+12.0	-10 bis +5	-15 bis +5
	Prag (Moldau)			-15 bis +5	-15 bis +10
	Louny (Eger)			-10 bis +10	-15 bis +10
	Calbe-Grizehne (Saale)	366	+4.5	-10 bis +10	-20 bis +5
	Rathenow (Havel)	162	-2.8	-5 bis +10	-15 bis +25 (*)

6.2.3 Änderung des Abflussgeschehens im oberen Donaueinzugsgebiet

Die Änderungen des Abflussgeschehens sind für die ausgewählten Pegel und Kennwerte in Abbildung 21 bis Abbildung 25 dargestellt und in Tabelle 10 in Form von Szenarienkorridoren zusammengefasst.

Beim **mittleren jährlichen Abfluss** (MQ, Abbildung 21) sind die für die nahe Zukunft projizierten Änderungen gegenüber der Referenzsituation im Vorzeichen indifferent (-10% bis +5%). Eine Ausnahme stellt der Pegel Donauwörth dar. Hier deutet eine Mehrzahl der Projektionen einen Rückgang der Wasserressourcen an (-15% bis 0%). Für das Ende des Jahrhunderts weisen alle Pegel eine Abnahme des Jahresabflusses auf (-30% bis 0%). Die größten Abflussabnahmen verzeichnen die Pegel oberhalb der Mündung des Inns.

Nach dem derzeitigen Kenntnisstand ist somit bis zur Mitte des 21. Jahrhundert nicht mit einer generellen Verknappung der Wasserressourcen im Donaueinzugsgebiet zu rechnen. Aufgrund von Veränderungen der Wasserhaushaltsgrößen, insbesondere des Schneeregimes im alpinen Raum, der tatsächlichen Verdunstung und der saisonalen Verteilung der projizierten Niederschläge, ergeben sich jedoch Änderungen in der jahreszeitlichen Verteilung der Abflüsse.

Hinsichtlich der **mittleren Winterabflüsse** (Kennwert: MQ, Nov.-Apr., Abbildung 22) zeigt das Ensemble der Abflussprojektion an den meisten Pegeln weder in der nahen noch in der fernen Zukunft klare Änderungen an. Die Ergebnisse schwanken je nach Pegel und Zeitraum mit unterschiedlicher Bandbreite um die für den Zeitraum 1961-1990 berechneten Werte. Die Änderungen liegen dabei meist im Bereich von -5% bis +10% (nahe Zukunft) bzw. -25% bis +20% (ferne Zukunft). Im derzeit schneedominierten Einzugsgebiet des Inns (Pegel Passau-Ingling) deuten die Ergebnisse aufgrund einer zunehmenden Regenlastigkeit auf einen Anstieg der mittleren Winterabflüsse hin. Demgegenüber werden für die **mittleren Sommerabflüsse** (Kennwert: MQ, Mai-Okt., Abbildung 23) durchweg Abnahmen projiziert. Sie sind in der fernen Zukunft ausgeprägter als in der nahen Zukunft, wobei die Wertebereiche je nach Pegel von ca. 0% bis -15%/-20 % bzw. -10% bis -35%/-40 % reichen.

Mögliche Betroffenheiten könnten sich unter diesen Bedingungen in den Mittelgebirgsregionen ergeben, die bereits heute ein ausgeprägtes sommerliches Abflussminimum aufweisen. Dies belegen auch die Ergebnisse zu den **Niedrigwassersituationen** (hier: niedrigste mittlere Monatsabflüsse NMoMQ eines Wasserhaushaltsjahres, Abbildung 24). Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts weist eine Mehrzahl der Simulationen an den meisten Pegeln auf eine Abnahme gegenüber der Referenzsituation hin (ca. -15% bis 0% für die „nahe Zukunft“ und ca. -40%/-35% bis -20%/-10% für die „ferne Zukunft“). Nur im schneedominierten Inn-Einzugsgebiet könnten sich Niedrigwassersituationen aufgrund der beschriebenen Änderung des Abflussregimes (zunehmende Regenlastigkeit) bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts weniger intensiv ausnehmen.

Die Entwicklung **hoher Abflüsse** (hier: höchste mittlere Monatsabflüsse HMoMQ eines hydrologischen Jahres, Abbildung 25) unterscheidet sich ebenfalls zwischen Teileinzugsgebieten mit schnee- bzw. regendominierten Abflussregimen. Für beide betrachteten Zukunftszeiträume weisen die Ergebnisse an den meisten Pegeln keine eindeutigen Tendenzen auf (+/-10% bis zur Mitte und -25% bis +10% bis zum Ende des 21. Jahrhunderts). Die Ausnahme bildet auch hier das schneedominierte Inn-Einzugsgebiets, bei dem u.a. der verminderte sommerliche Schmelzwassereintrag eine Abnahme der hohen Abflüsse um bis zu -15% bis -5% für die „nahe Zukunft“ und bis zu -35% bis -10% für die „ferne Zukunft“ mit sich bringt.

Die in der jüngeren Vergangenheit beobachteten Änderungen (Vergleich der Perioden 1981-2010 zu 1961-1990) decken sich in der Tendenz überwiegend mit den abgeleiteten Szenarienkorridoren für die nahe Zukunft (2021-2050). Für einige Pegel und Kennwerte übersteigen die bis heute beobachteten Änderungen jedoch bereits die für die Jahrhundertmitte berechneten Wertebereiche (z.B. Anstieg des Niedrigwasserkennwertes NMoMQ). Am Pegel Donauwörth wird eine gegenläufige Tendenz von beobachteten und projizierten Änderungen der Niedrigwassersituationen ermittelt. Hier zeigen die Beobachtungen eine Zunahme von 6% für den Zeitraum 1981-2010, während für die nahe Zukunft eine Abnahme projiziert wird. Diese Unterschiede in der Tendenz sind vermutlich dadurch zu erklären, dass aufgrund der saisonalen Verschiebung des Abflussregimes Niedrigwassersituationen zukünftig voraussichtlich häufiger im Sommerhalbjahr als im Winterhalbjahr auftreten werden. Diese Tendenz (Zunahme der Niedrigwasserabflüsse im Winterhalbjahr, leichte Abnahme der Niedrigwasserabflüsse im Sommerhalbjahr) ist in den Beobachtungsdaten zu erkennen (siehe Abbildung 19 und Abbildung 20).

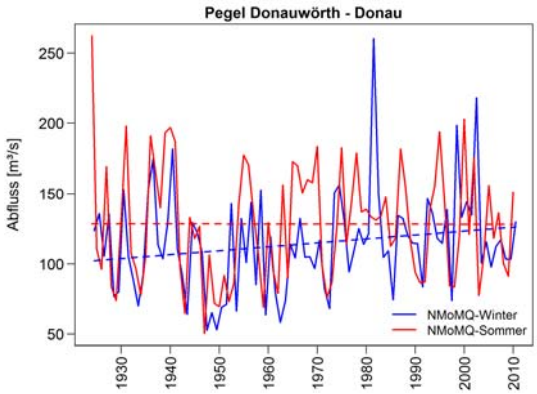

Abbildung 19 Niedrigste mittlere Monatsabflüsse im Sommerhalbjahr (April - September) und Winterhalbjahr (Oktober – März) am Pegel Donauwörth, gestrichelte Linien linearer Trend

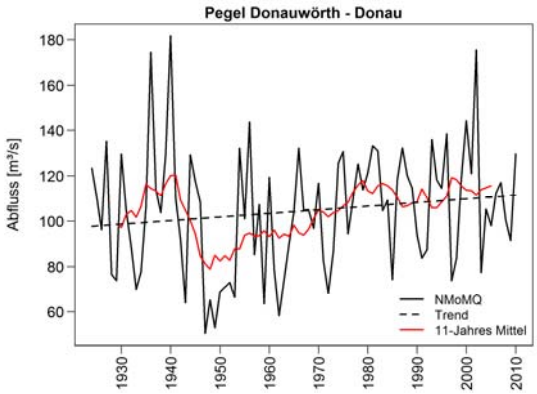

Abbildung 20: Niedrigste mittlere Monatsabflüsse im Wasserhaushaltsjahr am Pegel Donauwörth, gestrichelte Linie linearer Trend, rote Linie 11-Jahres Mittel

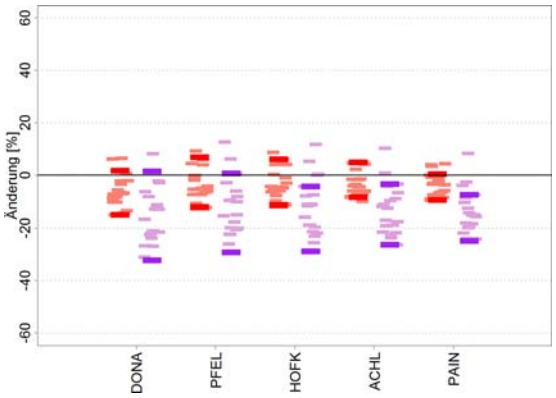

Abbildung 21: Änderungssignale für den mittleren Abfluss (MQ) während des hydrologischen Jahres (Nov.-Okt.) an ausgewählten Pegeln im oberen Donaueinzugsgebiet. Verhältnis vieljähriger Mittelwerte in der nahen und fernen Zukunft (2021-2050, rot bzw. 2071-2100, violett) gegenüber der Referenzperiode (1961-1990). Ausgewertet wurden 21 Abflussprojektionen für die nahe und 18 für die ferne Zukunft. Jede Linie zeigt das Ergebnis einer Modellkette. Die Ränder der Szenarienkorridore sind hervorgehoben.

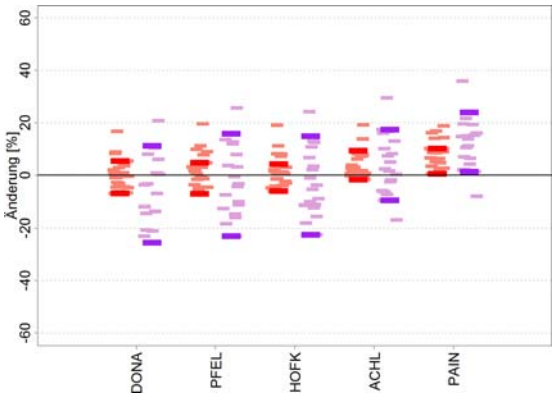

Abbildung 22: Änderungssignale für den mittleren Abfluss (MQ) während des hydrologischen Winters (Nov.-Mrz.). Darstellung wie in Abbildung 21.

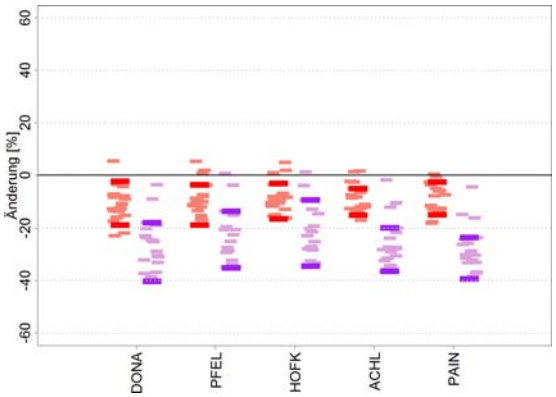

Abbildung 23: Änderungssignale für den mittleren Abfluss (MQ) während des hydrologischen Sommers (Mai-Okt.). Darstellung wie in Abbildung 21.

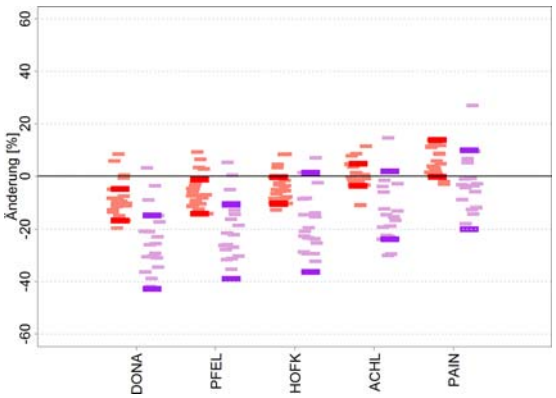

Abbildung 24: Änderungssignale für den niedrigsten mittleren Monatsabfluss (NMoMQ) während des Wasserhaushaltsjahres (Apr.-Mrz.). Darstellung wie in Abbildung 21.

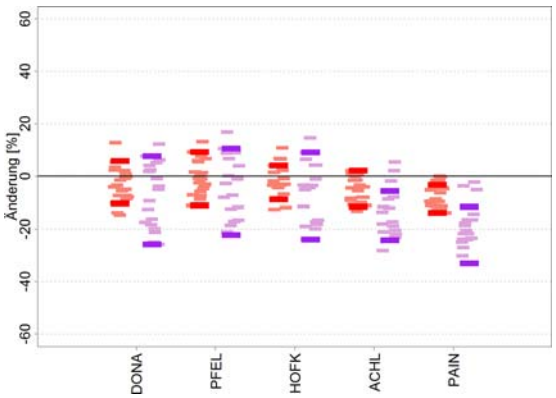

Abbildung 25: Änderungssignale für den höchsten mittleren Monatsabfluss (HMoMQ) während des hydrologischen Jahres (Nov.-Okt.). Darstellung wie in Abbildung 21.

Tabelle 10: Szenarienkorridore für die mittleren jährlichen und halbjährlichen Abflüsse (MQ) sowie die niedrigsten und höchsten monatlichen Abflüsse (NMoMQ bzw. HMoMQ) an ausgewählten Pegeln im Donaueinzugsgebiet.
Datengrundlage wie in Abbildung 21 bis Abbildung 25. Die Bandbreiten repräsentieren Cluster innerhalb des Ensembles in dem eine Mehrheit der Simulationen (mindestens 75%) besonders eng beieinander liegt (vgl. Erläuterungen auf Seite 26). Mit (*) markierte Korridore sind vergleichsweise schlecht abgrenzbar. Eine blaue Hinterlegung zeigt eine tendenzielle Abflusszunahme an, eine orange Hinterlegung verweist entsprechend auf eine Abnahme; ein indifferentes Änderungssignal ist grau hinterlegt. Zum Vergleich sind die bis heute beobachteten Änderungen im Vergleich der Periode 1981-2010 mit der Referenz (1961-1990) angegeben.

Parameter	Pegel	Beobachtung (1961-1990)	Beobachtung (1981-2010)	Nahe Zukunft (2021-2050)	Ferne Zukunft (2071-2100)
		[m^3/s]	[%]	[%]	[%]
MQ Hydrologisches Jahr (Nov.-Okt.)	Donauwörth	196	+3.5	-15 bis +0	-30 bis 0 (*)
	Pfelling	470	+0.6	-10 bis +5	-30 bis 0 (*)
	Hofkirchen	649	+1.2	-10 bis +5	-30 bis -5
	Achleiten	1419	+1.8	-10 bis +5	-25 bis -5
	Passau-Ingling	729	+2.0	-10 bis +0	-25 bis -5
MQ Hydrologischer Winter (Nov.-Apr.)	Donauwörth	206	+7.9	-5 bis +5	-25 bis +10 (*)
	Pfelling	492	+5.6	-5 bis +5	-25 bis +15
	Hofkirchen	656	+6.3	-5 bis +5	-20 bis +15
	Achleiten	1206	+8.1	0 bis +10	-10 bis +20 (*)
	Passau-Ingling	505	+10.8	0 bis +10	0 bis +25
MQ Hydrologischer Sommer (Mai-Okt.)	Donauwörth	185	-1.0	-20 bis +0	-40 bis -20
	Pfelling	447	-4.5	-20 bis -5	-35 bis -15
	Hofkirchen	641	-4.1	-15 bis -5	-35 bis -10
	Achleiten	1633	-2.9	-15 bis -5	-35 bis -20
	Passau-Ingling	956	-2.9	-15 bis +0	-40 bis -25
NMoMQ Wasserhaushaltsjahr (Apr.-Mrz.)	Donauwörth	105	+6.0	-15 bis -5	-45 bis -15 (*)
	Pfelling	273	+0.3	-15 bis +0	-40 bis -10
	Hofkirchen	397	+1.3	-10 bis +0	-35 bis 0 (*)
	Achleiten	816	+9.6	-5 bis +5	-25 bis +0
	Passau-Ingling	363	+10.9	0 bis +15	-20 bis +10 (*)
HMoMQ Hydrologisches Jahr (Nov.-Okt.)	Donauwörth	337	+4.1	-10 bis +5	-25 bis +10
	Pfelling	772	+2.2	-10 bis +10	-20 bis +10 (*)
	Hofkirchen	1026	+3.9	-10 bis +5	-25 bis +10 (*)
	Achleiten	2306	-1.5	-10 bis +0	-25 bis -5
	Passau-Ingling	1364	-3.8	-15 bis -5	-35 bis -10

6.2.4 Änderung schifffahrtsrelevanter Kennwerte (Rhein und Elbe)

Für die Binnenschifffahrt sind Auswertungen der Unter- bzw. Überschreitung kritischer Schwellenwerte besonders relevant. Diese sind nachfolgend exemplarisch für die Pegel Kaub (Rhein) und Barby (Elbe) dargestellt. Die betrachteten Schwellenwerte $FDC_Q95_{1961\text{-}1990}$ und $FDC_Q01_{1961\text{-}1990}$ entsprechen in etwa den Abflüssen bei gleichwertigen Wasserständen (GlW, niedriger Schwellenwert) und dem höchsten schiffbaren Wasserstand (HSW, hoher Schwellenwert; vgl. Abschnitt 4.2).

Mit Bezug auf den GlW ist es das Ziel der Unterhaltung durch die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, an mindestens 345 Tagen pro Jahr (d.h. bis zu ~20 Unterschreitungstage) eine abschnittsweise definierte Fahrrinnentiefe für die Schifffahrt vorzuhalten; z.B. wird an der Engstelle Mittelrhein bei GlW eine Fahrrinnentiefe von 190 cm gewährleistet. Dies entspricht am Pegel Kaub einem Wasserstand von 80 cm (GlW2002) bzw. einem GlQ[7] von 719 m^3/s. An der Elbe wird eine Fahrrinnentiefe von 160 cm angestrebt. Diese entspricht am Pegel Barby einem Wasserstand von 102 cm (GlW89*) bzw. einem GlQ von 232 m^3/s (WSV, 2009). Eine Unterschreitung der genannten Wasserstände und -tiefen bzw. der entsprechenden Abflüsse ist für viele gängige Schiffstypen mit Abladebeschränkungen und Kostensteigerungen verbunden.

Die Überschreitung des HSW führt ebenfalls zu Schifffahrtseinschränkungen. Gemäß der Rheinschifffahrtspolizeiverordnung (RheinSchPV) ist die Überschreitung der Hochwassermarke I am Pegel Kaub (Wasserstand 460 cm, bzw. Abfluss 3445 m^3/s) verbunden mit Geschwindigkeitsbeschränkungen und Fahrverboten für einzelne Schiffstypen. Am Pegel Barby ist gemäß der Binnenschifffahrtsstraßenordnung (BinSchStrO) mit der Einstellung der Schifffahrt zu rechnen, wenn der HSW[8] (Wasserstand 570 cm bzw. Abfluss 2290 m^3/s) überschritten wird.

Für die obere Donau konnten keine Auswertungen zu Unterschreitungen des dort gebräuchlichen Regulierungsniedrigwasserstandes (RNW bzw. RNQ) sowie zu Überschreitungen des HSW vorgenommen werden, da hier statt der dazu erforderlichen Tageswerte lediglich Monatswerte generiert wurden (vgl. Abschnitt 4.2). Generelle Aussagen zur Niedrig- und Hochwasserthematik sind jedoch in Abschnitt 6.2.3 zu finden.

[7] Bei Verwendung der von 1999 bis 2003 gültigen Abflusstafel.

[8] Hier keine Gliederung in unterschiedliche Marken.

Rhein

In Abbildung 26 sind die langfristigen Änderungen der Anzahl der Unterschreitungstage des unteren Abflussschwellenwertes FDC_Q95$_{1961\text{-}1990}$ (~ GLQ) in einem Wasserhaushaltsjahr am Pegel Kaub für die vorliegenden Abflussprojektionen in Form von 31-jährig gleitenden Mittelwerten (± 15 Jahre) dargestellt. Ergänzend sind auch die aus den Beobachtungsdaten abgeleiteten Werte aufgeführt. Definitionsgemäß wird der **niedrige Schwellenwert** (FDC_Q95$_{1961\text{-}1990}$) in der Referenzperiode an rund 18 Tagen pro Jahr unterschritten (95% von 365 Tagen, s. markiertes Jahr 1975).

Für den Betrachtungshorizont „nahe Zukunft“ wird ein aus Schifffahrtssicht indifferentes bzw. positives Signal projiziert (Abbildung 26). Die Projektionen liegen mit 10 bis 25 Unterschreitungstagen im Bereich des heutigen Niveaus, wobei eine Mehrheit in Richtung einer Abnahme tendiert. Die Beobachtung (schwarze Kurve in Abbildung 26) geht in dieselbe Richtung. Fünf von zwanzig Projektionen deuten auf eine Zunahme der Unterschreitungstage hin, wobei zwei von diesen Projektionen ~ 30 Unterschreitungstage aufweisen. Erst in der "fernen Zukunft" ergeben sich bei erheblich größerer Ergebnisbandbreite (15 bis 50 Tage) mehrheitlich Zunahmen.

Die Häufigkeitsverteilung der Andauerklassen der Schwellenwertunterschreitungen (Abbildung 27) deutet ebenfalls eine moderat positive Entwicklung für die nahe Zukunft an. Im Mittel zeigen die Abflussprojektionen in mehreren Andauerklassen eine leichte Abnahme der Unterschreitungsfälle. Für die ferne Zukunft sticht jedoch die erhebliche Zunahme der langen und damit für den Verkehrsträger besonders kritischen Schwellenwertunterschreitungen ins Auge. Demnach könnten innerhalb von 30 Jahren 6 Fälle mit sehr langen (≥ 50 Tage) Niedrigwasserphasen auftreten; jedoch ist der Unsicherheitsbereich sehr groß.

Mit Blick auf die Anzahl der Tage über dem **hohen Schwellenwert** FDC_Q01$_{1961\text{-}1990}$ (~ HSQ I, Abbildung 28) zeigt sich sowohl für die nahe als auch für die ferne Zukunft eine Zunahme der Anzahl der Tage gegenüber der Referenzsituation (rd. 4 Überschreitungstage = 1% von 365). Diese Änderung deckt sich mit den beobachteten Entwicklungen (schwarze Kurve in Abbildung 28).

Für die nahe Zukunft weist das Projektionsensemble meist 4 bis 8 Überschreitungstage pro Jahr und für die ferne Zukunft 5 bis 15 Tage aus. Die Gesamtanzahl der Tage (Abbildung 28) und die Andauer der Phasen über HSQ-I (Abbildung 29) bleibt trotz des Zuwachses deutlich hinter den Werten der GlQ-Unterschreitungstage zurück. Niedrigwassersituationen sind und bleiben somit für die Binnenschifffahrt und die Verlader relevanter als Hochwasserereignisse. Ergebnisse zu den Auswirkungen auf die genannten Sektoren finden sich in den Abschnitten 6.2.5 und 6.2.6.

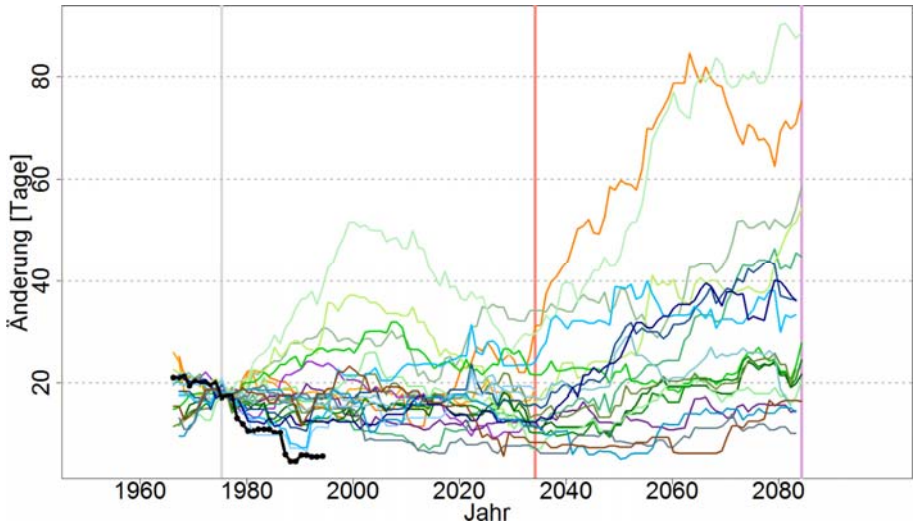

Abbildung 26: Änderungen der Anzahl von Unterschreitungstagen des niedrigen Abflussschwellenwertes FDC_Q95$_{1961-1990}$ (~ GLQ) in einem Wasserhaushaltsjahr am Pegel Kaub bei Vergleich der 31-jährig gleitenden Mittel beobachteter Abflüsse (schwarze Linie) und der Abflussprojektionen (bunte Linienschar). Farbig hervorgehoben sind die Mittelwerte der in diesem Bericht ausgewerteten Zeitscheiben 1961-1990 (grau, Referenz), 2021-2050 (rot) und 2071-2010 (violett).

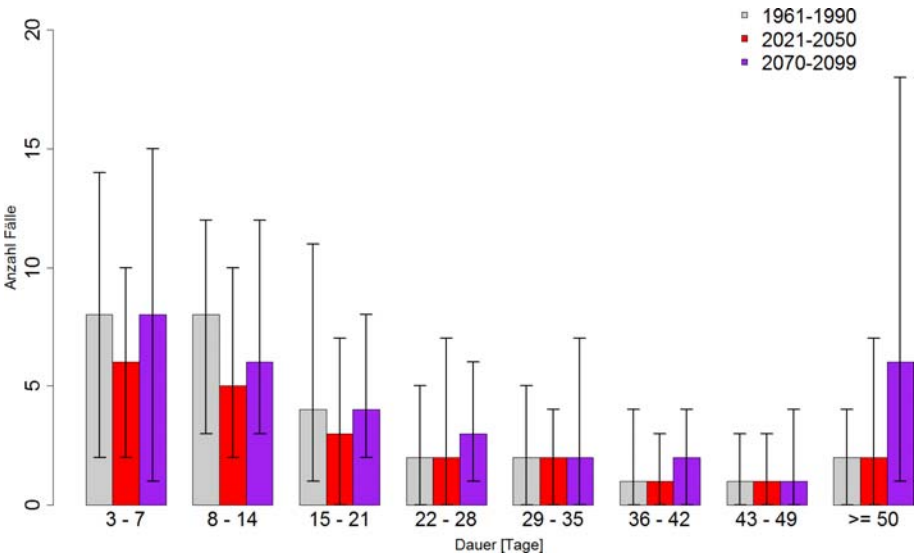

Abbildung 27: Änderungen in der Häufigkeitsverteilung der Andauerklassen von Unterschreitungstagen des niedrigen Abflussschwellenwertes FDC_Q95$_{1961-1990}$ (~ GLQ) in einem Wasserhaushaltsjahr am Pegel Kaub bei Vergleich der für das Ensemble von Abflussprojektionen berechneten 30-Jahresperioden 1961-1990, 2021-2050 und 2071-2100. Die Balkenhöhe zeigt den Mittelwert und die Fehlerbalken die Gesamtspanne (Minimum bis Maximum) des Ensembles.

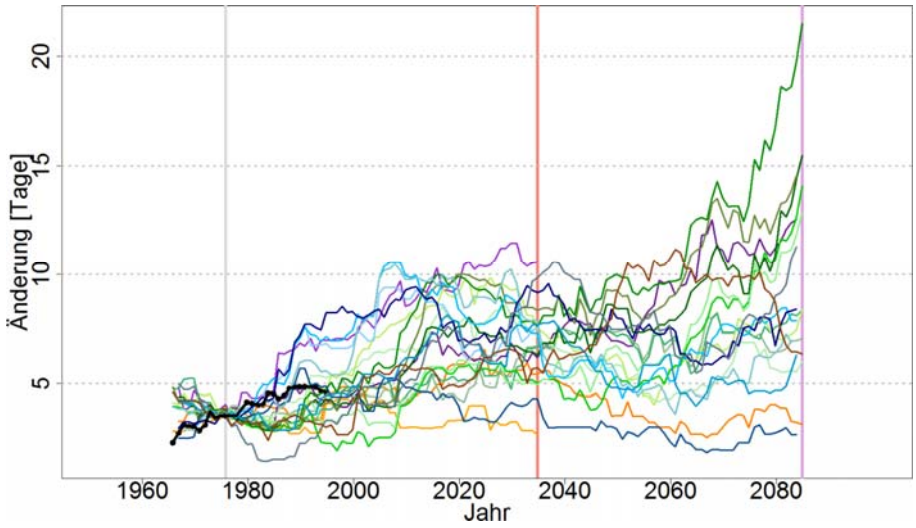

Abbildung 28: Änderungen der Anzahl von Überschreitungstagen des hohen Abflussschwellenwertes FDC_Q01$_{1961-1990}$ (~ HSQ I) in einem hydrologischen Jahr am Pegel Kaub. Darstellung wie Abbildung 26.

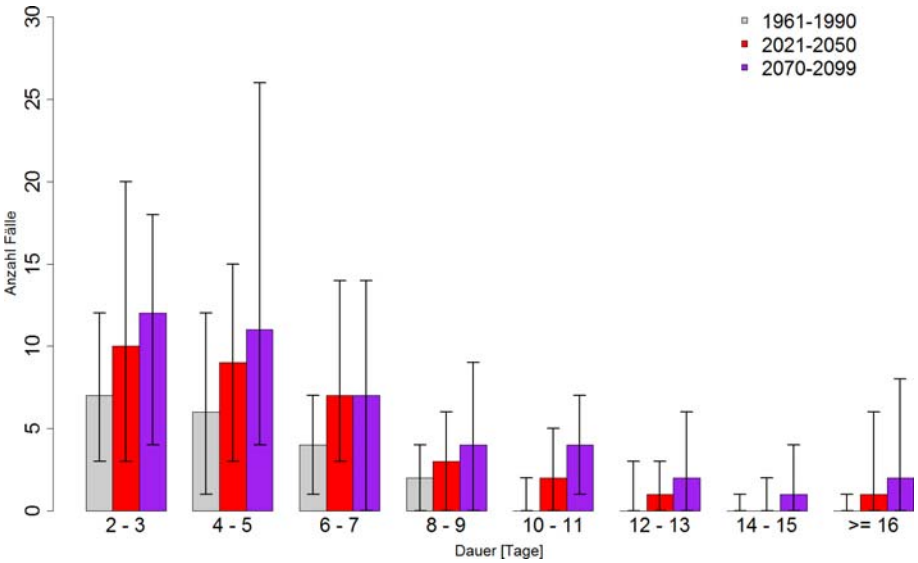

Abbildung 29: Änderungen in der Häufigkeitsverteilung der Andauerklassen von Überschreitungstagen des hohen Abflussschwellenwertes FDC_Q01$_{1961-1990}$ (~ HSQ I) in einem hydrologischen Jahr am Pegel Kaub. Darstellung wie Abbildung 27.

Elbe

Die langfristigen Änderungen der Anzahl von Tagen unter dem **niedrigen Abfluss-schwellenwert** FDC_Q95$_{1961-1990}$ sind in Abbildung 30 dargestellt. Eine eindeutige Zunahme der Unterschreitungstage ist demnach in der nahen Zukunft nicht zu verzeichnen. Es ergibt sich ein Wertebereich von durchschnittlich 8 bis 25 Tagen pro Jahr gegenüber rund 18 Tagen in der Referenzperiode. Die Beobachtung (schwarze Kurve in Abbildung 30) zeigt ebenfalls keine deutliche Änderung. Für die ferne Zukunft zeigt sich ein große Ergebnisbandbreite, wobei jedoch zwei Teilcluster zu Tage treten: Ein Teilcluster bleibt annähernd auf heutigem Niveau (10 bis 25 Tage), während ein anderes Teilcluster auf ein deutlich höheres Niveau springt (50 bis 60 Tage)[9].

Abbildung 31 klassifiziert die Schwellenwertunterschreitungen nach Andauerklassen. Für die nahe Zukunft zeigt sich keine nennenswerte Änderung, während die ferne Zukunft durch eine Zunahme in fast allen Andauerklassen geprägt ist.

Mit Blick auf die Überschreitung des **hohen Schwellenwertes** (Abbildung 32) ergibt sich für die hier fokussierten Zeitscheiben der nahen und der fernen Zukunft keine wesentliche Änderung gegenüber der Referenzsituation (4 Tage gegenüber 2 bis 5 Tagen) bzw. eine leichte Abnahme (1 bis 4 Tage). Entsprechende Änderungen gibt auch die nach Andauern klassifizierte Darstellung (Abbildung 33) wieder.

Dabei ist allerdings erneut auf die große multi-dekadische Variabilität der Hochwasserkennwerte an den Elbepegeln hinzuweisen (vgl. Abschnitt 6.2.2). So zeigt sich z.B. für die in Abbildung 32 zusätzlich markierten Zeitscheibe 2001-2030 (Zentrumsjahr 2015) in vielen Projektionen eine merklich höhere Anzahl von Überschreitungstagen als in der Referenzsituation (Bandbreite 4 bis 8 Tage). Wie am Rhein gilt jedoch auch an der Elbe, dass Niedrigwassersituationen aufgrund ihrer relativen langen Andauer für den Binnenschiffstransport relevanter sind als Hochwasserereignisse.

[9] Hier zeigt sich die Wirkung unterschiedlicher globaler Klimamodelle und Klimamodellrealisationen, die die Modellkette antreiben: Das untere Teilcluster wird primär durch BCM- und EH5r3-angetriebene Läufe gebildet, während das obere Teilcluster durch HADCM3, EH5r1 und EH5r2 angetrieben wird. Emissionsszenario ist in allen Fällen SRES A1B.

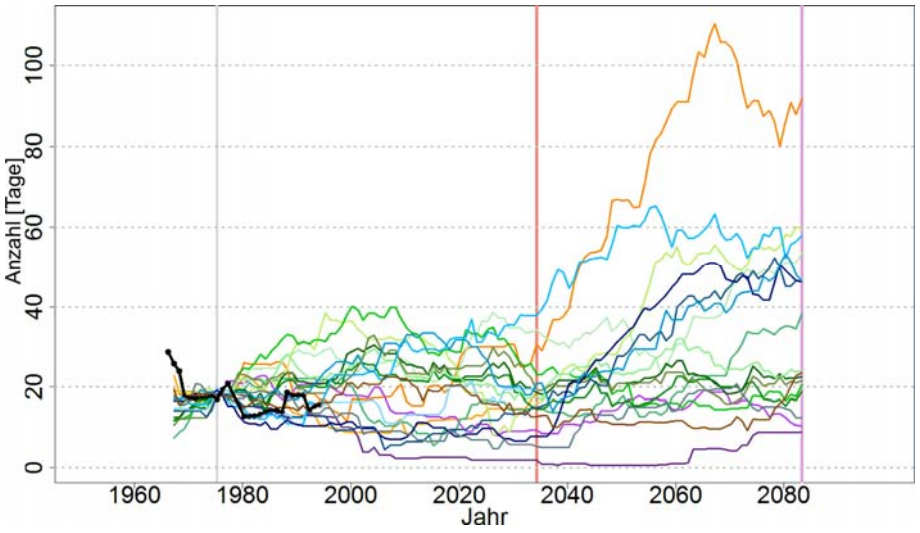

Abbildung 30: Änderungen der Anzahl von Unterschreitungstagen des niedrigen Abflussschwellenwertes FDC_Q95$_{1961-1990}$ (~ GLQ) in einem Wasserhaushaltsjahr am Pegel Barby bei Vergleich der 31-jährig gleitenden Mittel beobachteter Abflüsse (schwarze Linie) und der Abflussprojektionen (bunte Linienschar). Farbig hervorgehoben sind die Mittelwerte der in diesem Bericht ausgewerteten Zeitscheiben 1961-1990 (grau, Referenz), 2021-2050 (rot) und 2071-2010 (violett).

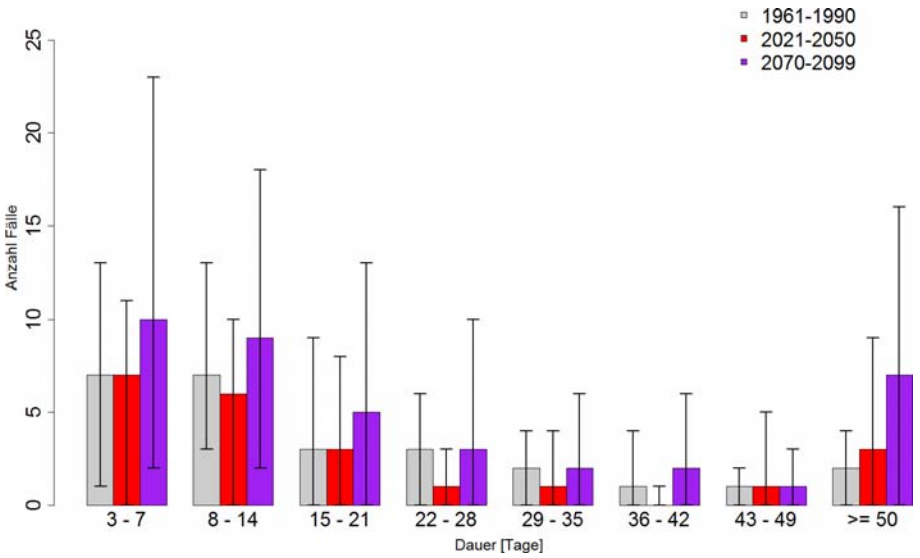

Abbildung 31: Änderungen in der Häufigkeitsverteilung der Andauerklassen von Unterschreitungstagen des niedrigen Abflussschwellenwertes FDC_Q95$_{1961-1990}$ (~ GLQ) in einem Wasserhaushaltsjahr am Pegel Barby bei Vergleich der für das Ensemble von Abflussprojektionen berechneten 30-Jahresperioden 1961-1990, 2021-2050 und 2071-2100. Die Balkenhöhe zeigt den Mittelwert und die Fehlerbalken die Gesamtspanne (Minimum bis Maximum) des Ensembles.

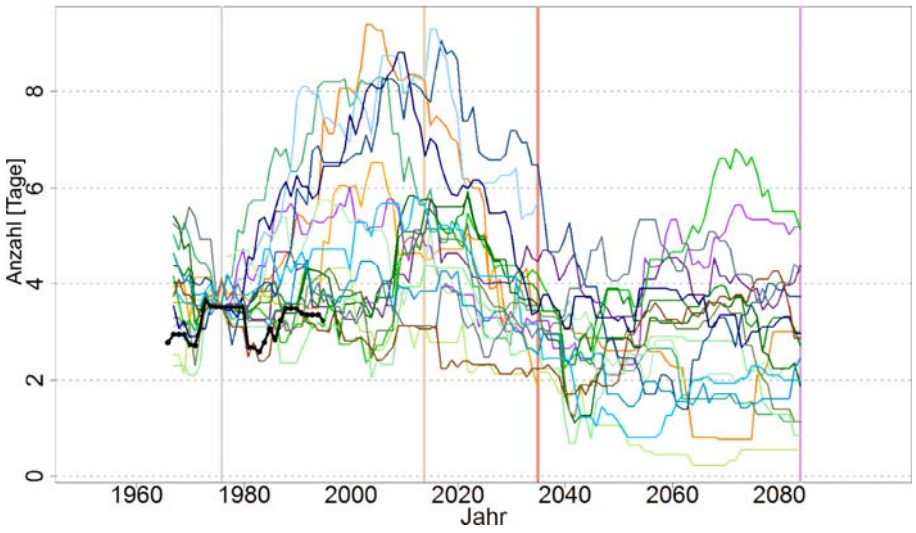

Abbildung 32: Änderungen der Anzahl von Überschreitungstagen des hohen Abflussschwellenwertes FDC_Q01$_{1961-1990}$ (~ HSQ) in einem hydrologischen Jahr am Pegel Barby. Darstellung wie Abbildung 30. Farbig hervorgehoben sind die Mittelwerte der in diesem Bericht ausgewerteten Zeitscheiben 1961-1990 (grau, Referenz), 2001-2030 (gelb), 2021-2050 (rot) und 2071-2010 (violett).

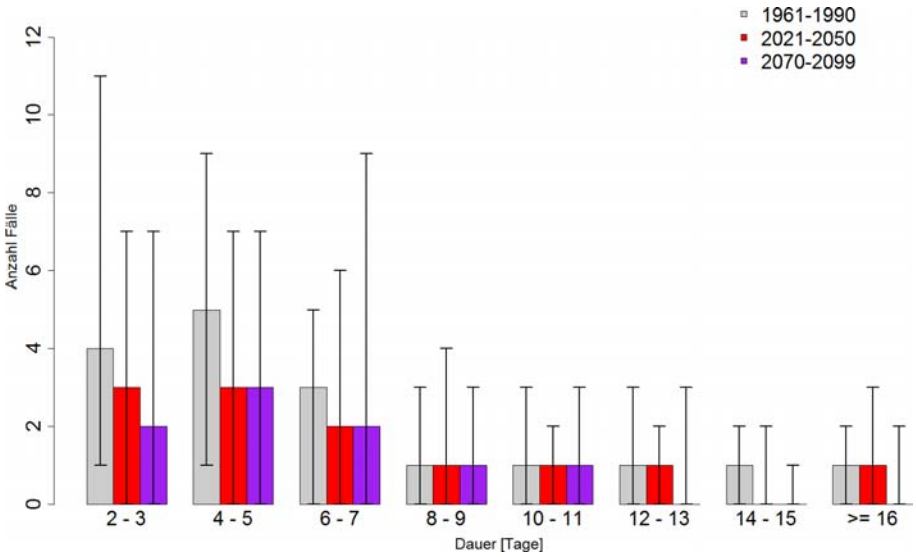

Abbildung 33: Änderungen in der Häufigkeitsverteilung der Andauerklassen von Überschreitungstagen des hohen Abflussschwellenwertes FDC_Q01$_{1961-1990}$ (~ HSQ) in einem hydrologischen Jahr am Pegel Barby. Darstellung wie Abbildung 31.

6.2.5 Auswirkungen und Anpassungsoptionen für die Binnenschifffahrt (Rhein)

Der Rhein ist die mit Abstand wichtigste Binnenschifffahrtsstraße in Europa (z.B. ZKR, 2013). In Deutschland entfallen rund 80% aller auf Binnenschifffahrtsstraßen transportierten Güter auf den Rhein (DESTATIS 1991-2012). Exemplarisch wurden die binnenschifffahrtsbezogenen Auswirkungen des Klimawandels daher für diesen Fluss vertieft untersucht. Im Folgenden wird dargestellt

(1) wie sich verschiedene **Abflussszenarien** über die verfügbare Abladetiefe und die Strömungsverhältnisse auf die schiffsseitig entstehenden Kosten des Binnenschiffstransportes auswirken und

(2) wie sich verschiedene **Anpassungsszenarien** unter diesen Bedingungen auf die Verwundbarkeit des Binnenschiffstransportes auswirken.

Die Auswahl der Abflussszenarien (bzw. der repräsentativen Simulationen) erfolgte mit Fokus auf das Sommerniedrigwasser am Mittelrhein (Pegel Kaub, vgl. Abschnitt 4.4), da hier der Schifffahrt mit nur 1.90 m die geringste Tiefe zu Verfügung steht. Die gewählten Szenarien geben aber auch einen wesentlichen Teil der Bandbreite projizierter Abflüsse in anderen Flussabschnitten wieder (z.B. am Niederrhein, Pegel Duisburg-Ruhrort, hier nicht dargestellt).

Abbildung 34 zeigt zunächst exemplarisch für zwei die Bandbreite charakterisierende Abflussszenarien die Entwicklung der **Stückkosten** für trockenes Massengut auf zwei unterschiedlichen Transportrelationen (hier nur Bergfahrt), gegliedert nach den auf diesen Relationen üblicherweise fahrenden Schiffstypen (Holtmann et al., 2011). Die Abflussszenarien wurden aus Schifffahrtssicht als "pessimistisch" bzw. "optimistisch" bezeichnet, da sie jeweils eine vergleichweise ungünstige bzw. günstige Entwicklung der Niedrigwasserabflüsse repräsentieren.

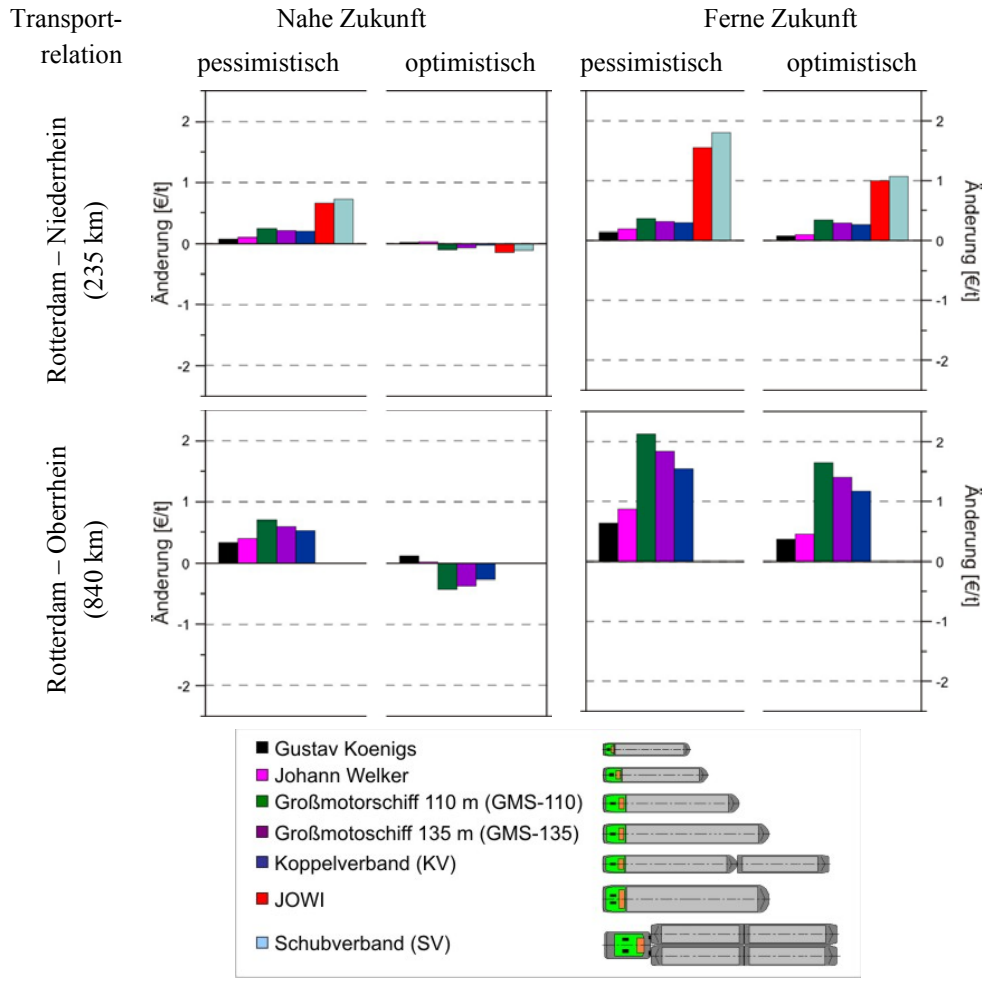

Abbildung 34: Änderungen der Stückkosten für trockenes Massengut auf dem Rhein für 2 Relationen (Bergfahrt), 7 verschiedene Schiffstypen unter der Annahme von zwei Abfluss-szenarien[10] für die nahe und ferne Zukunft im Vergleich zur Referenzsituation 1961-1990.

Für die nahe Zukunft ergeben sich demnach Stückkostenänderungen von -0.50 €/t bis +0.70 €/t je nach Schiffstyp, Relation und Szenario. Für die ferne Zukunft sind es 0.30 €/t bis 2.00 €/t. Dabei sind die größten Kostenzuwächse erwartungsgemäß bei den größeren und damit niedrigwassersensitiveren Schiffstypen festzustellen. Die prozentuale Bedeutung dieser Änderung hängt von den unterschiedlichen Transport-kostenniveaus auf den einzelnen Relationen und der dort eingesetzten Schiffstypen ab. So entspricht beispielsweise ein Kostenzuwachs von 0.70 €/t für den vor allem im Niederheinverkehr eingesetzten Schiffstyp JOWI einer Steigerung von rund 20%, da hier das Kostenniveau insgesamt niedriger ist. Für den Schiffstyp GMS-110 auf der Relation Rotterdam-Oberrhein ist der selbe Zuwachs hingegen gleichbedeutend mit einer prozentualen Steigerung von ca. 6%.

[10] Modellketten: B1_EH5r1_CCLM_LS_EPW_HBV_SOBEK-KLIWAS_KST und A1B_EH5r1_CCLM_LS_EPW_HBV_SOBEK-KLIWAS_KST

In einem weiteren Schritt wurde der mittlere jährliche **Gesamttransportkosten**effekt des Klimawandels ermittelt. Als Mengenszenario wurde dabei die Situation des Jahres 2000 für Transporte zwischen Rotterdam und den Häfen Duisburg-Ruhrort, Köln, Koblenz, Mainz, Mannheim bzw. Basel angenommen (vgl. 4.5.1).

Abbildung 35 zeigt Ergebnisse für die durch fünf ausgewählte Abflussszenarien abgedeckte Bandbreite an zukünftigen Fahrwassersituationen (vgl. **Tabelle 6**). Für die nahe Zukunft ergibt sich demnach in der Summe über alle sechs berücksichtigten Transportrelationen hinweg im optimistischen Fall eine Kostenreduktion gegenüber der Referenzsituation von rund 15 Mio. EUR/Jahr und im pessimistischen Fall eine Kostensteigerung von etwa 25 Mio. EUR/Jahr. Für die ferne Zukunft werden Kostensteigerungen von bis zu 60 Mio. EUR/Jahr simuliert. Dieser Wert entspricht etwa 9% der mittleren jährlichen Kosten[11] während der Referenzsituation.

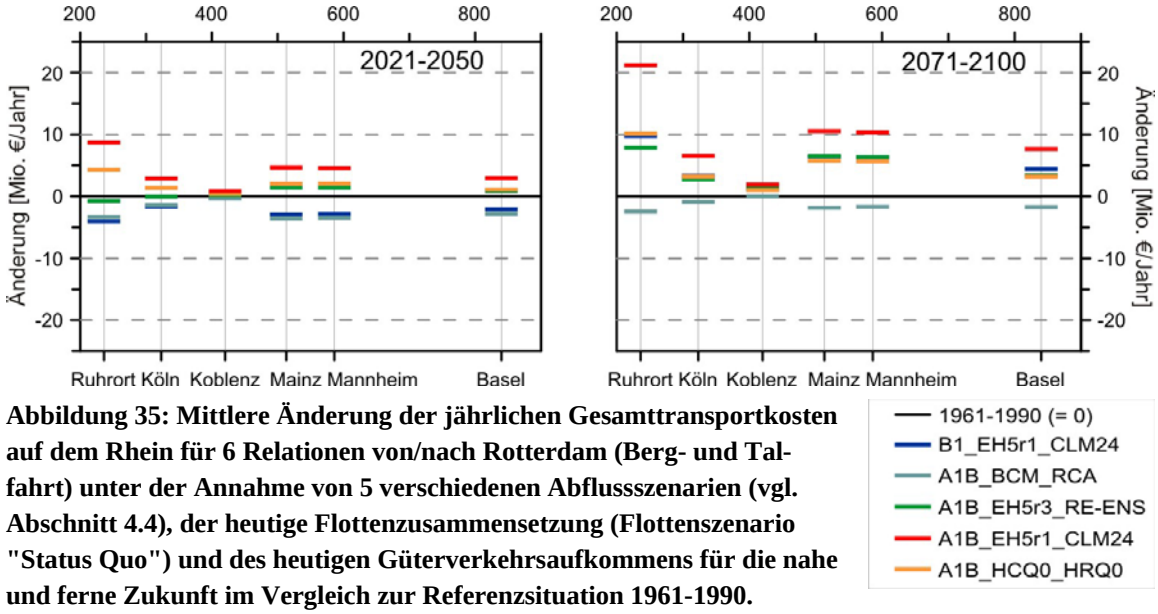

Abbildung 35: Mittlere Änderung der jährlichen Gesamttransportkosten auf dem Rhein für 6 Relationen von/nach Rotterdam (Berg- und Talfahrt) unter der Annahme von 5 verschiedenen Abflussszenarien (vgl. Abschnitt 4.4), der heutige Flottenzusammensetzung (Flottenszenario "Status Quo") und des heutigen Güterverkehrsaufkommens für die nahe und ferne Zukunft im Vergleich zur Referenzsituation 1961-1990.

Weiterhin wurden verschiedene **Anpassungsmaßnahmen** untersucht (Tabelle 13) mit der die Kostensteigerungen, die sich unter Annahme eines pessimistischen Szenarios ergeben, reduziert werden können. Der Maßnahmenkatalog ist nicht erschöpfend. Er folgt den in KLIWAS gesetzten Schwerpunkten (Schifffahrt, Wasserbau). Beim Zuschnitt der einzelnen Maßnahmen stand die – nach Expertenmeinung (vgl. Renner et al., 2014) - technische Machbarkeit im Vordergrund. Dieser Ansatz unterscheidet sich somit von Vorgehensweisen, die auf eine vollständige Kompensation von Klimawandeleffekten zielen (vgl. z.B. Abschnitt 6.2.6). Eine

[11] Dies sind in der Summe über alle berücksichtigten Relationen im Kontrolllauf C20_EH5r1_CCLM_LS_EPW_HBV_SOBEK-KLIWAS_KST etwa ~ 634 Mio. EUR/Jahr (unter Annahme der in Abbildung 7 dargestellten Stückkosten und Gütermengen).

Bewertung der Akzeptanz der Maßnahmen sowie eine volkswirtschaftliche Bewertung kann hier nicht vorgenommen werden. Ferner ist zu berücksichtigen, dass die Maßnahmen darauf zielen, die Sensitivität des Schiffstransportes zu reduzieren, und nicht, die transportierte Menge zu maximieren.

Die Wirkung der einzelnen Maßnahmen wurde hinsichtlich der Kostenstrukturen einzelner Schiffstypen bewertet (hier nicht dargestellt, s. Renner et al., 2014). Ferner wurden sie zu **Anpassungsszenarien** kombiniert und in ihrer Wirkung auf die Gesamtkosten quantifiziert. Die Anpassungsszenarien berücksichtigen jeweils eine oder mehrere der in Tabelle 13 genannten Anpassungsoptionen der Kategorien "Schiffstechnik", "Schiffsbetrieb", "Flottenstruktur" und "Flussbau". In Abbildung 36 ist die Wirkung von drei Anpassungsszenarien im Vergleich zur Situation ohne Anpassung dargestellt.

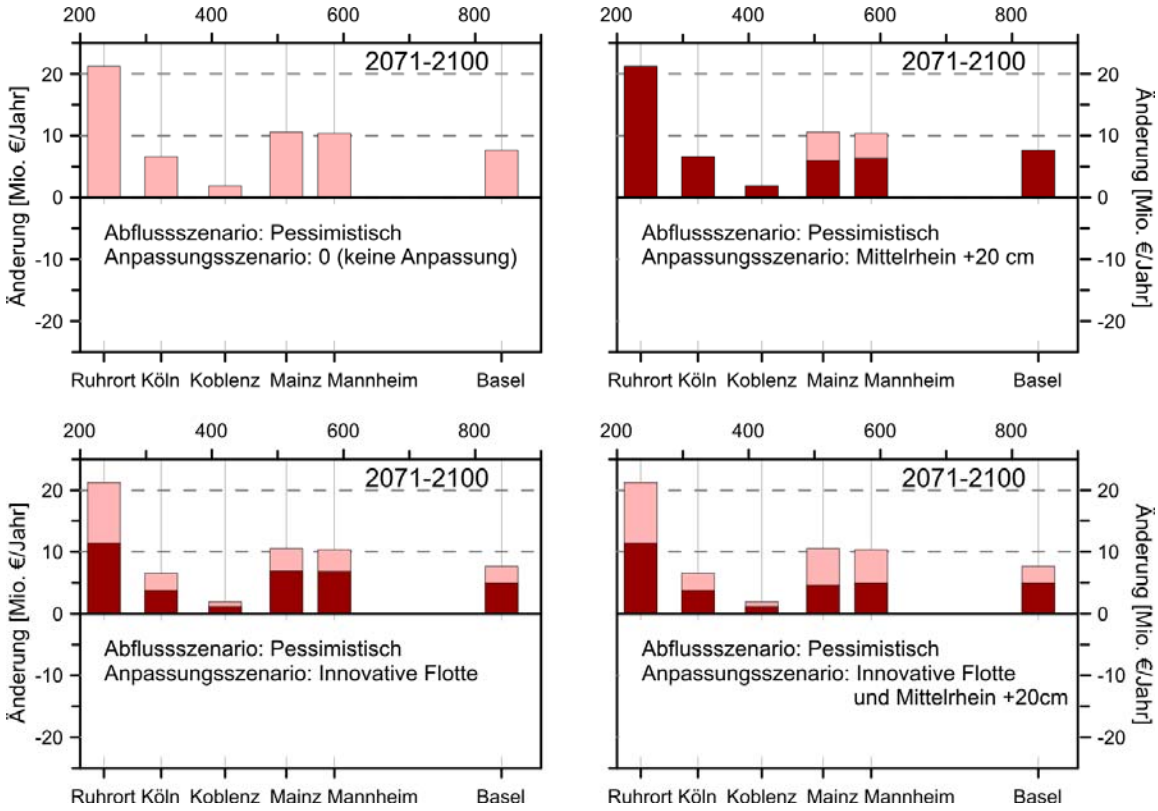

Abbildung 36: Mittlere Wirkung unterschiedlicher Anpassungsszenarien auf die Änderungen der jährlichen Gesamttransportkosten auf dem Rhein unter Annahme eines pessimistischen Szenarios (Modellkette: A1B_EH5r1_CCLM_LS_EPW_HBV_SOBEK-KLIWAS_KST, vgl. Abbildung 35).
Hellrot dargestellt sind jeweils die Kostenänderungen ohne Anpassung ("Anpassungsszenario 0"), dunkelrot die reduzierten Kostenänderungen mit verschiedenen Anpassungsszenarien.

Das Anpassungsszenario "Mittelrhein +20 cm" geht von einer zusätzlichen Tiefe im Bereich der derzeitigen Engstelle des Rheins aus (vgl. zu geeigneten wasserbaulichen Maßnahmen siehe Wurms et al., 2014). Diese Maßnahme wirkt sich vor allem auf die Transporte in den Main-Neckar Raum positiv aus. Hier kommt es zu einer Reduktion des durch den projizierten Klimawandel bedingten Kostenzuwachses um gut ein Drittel. Der Oberrheinverkehr profitiert kaum, da hier eine weiter oberstrom gelegene Engstelle zum Tragen kommt. Hier besteht also weiteres Anpassungspotential.

Ein weiteres Anpassungsszenario "Innovative Flotte" geht davon aus, dass alle vorteilhaften schiffs(-betriebs-)technischen Maßnahmen (vgl. Tabelle 13) für die gesamte heutige Flotte umgesetzt sind. Die höheren Anschaffungskosten der Schiffe werden in der Berechnung berücksichtigt. Diese Maßnahme wirkt sich auf allen Relationen positiv aus und bringt eine deutliche Reduktion des Kostenzuwachses mit sich.

Ebenfalls in Abbildung 36 dargestellt ist die kombinierte Wirkung der beiden vorgenannten Maßnahmen. Insgesamt kann eine Reduktion der durch den projizierten Klimawandel bedingten Kostenzuwächse um annähernd 50% erreicht werden.

Bei dieser Betrachtung werden mögliche positive Aspekte der ausgewählten, technisch grundsätzlich realisierbaren Maßnahmen deutlich. Allerdings sind vor einer konkreten Umsetzung viele weitere Aspekte zu berücksichtigen, die über die Aufgabenstellung von KLIWAS hinausgehen. So sind wasserbauliche Maßnahmen in ihrer Wirkung auf das Gesamtsystem zu bewerten. Ebenso ist die Umstellung der gesamten bestehenden Rheinflotte nur mit großem Aufwand und mit langer Vorlaufzeit zu erreichen.

6.2.6 Auswirkungen und Anpassungsoptionen für die verladende Wirtschaft (Rhein)

Hinsichtlich der Betroffenheit der verladenden Wirtschaft entlang des Rheins haben Untersuchungen von Scholten (2010) gezeigt, dass es im Transportverhalten verschiedener Branchen (Energie, Agrar, Chemie etc.) erhebliche Unterschiede gibt und somit kein allgemein gültiges empirisches Modell der Verwundbarkeit der Wirtschaft am Rhein aufgestellt werden kann. Auch innerhalb der Branchen differiert die Betroffenheit der einzelnen Unternehmen in Abhängigkeit von der eingesetzten Schiffsgröße, dem jeweiligen Modal Mix (Anteil des Schiffstransportes am Gesamttransport), dem Flussabschnitt und anderen lokalen Faktoren sehr. Es bietet sich daher an Unternehmen nach ihren Transportfaktoren anstatt nach Branchen zu gruppieren. Exemplarisch wird im Folgenden für Unternehmen der Energiebranche am Mittel- und Oberrhein dargestellt

(1) wie sich verschiedene **Fahrwasserszenarien** auf die Lagerhaltung der verladenden Wirtschaft auswirken und

(2) mit welchen **Anpassungsszenarien** die Auswirkungen kompensiert werden können.

Die Wahl der Fahrwasserszenarien erfolgte dabei wie in Abschnitt 6.2.5 dargestellt. Hinsichtlich der Anpassungsszenarien stand, anders als in Abschnitt 6.2.5, die vollständige Kompensation der Klimafolgen im Vordergrund. Fragen der Machbarkeit wurden qualitativ beurteilt.

Abbildung 37 stellt die Abweichungen von der "optimalen" (gegenwärtigen) Lagerhaltung für zwei Abflussszenarien für Unternehmen der Energiebranche am Mittel- und Oberrhein im Jahresgang dar. Demnach kann in der nahen Zukunft unter Annahme der heutigen Lagerkapazität und Schiffsflotte sowie eines optimistischen Szenarios (hinsichtlich der Abladung der Schiffe) die optimale Lagerhaltung fast ganzjährig erreicht werden. Unter Annahme eines pessimistischen Szenarios könnte die heutige Lagerhaltung ohne weitere Maßnahmen nicht in allen Monaten aufrechterhalten werden. In der fernen Zukunft werden die Abweichungen deutlicher. Hier wäre auch im "günstigen" Fall die heutige Lagerhaltung nicht ganzjährig erreichbar. Das pessimistische Szenario zeigt für den Monat November die größte Abweichung von -40% gegenüber der Referenzsituation.

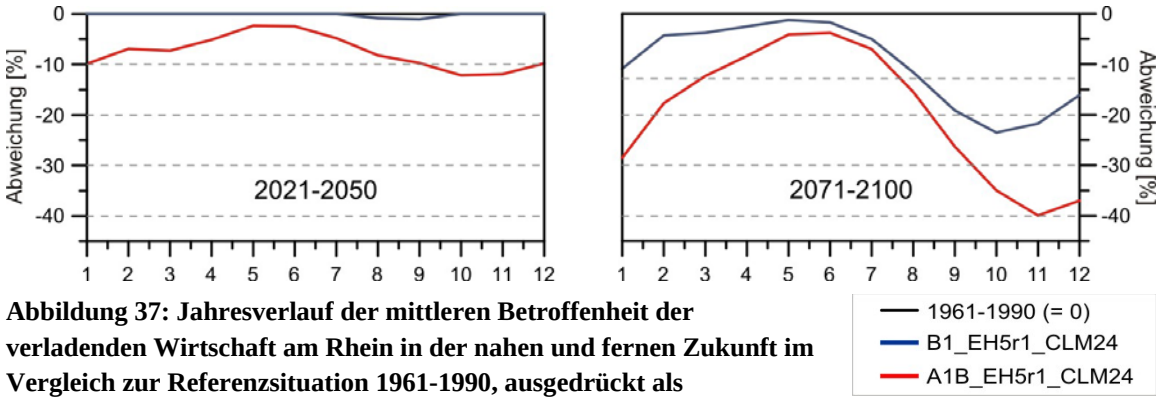

Abbildung 37: Jahresverlauf der mittleren Betroffenheit der verladenden Wirtschaft am Rhein in der nahen und fernen Zukunft im Vergleich zur Referenzsituation 1961-1990, ausgedrückt als Abweichung von der "optimalen" (gegenwärtigen) Lagerhaltung. Exemplarische Darstellung für die Energiebranche am Mittel- und Oberrhein auf Grundlage von 2 verschiedenen Abflussszenarien (vgl. Abschnitt 4.4) ohne Berücksichtigung von Anpassungsmaßnahmen.

Da das Abflussgeschehen in den frei fließenden Abschnitten des Rheins seit jeher Schwankungen entworfen ist, gibt es seitens der Verlader eine breite Palette bereits implementierter und in vergangenen Niedrigwasserphasen erprobter **Anpassungs-maßnahmen**. Hierzu gehört die Vergrößerung des Lagers (manchmal auch kurzfristig möglich, beispielsweise durch die Zwischenlagerung fertiger Produkte auf Wiesen oder in Häfen), die Verlagerung von Transporten auf andere Verkehrsträger, der Einsatz von zusätzlichen Schiffen und der Umstieg auf kleinere Schiffsgrößen, um nur einige zu nennen. Dabei sind bei allen Anpassungsmaßnahmen natürlich auch die entsprechenden Nachteile für den Verlader und weitere planerische Rahmenbedingungen zu berücksichtigen. So ergeben sich beispielsweise bei der Verlagerung des Transports auf andere Verkehrsträger nicht nur höhere Kosten und kleinere Packungsgrößen, sondern es besteht auch das Problem der geringen freien Kapazitäten

auf Straße und Schiene. Hinsichtlich zusätzlicher Lagerflächen sind ggf. Aspekte der Raumordnung und Bauleitplanung (Flächennutzungspläne bzw. Bebauungspläne) zu berücksichtigen.

Ausgehend von dem ungünstigsten Zukunftsszenario (Abbildung 37, ferne Zukunft, pessimistisches Szenario) sind in Abbildung 39 die Wirkungen unterschiedlicher Anpassungsmaßnahmen dargestellt. In diesem Beispiel verringert eine Vergrößerung der Lagerkapazität um 25% (gelbe Farbe in Abbildung 39) die Verwundbarkeit gegenüber ungünstigen Abladebedingungen erheblich. Die Lagerhaltung weicht im November nur noch um -15% statt -40% von der Referenzsituation ab, während über weite Teile des Jahres eine "optimale" Lagerhaltung erreicht werden kann. Noch deutlicher wirkt sich eine Reduktion des eingesetzten Schiffstyps[12] aus (blaue Farbe in Abbildung 39; Abweichungen bis zu -10% statt -40%). In Kombination (grüne Farbe in Abbildung 39) würden beide Maßnahmen die Bedingungen des pessimistischen Abflussszenarios vollständig kompensieren.

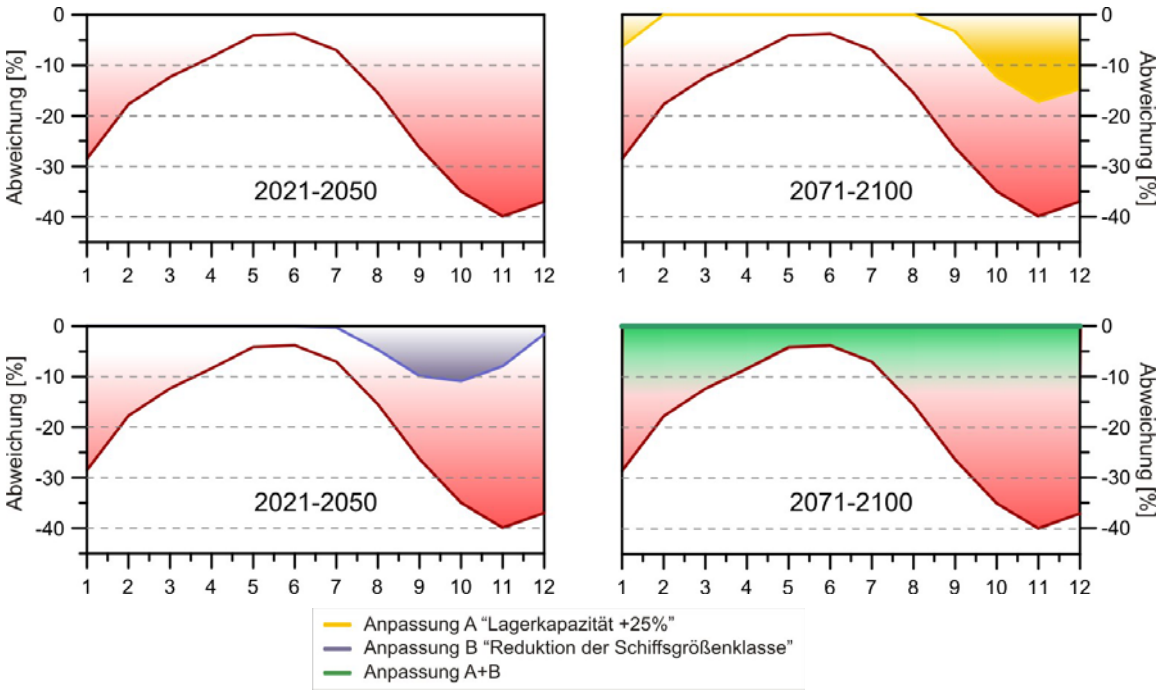

Abbildung 38: Mittlere Wirkung unterschiedlicher Anpassungsszenarien auf die Abweichungen von der "optimalen" (gegenwärtigen) Lagerhaltung (vgl. Abbildung 37). Exemplarische Darstellung für die Energiebranche am Mittel- und Oberrhein auf Grundlage eines pessimistischen Szenarios (Modellkette: A1B_EH5r1_CCLM_LS_EPW_HBV_SOBEK-KLIWAS_KST).
Hellrot dargestellt sind jeweils die Abweichungen ohne Anpassung ("Anpassungsszenario 0"), in den übrigen Farben die reduzierten Abweichungen mit verschiedenen Anpassungsszenarien.

[12] hier: Johann Welker statt GMS-110 bzw. GMS-110 statt GMS-135

6.3 Einschätzung zum Grad der Betroffenheit des Bundes (BMVI, BMUB, WSV)

Auf Grundlage der im vorigen Abschnitt vorgestellten Wertebereiche wird nun ein Versuch unternommen, die Betroffenheit der mit Wasserfragen befassten Geschäftsbereiche von BMVI und BMUB sowie weiterer Institutionen durch den Klimawandel nach Handlungsfeldern, Regionen und Zeithorizonten zu differenzieren. Hierzu werden auf auf Basis der Szenarienkorridore zunächst die zwei Kriterien "Signalstärke" und "Vertrauenswürdigkeit" gebildet, bevor deren Kombination zur Bildung eines Indikators für Handlungsbedarf herangezogen wird. Dabei ist "**Handlungsbedarf**" im vorliegenden Kontext gegeben, wenn unter der Prämisse, dass sich die Ziele des Verwaltungshandelns nicht verändern und die heutige Situation erhalten oder verbessert werden soll, einer bestimmten Kombination aus Handlungsfeld, Flussgebiet und Zeithorizont seitens der verantwortlichen Verwaltungseinheiten besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden muss. Hierzu gehört auch die vertiefte Sichtung und Bewertung von möglichen Betroffenheiten. Ob sich aus dem so definierten "Handlungsbedarf" dann tatsächlich auch ein "**Anpassungsbedarf**" ableiten wird, muss dann ggf. in weiteren Analyseschritten ermittelt werden.

Tabelle 11. erläutert zunächst die Klassen der verwendeten Kriterien "**Signalstärke**" und "**Vertrauenswürdigkeit**" (o, +, ++) in Abhängigkeit von den Randwerten und der Breite der Szenarienkorridore. Eine Signalstärke größer "o" ist nur gegeben, wenn der Szenarienkorridor wie in Abschnitt 4.2 (Seite 27) beschrieben eine Richtung aufweist (orange bzw. blaue Hinterlegung in Tabelle 8, Tabelle 9 und Tabelle 10). "Signalstärke" bezieht sich dann auf den für das jeweilige Handlungsfeld ungünstigsten Randwert des Szenarienkorridors, d.h. z.B. den unteren Rand bei Sensitivität gegenüber niedrigen Abflüssen bzw. den oberen Rand bei Sensitivität gegenüber hohen Abflüssen. Aus der Erfahrung vieler Diskussionen mit Interessenvertretern wurde hier die Grenze zwischen "+" und "++" auf den Betrag von 15 % festgesetzt.

"Vertrauenswürdigkeit" steht im Zusammenhang mit der Breite des Szenarienkorridors. Je breiter er ist, desto unschärfer ist das projizierte Zukunftsbild und desto geringeres Vertrauen wird dem Ergebnis geschenkt. Breiten über 30 % werden mit "o", Breiten unter 20 % mit "++" und alle dazwischen mit "+" klassifiziert.

"Handlungsbedarf" im oben genannten Sinn ist nun gegeben, wenn ein genügend deutliches und robustes Änderungssignal vorliegt. Dies wird festgestellt, wenn sich sowohl für die Kriterien "Signalstärke" als auch "Vertrauen" mindestens die Signatur "+" ergibt.

Das vorgestellte Schema ist ein Modell zur konsistenten Identifikation von "Handlungsbedarf". Die (subjektive) Wahl der Grenzen zwischen den Klassen bestimmt dabei die Identifikations-Empfindlichkeit.

Tabelle 11: Erläuterung der Symbole in Tabelle 12.

Kriterium	Symbol/Klasse	Bedingung/Bedeutung
Signalstärke[13]	++	Szenarienkorridor weist Richtung auf und Änderung > 15% (relevanter Randwert)
	+	Szenarienkorridor weist Richtung auf und Änderung ≤ 15% (relevanter Randwert)
	0	Szenarienkorridor weist keine Richtung auf
Vetrauen	++	Spanne der Szenarienkorridore meist ≤ 20%
	+	Spanne der Szenarienkorridore meist > 20% und ≤ 30%
	0	Spanne der Szenarienkorridore meist > 30% und/oder methodische Vorbehalte (in Tabelle 12 nicht besetzt)
Gebiet^{Abflussregime}	Rhein°/*, Elbe°/*, Donau°/*	° = Regen- und komplexe Abflussregime * = Schneeregime ohne Superskript = gesamtes Einzugsgebiet
Zeitraum	-	Derzeit kein Handlungsbedarf absehbar; Entwicklung jedoch beobachten.
	zeitnah	Änderung für die nächsten Jahrzehnte angezeigt; zeitnaher Handlungsbedarf
	ab 2050	Handlungsbedarf absehbar, wenn Emissionen weiter gemäß SRES A1B ansteigen.

In Tabelle 12 sind die so ermittelten Werte zusammengestellt. Die Kombinationen, für die sich ein Handlungsbedarf ableitet sind farblich hinterlegt. Die Darstellung fokussiert auf die Kompensation negativer Klimafolgen. Potentieller Handlungsbedarf, der sich aus positiven Entwicklungen ableitet z.B. höhere Niedrigwasserabflüsse, die für die nahe Zukunft am Rhein simuliert werden, ist nicht dargestellt. Ferner beschränkt sich die Analyse auf die ausgewählten Flussgebiete und Handlungsfelder, die in diesem Projekt adressiert wurden. Ein Anspruch auf Vollständigkeit und Verallgemeinerbarkeit wird nicht erhoben.

[13] Bei indifferenten Änderungssignalen (z.B. +/-15%) wird hier kein akuter Handlungsbedarf abgeleitet. Bei hochsensitiven und bereits heute verwundbaren Systemen kann jedoch auch schon eine Änderung von 15% und weniger relevant sein. Im Einzelfall sind daher die Ergebnisse in Abschnitt 6.2 zu Rate zu ziehen.

Tabelle 12: Ausgewählte Nutzungen/Funktionen im Bereich Wasserwirtschaft sowie diesbezüglicher Handlungsbedarf vor dem Hintergrund der in diesem Bericht dargelegten Auswirkungen des Klimawandels. Differenzierung nach Gebieten und Zeiträumen. Sofern kein Handlungsbedarf gesehen wird, ist dies durch ein "-" in der Spalte "Zeitraum" gekennzeichnet. Zum Begriff "Handlungsbedarf" s. Text, zur Symbolik s. Tabelle 11.

Nr.	Nutzungen/Funktionen mit Abhängigkeit von der/vom	Kennwert	Handlungsbedarf mit Blick auf		Bewertung der Information	
			Gebiet	Zeitraum	Signalstärke	Vertrauen
1	Wasserdargebot (z.B. Wassergewinnung)	MQ, hydrologisches Jahr (Nov-Okt.)	Rhein	-	0	+
			Elbe	ab 2050	++	+
			Donau	ab 2050	++	+
2	Sommerabfluss (z.B. Wasserbewirtschaftung)	MQ, hydrologischer Sommer (Mai-Okt.)	Rhein°	ab 2050	++	++
			Elbe	zeitnah	+	++
			Donau°	zeitnah	+	++
3	Mindestwassermenge (z.B. Durchgängigkeit, Schiffbarkeit)	NM7Q, Wasserhaushaltsjahr (Apr.-Mrz.)[14]	Rhein°	ab 2050	+	++
			Elbe	ab 2050	++	+
			Donau°	zeitnah	+	++
4	Mittlerer jährlicher Hochwasserabfluss (z.B. Sedimentmanagement, Schiffbarkeit)	HM5Q, hydrologisches Jahr (Nov-Okt.)[15]	Rhein°	zeitnah	+	++
			Elbe	zeitnah[16]	++	+
			Donau	-	0	+

Hinsichtlich einer Verminderung des mittleren **jährlichen Wasserdargebotes** lassen die Auswertungen für die nächsten Jahrzehnte in keinem untersuchten Einzugsgebiet zeitnahen Handlungsbedarf erkennen. Diese Thematik ist jedoch weiter zu beobachten und kann bei fortschreitender klimawandelbedinger Veränderung des Wasserhaushalts (gemäß SRES A1B) in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts vor allem für Elbe und Donau relevant werden. Früher sind ggf. Fragen der Wasserbewirtschaftung anzugehen, um Änderungen in der **jahreszeitlichen Wasserverteilung** im Elbeeinzugsgebiet und im Donaueinzugsgebiete oberhalb der Innmündung zu kompensieren. Für das Rheingebiet und die gegenwärtig schneedominierten Abflussregime der Donau zeichnet sich in dieser Hinsicht Handlungsbedarf für die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts ab. Für Nutzungen oder Funktionen, die gegenüber **Niedrigwassersituationen** sensitiv sind, ist angesichts der vorgestellten Ergebnisse lediglich im Donaueinzugsgsbiet oberhalb der Innmündung zeitnaher Handlungsbedarf angezeigt. An Rhein (unterhalb Maxau) und Elbe ist im weiteren Verlauf des Jahrhunderts (nach 2050) bei fortschreitendem Klimawandel Handlungsbedarf gegeben. Für **Hochwasser**-sensitive Nutzungungen oder Funktionen ergibt sich nach dem vorgestellten Auswertungsschema für den Rhein außerhalb des unmittelbaren Einflussbereichs der Alpen (unterstrom Maxau)

[14] Für Donau Kennwert NMoMQ: niedrigster Monatsabfluss innerhalb des Wasserhaushaltsjahres, vieljährig gemittelt.

[15] Für Donau Kennwert HMoMQ: höchster Monatsabfluss innerhalb des hydrologischen Jahres, vieljährig gemittelt.

[16] Abgeleitet aus Bezugsperiode 2001-2030; vgl. Abbildung 13 und zugehöriger Text.

zeitnaher Handlungsbedarf. Wie oben dargestellt zeigt das Ensemble der Simulationen jedoch auch im Elbegebiet ansteigende Werte, allerdings bereits in der Periode 2001-2030. Zum Handlungsbedarf gehört auch die detaillierte Untersuchung und Bewertung von Projektionen besonders seltener bzw. extremer Hochwasserereignisse (HQ_{50} und größer) unter veränderten Randbedingungen. Dabei sind weitere konzeptionelle und methodische Schritte erforderlich (Hochwasserschutzszenarien, Erweiterung der Datenbasis), die über den Umfang der vorliegenden Studie hinausgehen.

Dabei ist zu den Auswertungen anzumerken, dass die gewählte Methodik keine Aussagen zu extremen Hochwasserereignissen (HQ_{50}, HQ_{100} und größer) zulässt.

Ausgehend von den projizierten Änderungen des Abflussgeschehens ergibt sich hinsichtlich der **Schifffahrt** in der nahen Zukunft nur an der Donau oberhalb der Innmündung Handlungsbedarf (Einschränkungen durch Niedrigwasser). An den anderen Wasserstraßen wird zunächst kein über das heutige Maß hinausgehender Handlungsbedarf gesehen. Die Anzahl mehrwöchiger und damit für die verladende Wirtschaft hoch relevanter Niedrigwasserphasen nimmt jedoch gegen Ende des 21. Jahrhunderts zu. Ausgehend von einem ungünstigen Szenario errechnen sich für diese Zeit klimabedingte Steigerungen der **Schiffsbetriebskosten auf dem Rhein** von rund 9% gegenüber der Gegenwart.

6.4 Mögliche Anpassungsoptionen und Handlungsempfehlungen

Für die in Abschnitt 6.3 genannten Aspekte des Wassermengen-, Niedrig- und Hochwassermanagements sind viele **Anpassungsoptionen** schon bekannt, seit langem gängige Praxis und werden daher hier nicht in Gänze dargestellt. Kategorien sind z.B. politische und verwaltungstechnische Maßnahmen (Strukturpolitik, Raumplanung, interinstitutionelle und internationale Zusammenarbeit etc.) oder ingenieurtechnische Maßnahmen (Wassereinsparungsmaßnahmen, Talsperren, Überleitungen, Deiche, Polder, Stromregelung etc.). Einen umfangreichen Maßnahmenkatalog, der in wesentlichen Teilen auch auf die hier betrachteten Aspekte und Flussgebiete übertragbar ist, hat die Internationale Kommission zum Schutz der Donau unlängst zusammengestellt (ICDPR, 2012).

Konkreter Anpassungsbedarf ergibt sich dann, wenn die bereits implementierten Verfahrensweisen und Maßnahmen unter den ermittelten zukünftigen Bedingungen überfordert sind. Vor diesem Hintergrund sind folgende generellen **Handlungsempfehlungen** und Schritte zu formulieren:

1) Interinstitutionelle Einigung auf **kohärente Szenarien**. "Kohärent" bezieht sich hier auf verschiedene Nutzungen, Funktionen und Stromgebiete.
2) Definition von Zielen; zunächst sektorweise, dann sektorübergreifend. Welcher Zustand ist anzustreben? Wie "klimasicher" soll welcher Bereich sein?

3) Vor dem Hintergrund der Ziele (vgl. 2) ist eine **Prüfung der vorhandenen Strukturen** (technisch, operativ, …) auf vorhandene "Pufferkapazitäten" oder Defizite unter Verwendung der Szenarien (vgl. 1) bzw. der repräsentativen Simulationen durchzuführen.
4) Ggf. Überarbeitung, Erweiterung oder Neuschaffung von Strukturen mit den vorhandenen **Planungswerkzeugen**.
5) Entscheidung über Maßnahme unter Berücksichtigung von **Machbarkeit und Akzeptanz**.

Die hier vorgestellten Szenarienkorridore stellen eine Grundlage für Punkt (1) dar, sofern über das in KLIWAS 4.01 gewählte Vorgehen ein institutionsübergreifendes Einvernehmen erzielt werden kann. Dies ist im Rheineinzugsgebiet im Rahmen des KHR-Projektes Rheinblick2050 (Görgen et al., 2010) und der anschließenden Abstimmung in der Expertengruppe "KLIMA" der IKSR (IKSR, 2011) erfolgt.

Die Definition von Zielen (2) konnte im Projekt nur hypothetisch erfolgen. Im Grundsatz wurde von einem Szenario "Business as Usual" ausgegangen ("Ziele des Verwaltungshandelns bleiben unverändert." "Heutiger Zustand soll erhalten werden.", vgl. Abschnitte 1 und 6.3).

Eine Überprüfung aller im Rhein-, Elbe- und oberen Donaueinzugsgebiet vorhandenen Bau- und Regelwerke (3) kann nicht Gegenstand eines einzelnen Projektes bzw. einer einzelnen Behörde sein, sondern ist ebenfalls eine institutionsübergreifende Aufgabe. In diesem Sinne wurde aus dem Projekt heraus z.B. an Leitlinien mitgearbeitet, die auf die bessere Berücksichtigung des Klimawandels bei der Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie zielen (EC, 2009). Ferner wurden die aktuelle Rheinflotte und aktuelle logistische Abläufe unter Annahme verschiedener Abflussszenarien simuliert, um zu der Prüfung der Puffer- und Anpassungskapazitäten beizutragen.

Bzgl. (4) wurden zahlreiche innovative Anpassungsoptionen modellhaft umgesetzt (s. Zusammenstellung in Tabelle 13) und weitere Optionen qualitativ bewertet (z.B. Scholten, 2010). Dabei wurde teils bei der **technischen Machbarkeit** von Maßnahmen angesetzt und bewertet, in welchem Umfang durch eine potentiell realisierbare Maßnahme die Betroffenheit reduziert werden kann (z.B. Schiffstechnik und -betrieb, Abschnitt 6.2.5). Teils wurde – unabhängig von der Machbarkeit - ermittelt, welchen Umfang eine Maßnahme haben muss, um den projizierten Effekt des Klimawandels vollständig zu kompensieren (z.B. Logistik, Abschnitt 6.2.6). Im Sinne einer Maximalabschätzung wurden ausgehend von einem ungünstigen Szenario für die ferne Zukunft (nach 2050) Steigerungen der **Schiffsbetriebskosten auf dem Rhein** aufgrund des Klimawandels von 9% gegenüber der Gegenwart errechnet. Die hier analysierten Anpassungsszenarien konnten in Kombination diesen Klimawandeleffekt zur Hälfte kompensieren (vgl. 6.2.5).

Welche Maßnahme und Maßnahmenkonstellation tatsächlich realisiert wird, in welchem Umfang dies geschieht und welchem Entscheidungsweg gefolgt wird, hängt letztlich vom gesellschaftlichen Wertesystem ab. In Abwägung von Sicherheitsbedürfnis, materiellen Ressourcen, Machbarkeit und Priorisierung aller Politikfelder ist hier auf politischer Ebene ein Konsens zu finden. Aufgrund der langen Vorlaufzeit einiger Anpassungsoptionen wird jedoch empfohlen, zeitnah eine Prüfung und fachliche Diskussion der genannten Anpassungsoptionen mit den zu beteiligenden Institutionen anzustoßen.

Tabelle 13: Übersicht der in KLIWAS 4.01 modellhaft umgesetzten Anpassungsoptionen.

Option	Kategorie	Maßnahme	Effekt ausgedrückt in
0	Nullvariante	Status Quo, keine Anpassung	-
1	Schiffstechnik	höherfester Stahl	Stückkosten [€/t]
2	Schiffstechnik	dieselelektrischer Antrieb mit Mehrschraubenanlage	Stückkosten [€/t]
3	Schiffstechnik	dynamische Tunnelschürze	Stückkosten [€/t]
4	Schiffstechnik	Reduzierung des maximalen Tiefgangs	Stückkosten [€/t]
5	Schiffstechnik	"Optimiertes Schiff" (Kombination der Option 1 bis 4)	Stückkosten [€/t]
6	Schiffsbetrieb	Kleine Schiffe als Koppelverband	Stückkosten [€/t]
7	Schiffsbetrieb	Kleine Schiffe im Continuebetrieb	Stückkosten [€/t]
8	Schiffsbetrieb	Reduziertes Flottwasser	Stückkosten [€/t]
9	Flottenstruktur	Trend zu großen Schiffen	Gesamtkosten [Mio. €/Jahr]
10	Flottenstruktur	Trend zu kleinen Schiffen	Gesamtkosten [Mio. €/Jahr]
11	Flottenstruktur	Starker Trend zu kleinen Schiffen	Gesamtkosten [Mio. €/Jahr]
12	Flottenstruktur	Innovative Flotte (fast alle Schiffe optimiert[17], vgl. Option 5)	Gesamtkosten [Mio. €/Jahr]
13	Verladende Wirtschaft	Änderung der Lagerkapazitäten	% Abweichung von der optimalen Lagerhaltung
14	Verladende Wirtschaft	Reduktion der eingesetzten Schiffsgrößenklasse	% Abweichung von der optimalen Lagerhaltung
15	Flussbau	Mittelrhein + 20 cm	Gesamtkosten [Mio. €/Jahr]

[17] Der kleinste Schiffstyp (Gustav Königs) wurde nicht optimiert.

7 Diskussion und Ausblick

Das KLIWAS-Projekt 4.01 hat den Kenntnisstand der europäischen Klimaforschung im Jahr 2012 mit Blick auf mögliche Folgen für das Abflussgeschehen wichtiger Flüsse in Mitteleuropa umfassend abgebildet. Beiträge zu einer transparenten Kommunikation der bestehenden Unsicherheiten von Klimaprojektionen wurden geleistet und Implikationen für ausgewählte Wirtschaftssektoren unter Berücksichtigung verschiedener Anpassungsoptionen monetarisiert.

So ist es gelungen, Einzelergebnisse, die für verschiedene Teileinzugsgebiete vorlagen und auf unterschiedlichen Datengrundlagen basierten in einen Gesamtrahmen einzuordnen und Unterschiede darzustellen. Dies ist exemplarisch für Rhein, Elbe und obere Donau in Abbildung 39, Abbildung 40 bzw. Abbildung 41 dargestellt[18].

Es zeigt sich, dass sich einige der publizierten Szenarien, die die für die Binnenschifffahrtsstraßen relevante Frage eines Abflussrückgangs aufgeworfen haben (vgl. Abschnitt 3), am "trockenen Ende" des in KLIWAS generierten Ensembles befinden (z.B. Conradt et al., 2012; GLOWA-Danube, 2010), während andere innerhalb des in KLIWAS erarbeiteten Wertebereichs liegen (z.B. Vellinga et al., 2009; Hanel et al., 2012). Diese Einordnung soll zunächst Transparenz über den bislang erzielten Kenntnisstand herstellen und so zu einer Versachlichung der Diskussion um mögliche Klimafolgen beitragen. Die Ergebnisse zeigen, dass ein ständiger wissenschaftlicher Diskurs erforderlich ist, um

- die Vorzüge und Nachteile der verschieden Verfahren systematisch zu benennen,
- bestehende Unterschiede zu erklären sowie
- Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen aufzuzeigen.

[18] Dabei ist darauf hinzuweisen, dass das in Abbildung 39, Abbildung 40 bzw. Abbildung 41 dargestellte Projektions-Ensemble nicht exakt der in diesem Schlussbericht letztlich gewählten Zusammenstellung entspricht. So wurden für den Rhein in Anlehnung an das KHR-Projekt Rheinblick2050 (Görgen et al., 2010) weitere Emissionsszenarien zugelassen (übrigens ohne nennenswerte Auswirkung auf die oben genannten Änderungssignale). Für die Elbe ist ein früherer Bearbeitungsstand dargestellt, so dass einzelne der hier aufgeführten Projektionen fehlen (vgl. Lingemann et al., 2012) und für die Donau wurde im Rahmen einer Zuarbeit für die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung ein Delta-Change-Ansatz sowie ein anderer Bezugszeitraum verwendet (Klein et al., 2012b).

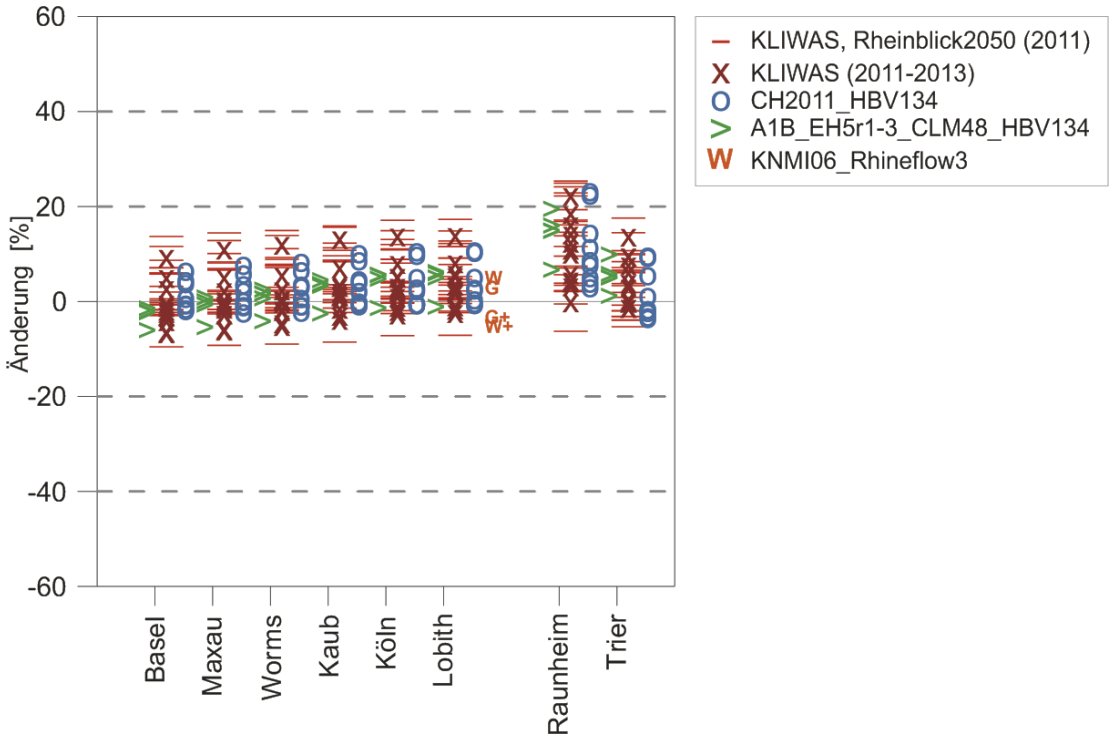

Abbildung 39: Änderung des mittleren Jahresabflusses im Rheineinzugsgebiet in der nahen Zukunft. Exemplarischer Vergleich von KLIWAS-Ergebnissen mit Ergebnissen anderer Projekte nach Moser (2013, ergänzt).
Schweizer Klimaszenarien (CH2011) nach (Appenzeller et al., 2011), niederländische Klimaszenarien (KNMI06) nach van den Hurk et al. (2006) und Vellinga et al. (2009). Weitere Datenquellen zitiert bei Nilson et al. (2015).

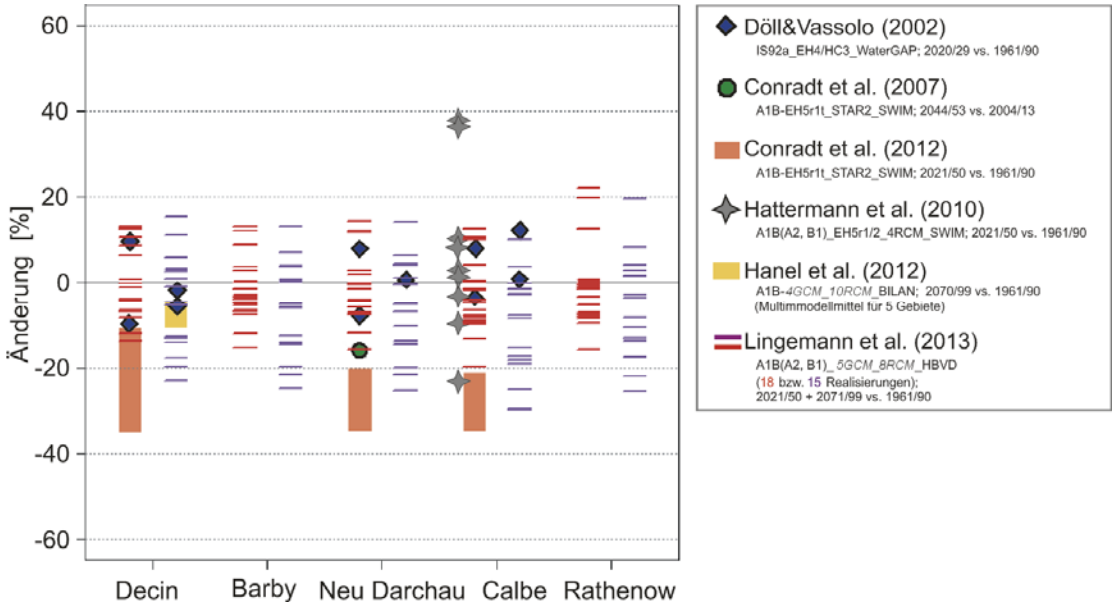

Abbildung 40: Änderung des mittleren Jahresabflusses im Elbeeinzugsgebiet in der nahen und fernen Zukunft. Exemplarischer Vergleich von KLIWAS-Ergebnissen (hier: Lingemann et al., 2013) mit anderen der Literatur entnommenen Ergebnissen.

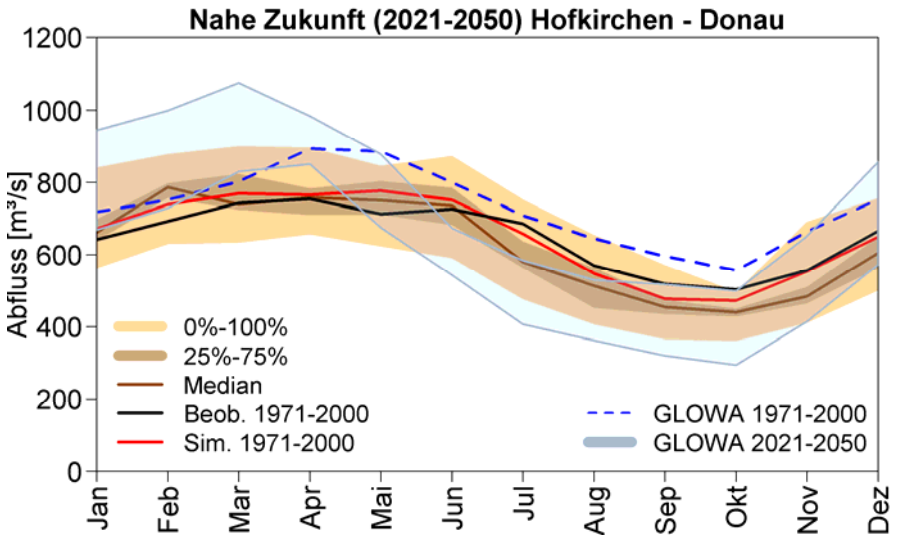

Abbildung 41: Mittlerer Jahresgang des Abflusses (MoMQ) am Pegel Hofkirchen (obere Donau) in der nahen Zukunft. Exemplarischer Vergleich von KLIWAS-Ergebnissen mit den Ergebnissen von GLOWA-Danube (2010) nach Klein et al. (2012b).
Dargestellt ist die Spannweite von 20 KLIWAS-Abflussprojektionen (Ockertöne) und 16 GLOWA-Danube-Abflussszenarien (Blautöne).

Aus den in KLIWAS 4.01 durchgeführten Arbeiten haben sich verschiedene Fragen ergeben, die einer weiteren vertieften Betrachtung bedürfen.

- **Subjektive Komponenten in der Modellkette**: An verschiedenen Punkten entlang der Modellkette werden oft aus Gründen knapper Ressourcen pragmatische Entscheidungen getroffen (oder Konventionen eingehalten), die das Ergebnis beeinflussen, für die es z.T. aber keine objektive Begründung gibt. Hierzu gehört z.B. die Wahl von 30-jährigen Zeiträumen (hier: 1961-1990; 2021-2050; 2071-2100) für die Beschreibung des Klimas oder auch die Wahl der aneinander gekoppelten Emissionsszenarien, globalen und regionalen Klimamodelle sowie Biaskorrekturverfahren und Wasserhaushaltsmodelle.
  So werden die GCM ECHAM5 (EH5) und HADCM3 (HC) in Verbindung mit dem Emissionsszenario SRES A1B weitaus häufiger für Mitteleuropa regionalisiert als andere GCM und SRES. Die Charakteristika von EH5 und HC dominieren somit das derzeitige Ensemble regionaler Klimaprojektionen, weshalb die Möglichkeiten einer systematischen Unsicherheitsanalyse und einer Zuordnung der bestehenden Unsicherheiten zu verschiedenen Quellen eingeschränkt sind. Diese Situation ist wird sich mit dem im Zuge des jüngsten 5. IPCC Sachstandsberichts aufgebauten Modellensembles (CMIP5, EURO-CORDEX) zwar verbessern, aber nicht grundlegend ändern. Um den Informationsgehalt der Ensemble-Ergebnisse besser zu erschließen, sind spezifische statistische Verfahren zu erarbeiten und/oder anzuwenden. In diesem Sinne verwendeten z.B. Bosshard et al. (2012) eine Varianzanalyse (ANOVA) in Verbindung mit einem Sampling-Verfahren um Wechselwirkungen verschiedener Unsicherheitsquellen in Projekti-

onen des Abflusses im Alpenrheingebiet trotz des beschriebenen, unausgewogenen Ensembles zu bewerten.

- **Hydrologisches Multimodell-Ensemble**: Diese Studie fokussierte auf die Unsicherheiten der Klimamodelle, soweit sie anhand des derzeit verfügbaren Multimodellensembles bestimmbar sind. Weitere Unsicherheiten können aus der hydrologischen Modellierung (u.a. aus der Verdunstungsberechnung) resultieren, die mit einem hydrologischen Multimodell transparent zu machen und genauer zu analysieren sind. Dieser Aspekt wurde zwar exemplarisch für den Rhein (Beitrag von C. Perrin in Nilson et al., 2010c: 68ff.[19]) und Teileinzugsgebiete der Elbe bearbeitet (Pfützner et al., 2013)[20], jedoch steht eine umfassende mitteleuropaweite Analyse noch aus.
- **Berücksichtigung der Wasserbewirtschaftung**: In dieser Studie wurden anthropogene Eingriffe in den Wasserhaushalt bewusst weitgehend ausgeblendet, um die Wirkungen des Klimawandels auf den natürlichen Wasserhaushalt isoliert betrachten zu können. Jedoch bewirkt die Bewirtschaftung des Wasserdargebotes in einigen Gebieten bereits heute eine deutliche Anpassung des Abflussgeschehens (vgl. z.B. Merz et al., 2012). Diese Eingriffe wurden exemplarisch für die obere Donau (vgl. Klein et al., 2015) und das Spree/Havel-Gebiet (Ebner-von-Eschenbach et al., 2013) analysiert; im letzteren Fall in Verbindung mit ausgewählten Wasserbewirtschaftungsszenarien. Hinsichtlich der Ursachenforschung bei der Erklärung beobachteter Veränderungen des Abflussgeschehens und der Anpassung an mögliche zukünftige Veränderung ist es sehr erstrebenswert, die hydrologischen Modellinstrumentarien derart weiterzuentwickeln dass existierende und mögliche zukünftige Bewirtschaftungsmaßnahmen nach Belieben zu- und abgeschaltet werden können.
- **Verkehrsträgerübergreifende Arbeiten**: In KLIWAS wurde ein Vorgehenskonzept erarbeitet, mit dem Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserstraßen umrissen werden können. Auch für andere Verkehrsträger liegen derartige Informationen vor. Um zu einem kohärenten Bild der Betroffenheit der Verkehrsinfrastruktur zu kommen, gilt es verkehrsträgerübergreifend gemeinsame Szenarien zu erarbeiten.
- **Extremwerte**: Die Verfahren zur Ableitung von Änderungssignalen bzgl. extremer und damit seltener Ereignisse (Hoch- und Niedrigwasser) aus den Simulationen sind noch weiter auszuarbeiten. Angesichts eines begrenzten Umfangs an Beobachtungen ist die Bewertung und ggf. Korrektur von Modellen hinsichtlich der Reproduktion extremer hydrometeorologischer und hydrologischer Situationen

[19] Berücksichtigt werden 18 verschiedene Klimamodellketten, 4 verschiedene hydrologische Modelle (lumped) und 13 verschiedene Parameter-Sets an 4 Rheinpegeln.

[20] Berücksichtigt werden 2 verschiedene Klimamodellketten, 3 verschiedene Ansätze zur Berechnung der potentiellen Verdunstung, 1 hydrologisches Modell für die Einzugsgebiete von Milde, Biese und Uchte (Zuflüsse der Aaland, untere Elbe).

erschwert. Auch sind die simulierten Zeiträume (30 bis 150 Jahre) zu kurz um Aussagen zu Ereignissen hoher Jährlichkeit (z.B. HQ_{50}, HQ_{100}, HQ_{1000}) zu erlauben. Verschiedene Verfahren wurden erprobt, um diese oft nachgefragten Informationen liefern zu können (z.B. durch J. Beersma in Nilson et al., 2010c: 62ff.)[21]. Ein etabliertes Verfahren gibt es jedoch bislang nicht.

- **Monetarisierung von Klimafolgen**: Die Auswirkungen des Klimawandels werden üblicherweise in meteorologischen oder - wie in dieser Studie - hydrologischen Kenngrößen ausgedrückt (z.B. NM7Q). Diese Angaben sind jedoch in die betriebs- und volkswirtschaftliche Planung i.d.R. nicht ohne weiteres zu integrieren und in Zusammenhang mit möglichen Anpassungskosten nicht einfach zu interpretieren.
  Es hat sich im Dialog mit verschiedenen Entscheidungsträgern gezeigt, dass eine Monetarisierung von Klimafolgen (Ausdruck z.B. mittlere Kosten, €/Jahr) hilfreich ist. Im Projektrahmen wurde dies am Beispiel der Betriebskosten der Rheinflotte (vgl. Abschnitt 6.2.5) sowie exemplarisch für die Pumpkosten im Nordwestdeutschen Kanalsystem (Ebner von Eschenbach et al., 2012) umgesetzt. Die Ansätze sind weiter auszuarbeiten bzw. anzuwenden und für andere Sektoren zu ergänzen.
- **Detaillierte Untersuchung einzelner Anpassungsmaßnahmen**: Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Anpassungs- und Handlungsoptionen benannt und teilweise in ihrer Wirkung auf den Binnenschiffstransport analysiert. Bei dieser Betrachtung wurden mögliche positive Aspekte der ausgewählten Maßnahmen deutlich. In weiteren Schritten ist jedoch zu prüfen, in welchen Umfang und in welcher Kombination die Optionen konkret umsetzbar sind und welche Wechselwirkungen auftreten. Hier sind neben rein technischen Aspekten auch alle weiteren Aspekte einer Maßnahmenplanung zu berücksichtigen.

[21] Am Beispiel des Rheins wurde ein Resampling-Verfahren in Kombination mit mehreren Biaskorrekturverfahren verwendet, um ausgehend von 8 verschiedenen Klimamodellketten Datenkollektive von je 3000 Jahren als Grundlage für die Wasserhaushaltsmodellierung zu generieren.

8 Danksagung

Das Projekt wurde vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS)[22] finanziert.

An der Durchführung waren zahlreiche Personen und Institutionen in unterschiedlichem Umfang beteiligt. Besonders zu nennen sind hier die Beiträge des Max-Planck-Institutes für Meteorologie (MPI-M, Dr. Daniela Jacob, Dr. Katharina Bülow, Claas Teichmann), dessen Mitarbeiter z.B. neue regionale Klimasimulationen ("REMO-BFG") beigesteuert haben, die Arbeiten des Entwicklungszentrums für Schiffstechnik und Transportsysteme (DST, Berthold Holtmann, Volker Renner), mit dessen Hilfe die Effekte des Klimawandels auf die Kosten des Binnenschiffstransports berechnet werden konnten sowie die an der Hochschule Rottenburg und Universität Würzburg (Dr. Anja Scholten, Prof. Benno Rothstein) durchgeführten Befragungen der Rhein-anliegenden Industrie. Eine Übersicht weiterer Kooperationen und Auftragsvergaben befindet sich in Tabelle 7.

Die Studie hat wesentlich von Klimasimulationen profitiert, die durch europäische und andere nationale Forschungsprogramme zur Verfügung gestellt wurden.

- "We acknowledge the modelling groups, the Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison (PCMDI) and the WCRP's Working Group on Coupled Modelling (WGCM) for their roles in making available the WCRP CMIP3 multi-model dataset. Support of this dataset is provided by the Office of Science, U.S. Department of Energy."
- “The ENSEMBLES data used in this work was funded by the EU FP6 Integrated Project ENSEMBLES (Contract number 505539) whose support is gratefully acknowledged.”
- Weitere Klimasimulationen stammen von Jacob (2006; REMO-UBA) und Keuler et al. (2009; CLM2.4).

Zu Vergleichszwecken (vgl. Abschnitt 7) wurden ferner Abflussprojektionen und aufbereitete hydrometeorologische Daten zur Verfügung gestellt. Gedankt sei in diesem Zusammenhang

- Prof. Wolfram Mauser (Department für Geographie) für die Daten aus dem GLOWA-Danube-Projekt
- Hendrik Buiteveld (Rijkswaterstaat, NL) für die Abflussprojektionen auf Basis der KNMI06 Szenarien.
- Thomas Bosshard (damals ETH Zürich) für die CH2011 Klimaprojektionen.

[22] Seit 12/2013 Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).

9 Literatur

Appenzeller, C., Bey, I., Croci-Maspoli M., Fuhrer, J., Knutti, R., Kull, C. & C. Schär (2011): Swiss Climate Change Scenarios CH2011. http://www.ch2011.ch/pdf/CH2011reportLOW.pdf

Bergström, S. (1995), The HBV model, in Computer Models of Watershed Hydrology, Chapter 13, edited by Singh, V. P., pp. 443-476, Water Resources Publications.

BMVBS (2009): KLIWAS Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. 1. Statuskonferenz am 18./19. März 2009, BMVBS, Bonn. http://www.kliwas.de/KLIWAS/DE/Service/Downloads/Publikationen/tagungsband_maerz09_bn.pdf?__blob=publicationFile

BMVBS (2012): KLIWAS Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. 2. Statuskonferenz am 25./26. Oktober 2011, BMVBS, Berlin. ISBN 978-3-940247-04-9. http://www.kliwas.de/KLIWAS/DE/Service/Downloads/Publikationen/tagungsband_oktober_2011_berlin.pdf?__blob=publicationFile

BMVBS (2013): KLIWAS Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen. Ausgewählte, vorläufige Ergebnisse zur 3. Statuskonferenz am 12./13. November 2013, BMVBS, Berlin. http://www.kliwas.de/KLIWAS/DE/02_Aktuelles/12_statuskonf_2013/kliwas_kompakt_1311.pdf?__blob=publicationFile

Bosshard, T., Carambia, M., Goergen, K., Kotlarski, S., Krahe, P., Zappa, M. & C. Schär (2013): Quantifying uncertainty sources in an ensemble of hydrological climate-impact projections. WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 49, 1523–1536.

Bülow, K., Ganske, A., Hüttl-Kabus, S., Klein, B., Klein, H., Löwe, P., Möller, J., Schade, N., Tinz, B.. Heinrich, H. & G. Rosenhagen (2014): Entwicklung gekoppelter regionaler Modelle und Analyse von Klimawandelszenarien für die Nordseeregion. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2.01. DOI: 10.5675/Kliwas_31/2014_2.01

Conradt, T., Hattermann, F.F., Wechsung, F. (2007): Simulation von räumlich differenzierten Abflußdargebotsszenarien und landwirtschaftlichen Ertragspotentialen für das Elbegebiet mit dem ökohydrologischen Modell SWIM. Schlussbericht GLOWA Elbe II . http://glowa-elbe.de/pdf/schlussbericht_glowaii/kapitel/kapitel2.pdf

Conradt, T., Koch, H., Hattermann, F.F., Wechsung, F. (2012): Spatially differentiated management-revised discharge scenarios for an integrated analysis of multi-realisation climate and land use scenarios for the Elbe River basin. Reg Environ Change DOI 10.1007/s10113-012-0279-4

DESTATIS (1991-2012): Güterverkehrsstatistik der Binnenschifffahrt. Wiesbaden 1991-2012. https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/TransportVerkehr/Schifffahrt/BinnenschifffahrtM.html)

Döll, P. & Vassolo, S. (2002): Klimabedingte Änderungen des hydrologischen Regimes im gesamten Einzugsgebiet der Elbe von 1900 bis 2100. In Geller et al. (eds.): Die Elbe – neue Horizonte des Flussgebietsmanagements. 10. Magdeburger Gewässerschutzseminar. Teubner, 323-326.

Eberle, M., Buitefeld, H., Wilke, K. & Krahe, P. (2005), Hydrological Modelling in the River Rhine Basin, Part III-Daily HBV Model for the Rhine Basin, BfG-Berichte, BfG-1451, Federal Institute of Hydrology, Koblenz.

Ebner von Eschenbach, A.-D., Carambia, M., Hohenrainer, J., Nilson, E. & Richter, K. (2012): Mögliche Auswirkungen des Klimawandels und veränderter Ansprüche der

Nutzer auf die Bewirtschaftung des Westdeutschen Kanalsystems. Kolloquium "Überregionale Wasserbewirtschaftung – Entwicklung und Einsatz eines Informationssystems und verschiedener Modelle" am 12./13. Oktober in Hannover. In: Veranstaltungen 2/2012, Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, S. 42-53

Ebner-von-Eschenbach, A.-D., Hohenrainer, J., Kaltofen, M., Müller, F., Schramm, M. (2013): Wasserwirtschaftliche Verhältnisse des Projektes 17 für den Bereich des WNA Berlin, 2. Teilbericht. BfG-1777 (Bereitstellung auf Anfrage).

European Communities (2009): River basin management in a changing climate. Common implementation strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC). Technical Report - 2009 - 040. Guidance document No. 24.

GLOWA-Danube (2010): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau, LMU München, München.

Görgen, K., Beersma, J., Brahmer, G., Buiteveld, H., Carambia, M., de Keizer, O., Krahe, P., Nilson, E., Lammersen, R., Perrin, C., Volken, D. (2010): Assessment of Climate Change Impacts on Discharge in the Rhine River Basin: Results of the RheinBlick2050 Project, CHR report, I-23, 228 pp. ISBN 978-90-70980-35-1

Hanel, M., Vizina, A., Máca, P. & Pavlásek, J. (2012): A multi-model assessment of climate change impact on hydrological regime in the Czech Republic. J. Hydrol. Hydromech., 60, 2012, 3, 152–161 DOI: 10.2478/v10098-012-0013-4

Hardenbicker, P., Becker, A., Fischer, H., (2014): Klimabedingte Änderung des Stoffhaushalts und der Algenentwicklung in Bundeswasserstraßen. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 5.02. KLIWAS- 49 /2014. DOI: 10.5675/Kliwas_49/2014_5.02

Hattermann et al. (2010): Simulation der Wirkung von Klimaänderungen und Klimamodellunsicherheit auf den Wasserhaushalt für deutsche Flusseinzugsgebiete. In: Kaiser, K., Libra, J., Merz, B., Bens, O., Hüttl, R.F. (Hrsg.), 2010. Aktuelle Probleme im Wasserhaushalt von Nordostdeutschland: Trends, Ursachen, Lösungen. Scientific Technical Report 10/10. Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam.

Hillebrand, G., Pohlert, T., Breitung, V. (2014): Klimaprojektionen für den Sedimenthaushalt und Risiken durch kohäsive Sedimente. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 5.01. KLIWAS- 48 /2014. DOI: 10.5675/Kliwas_48/2014_5.01

Holtmann, B., Scholten, A., Baumhauer, R., Rothstein, B., Gründer, D., Renner, V., Nilson, E. (2012): Analysen zur Betroffenheit der Binnenschifffahrt und der Wirtschaft am Rhein. In: BMVBS (Hrsg.): KLIWAS Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. 2. Statuskonferenz am 25./26. Oktober 2011, BMVBS, Berlin. Tagungsband. ISBN 978-3-940247-04-9

ICDPR (2012): Danube Study – Climate Change Adaptation. 174 S. https://www.icpdr.org/main/activities-projects/climate-change-adaptation

IKSR (2009): Analyse des Kenntnisstands zu den bisherigen Veränderungen des Klimas und zu den Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt im Rhein-Einzugsgebiet – Literaturauswertung. IKSR Bericht 174.

IKSR (2011): Study of Scenarios for the Discharge Regime of the Rhine. State: April 2011. IKSR Bericht 174.

IPCC (2007): IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml#1

Jacob, D. (2006): REMO climate of the 20th century run and A1B scenario run, UBA project, 0.088 degree resolution. World Data Center for Climate. CERA-Database.

Jacob, D., Nilson, E., Tomassini, L. & Bülow, K. (2009): REMO climate of the 20th century run and A1B scenario run, BfG project, 0.088 degree resolution. World Data Center for Climate. CERA-Database.

Keuler, K., Lautenschlager, M., Wunram, C., Keup-Thiel, E., Schubert, M., Will, A., Rockel, B., Boehm, U. (2009): Climate Simulation with CLM, Data Stream 2: European region MPI-M/MaD. World Data Center for Climate. CERA-Database.

Klein, B., Lingemann, I., Nilson, E., Krahe, P., Maurer, T., H. Moser (2012a): Key concepts of climate change impact analyses for river basin management in the River Danube. River Systems Volume 20 Issue 1-2 (2012), p. 7 - 21. DOI: 10.1127/1868-5749/2011/0035

Klein, B., Maurer, T., Nilson, E., Krahe, P. (2012b): Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussregime im Donau-Abschnitt Straubing – Vilshofen bis zur Mitte des 21.-Jahrhunderts. Anlage zur EU-Studie Donau. http://www.donauausbau.wsv.de/anlagen/Bericht_EU-Studie/B_I_Ist_Zustand/Anlage_I_04.pdf

Klein, B., Larina, M., Nilson, E. & P. Krahe (2015): Untersuchungen zu Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen der oberen Donau. Abflussprojektionen und –szenarien für gewässerkundliche und verkehrswasserwirtschaftliche Analysen. BfG-1806.

Kling, H., H. P. Nachtnebel & Fürst, J. (2007). Saisonale Wasserbilanz. Karte 7.2. Hydrologischer Atlas Österreichs. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien, Österreichischer Kunst- und Kulturverlag.

Kling, H., Lagler, M., Stanzel, P. & Fuchs, M. (2012): Wasserbilanzmodellierung und Auswirkungen der Klimaänderung für den deutschen Abschnitt der Donau – Erweiterte Simulationen. BfG, interner Bericht.

Krahe, P., Nilson, E., Carambia, M., Maurer, T., Tomassini, L., Bülow, K., Jacob, D. & H. Moser (2009): Wirkungsabschätzung von Unsicherheiten der Klimamodellierung in Abflussprojektionen – Auswertung eines Multimodell-Ensembles im Rheingebiet. Hydrologie & Wasserbewirtschaftung 53. Heft 5. 316-331.

Krahe, P., Nilson, E., Gelhardt, U., Lang, J. (2010): Auswertungen ausgewählter globaler Klimamodelle hinsichtlich atmosphärischer Zirkulationsbedingungen im Nordatlantisch-Mitteleuropäischen Sektor, BfG 1682. 38 S.

Krahe, P., Carambia, M., Larina, M., Lingemann, I., Horsten, T. & Nilson, E. (2015): Untersuchungen zu Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen der Elbe. Abflussprojektionen und –szenarien für gewässerkundliche und verkehrswasserwirtschaftliche Analysen. BfG-1808.

Lingemann, I., Nilson, E., Carambia M., Krahe, P. (2013): Änderungen des Wasserhaushalts der Elbe im 21. Jahrhundert. Die Zukunft des Wasserhaushaltes im Elbeeinzugsgebiet, Kolloquium 29./30.11.2012 Dresden. BfG-Veranstaltungen 6/2013.

Lingemann, I., Nilson, E. & Krahe, P. (2014): Hydrologische Modellierung des Elbeeinzugsgebietes mit dem Tageswertmodell HBV-D. Technische Dokumentation des hydrologischen Modells für den Referenzzustand an der Elbe. BfG-Bericht (in Vorbereitung).

Maurer, T., Nilson, E., Krahe, P. (2011): Entwicklung von Szenarien möglicher Auswirkungen des Klimawandels auf Abfluss- und Wasserhaushaltskenngrößen in Deutschland. acatech Materialien, Nr.11. http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Publikationen/Materialienbaende/acatech_Materialband_Nr11_WEB.pdf

Meehl, G. A., C. Covey, T. Delworth, M. Latif, B. McAvaney, J. F. B. Mitchell, R. J. Stouffer & K. E. Taylor (2007): The WCRP CMIP3 multi-model dataset: A new era in climate-change research,Bulletin of the American Meteorological Society, 88, 1383-1394.

Meijer, D.G. (2009): Aktualisierung des SOBEK-Modells Iffezheim/Maxau - Andernach. Interner Bericht, BfG. 76 S.

Meißner, D. (2008): Erstellung, Kalibrierung und Validierung des SOBEK-Modells für die Rheinstrecke zwischen den Pegeln Andernach und Lobith. BfG-Bericht 1593. 100 S.

Merz, B., Maurer, T. & K. Kaiser (2012): Wie gut können wir vergangene und zukünftige Veränderungen des Wasserhaushalts quantifizieren? 56. Jahrgang, Heft 5, Oktober 2012. DOI: 10.5675/HyWa_2012,5_1.

Moser, H.; Krahe, P.; Maurer, T.; Nilson, E.; Rothstein, B.; Scholten, A. (2008): Wasserstraßen - Handlungsoptionen für Wirtschaft und Binnenschifffahrt. Beitrag zum Symposium Klimaänderung - Was kann die Wasserwirtschaft tun? am 24./25 Juni 2008 in Nürnberg, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung der Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften in der DWA (FgHW), Heft 24.08 (ISBN: 978-3-940173-97-3).

Moser, H. (2013): Szenarienstudie für das Abflussregime des Rheins. Einordnung der neuen Erkenntnisse (2011-2012). doi:10.5675/BFG_KLIWAS_AbflussRhein_IKSR_Workshop

Mosner, E., Horchler, P. (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf die Vegetation der Flussauen. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 5.06. KLIWAS- 53 /2014. DOI: 10.5675/Kliwas_53/2014_5.06

Mudelsee, M., Chirila, D., Deutschländer, T., Döring, C., Haerter, J., Hagemann, S., Hoffmann, H., Jacob, D., Krahe, P., Lohmann, G., Moseley, C., Nilson, E., Panferov, O., Rath, T., Tinz, B. (2010): Climate Model Bias Correction und die Deutsche Anpassungsstrategie. In: Mitteilungen Deutsche Meteorologische Gesellschaft 03/2010. S. 2-7. ISSN 0177-8501

Murtagh, F. (1985). Multidimensional Clustering Algorithms, Lectures in computational statistics 4. Wuerzburg, Wien. Physica-Verlag. 131 S.

Nachtnebel, H., S. Baumung and W. Lettl (1993). Abflussprognosemodell für das Einzugsgebiet der Enns und Steyr. Wien, Österreich, Institute of Water Management, Hydology and Hydraulic Engineering, University of Natural Resources and Applied Life Sciences.

Nakicenovic, N., Davidson, O., Davis, G., Grübler, A., Kram, T., Lebre La Rovere, E., Metz, B., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Sankovski, A., Shukla, P., Swart, R., Watson, R., and Dadi, Z. (2000), IPCC Special report on Emission Scenarios. Summary for Policymakers, 27 pp.

Nilson, E., Carambia, M., Krahe, P., Rachimow, C., Beersma, J. (2010a): Bias-Korrekturmodelle im Vergleich: Eine Bewertung im Kontext der hydrologischen Klimafolgenforschung. In: Meon. G. (Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften in der DWA) (Hrsg.): Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Nachhaltige Wasserwirtschaft durch Integration von Hydrologie, Hydraulik, Gewässerschutz und Ökonomie. ISBN: 978-3-941897-49-6

Nilson, E., Perrin, C., Beersma, J., Carambia, M., Krahe, P., de Keizer, O., Görgen, K. (2010b): Evaluation of data and processing procedures. In: Görgen, K., Beersma, J., Brahmer, G., Buiteveld, H., Carambia, M., de Keizer, O., Krahe, P., Nilson, E., Lammersen, R., Perrin, C., Volken, D. (2010): Assessment of Climate Change Impacts on Discharge in the Rhine River Basin: Results of the RheinBlick2050 Project, CHR report, I-23, 228 pp. ISBN 978-90-70980-35-1

Nilson, E., Carambia, M., Krahe, P. (2010c): Low flow changes in the Rhine River Basin. In: Görgen, K., Beersma, J., Brahmer, G., Buiteveld, H., Carambia, M., de Keizer, O., Krahe, P., Nilson, E., Lammersen, R., Perrin, C., Volken, D. (2010): Assessment of Climate Change Impacts on Discharge in the Rhine River Basin: Results of the RheinBlick2050 Project, CHR report, I-23, 228 pp. ISBN 978-90-70980-35-1

Nilson, E. & P. Krahe (2012): Zum Transfer der Unsicherheiten von Abfluss-Projektionen des 21. Jahrhunderts in den politisch-administrativen Raum. In: Weiler, M. (Hrsg.): Wasser ohne Grenzen. Forum Für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 31.12, S. 287-292.

Nilson, E., Lingemann, I., Klein, B., Krahe, P. (2012a): Impact of Hydrological Change on Navigation Conditions. ECCONET REPORT D1.4. http://www.ecconet.eu/deliverables/ECCONET_D1.4_final.pdf

Nilson, E., Krahe, P. & K. Görgen (2012b): Climate Projections for the Greater Alpine Region. An evaluation of selected regional climate simulations with respect to hydrometeorological variations. BFG-1749. 70 S.

Nilson, E. & P. Krahe (2013): Rheinschifffahrt und Klimawandel. Geographische Rundschau 7-8. 26-33.

Nilson, E., Carambia, M., Larina, M. & P. Krahe (2015): Untersuchungen zu Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen des Rheins. Abflussprojektionen und -szenarien für gewässerkundliche und verkehrswasserwirtschaftliche Analysen. Auswirkungen und Anpassungsmaßnahmen für die Binnenschifffahrt und die verladende Wirtschaft. BfG-1807.

Pardé, M. (1933): Fleuves et Rivières. - Armand Colin, Paris

Pfützner, B., Müller, T.-L., & Krahe, P. (2013): Testung der Auswirkung unterschiedlicher Ansätze zur Ermittlung der potenziellen Verdunstung auf die Wasserhaushaltsmodellierung in einem Tieflandeinzugsgebiet in Sachsen-Anhalt. Interner Bericht, Bundesanstalt für Gewässerkunde.

Renner, V., Henn, R., Holtmann, B., Gründer, D. & Müller, E. (2014): Auswirkungen unterschiedlicher Abflüsse auf die Transportkosten und Kapazität der Binnenschifffahrt auf dem Rhein. Interner DST-Bericht 2073.

Roberts, M., Vollmer, S. (2014): Klimaprojektionen für Sedimenthaushalt und Flussbettentwicklung. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.02. KLIWAS- 44 /2014. DOI: 10.5675/Kliwas_44/2014_4.02

Scholten, A. (2010): Massenguttransport auf dem Rhein vor dem Hintergrund des Klimawandels. Eine Untersuchung der Auswirkungen von Niedrigwasser auf die Binnenschifffahrt und die verladende Wirtschaft. Würzburger Geographische Arbeiten. 104. 331 S.

Scholten, A., Rothstein, B. (2012): Auswirkungen von Niedrigwasser und Klimawandel auf die verladende Wirtschaft, Binnenschifffahrt und Häfen entlang des Rheins – Untersuchungen zur gegenwärtigen und zukünftigen Vulnerabilität durch Niedrigwasser. Würzburger Geographische Arbeiten. 107. 376 S.

Scholten, A., Rothstein, B. & R. Baumhauer (2014): Mass-cargo-affine industries and climate change. Climatic Change January 2014, Volume 122, Issue 1-2, pp 111-125

Schröder, M., Wurms, S. (2014): Verkehrswasserbauliche Regelungs- und Anpassungsoptionen an klimabedingte Veränderungen des Abflussregimes. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.03. KLIWAS- 45 /2014. DOI: 10.5675/Kliwas_45/2014_4.03

Seiffert, R., Hesser, F., Büscher, A., Fricke, B., Holzwarth, I., Rudolph, E., Sehili, A., Seiß, G., Winkel, N. (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf die deutsche Küste und die Ästuare. Mögliche Betroffenheiten der Seeschifffahrtsstraßen und Anpassungsoptionen hinsichtlich der veränderten Hydrodynamik und des Salz- und Schwebstofftransports. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2.04/3.02. KLIWAS- 36 /2014. DOI: 10.5675/Kliwas_36/2014_3.02

Van den Hurk B.J.J.M., Klein Tank A.M.G., Lenderink G. , Ulden A.P. van, Oldenborgh G.J. van, Katsman C.A., Brink H.W. van den, Keller F., Bessembinder J.J.F., Burgers G., Komen G.J., Hazeleger W. & Drijfhout S.S. (2006): KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands. - KNMI-Publicatie: WR-2006-01, 30/5/2006, pp 82.

Van der Linden, P. & Mitchell, J.F.B (2009). ENSEMBLES - Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK. 160 S.

Vellinga, P., C.A. Katsman, A. Sterl, J.J. Beersma, J.A. Church, W. Hazeleger, R.E. Kopp, D. Kroon, J. Kwadijk, R. Lammersen, J. Lowe, N. Marinova, M. Oppenheimer, H.P. Plag, S. Rahmstorf, J. Ridley, H. von Storch, D.G. Vaughan, R.S.W. van der Wal and R. Weisse (2008). Exploring high-end climate change scenarios for flood protection of the Netherlands. International Scientific Assessment carried out at request of the

Delta Committee. KNMI Scientific Report WR-2009-05, KNMI / Alterra, the Netherlands.

WMO (2011): Guide to Climatological Practices. WMO-No. 100. 11.S. http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/guide/documents/WMO_100_en.pdf

WSV (2002): Güterverkehrsdichte der See- und Binnenschifffahrt 2000 auf dem Hauptnetz der Bundeswasserstraßen. Karte 172b. http://www.bafg.de/DE/01_Leistungen/BWaStr/Gueterverkehrsdichte.pdf

WSV (2009): Sohlstabilisierungskonzept für die Elbe von Mühlberg bis zur Saalemündung. Bericht der Projektgruppe „Erosionsstrecke Elbe“, http://www.wsd-ost.wsv.de/betrieb.../Sohlstabilisierung_textteil_.pdf

WSV (2011): Binnenschifffahrtsstraßenordnung (BinSchStrO), Zweiter Teil - Zusätzliche Bestimmungen für einzelne Binnenschifffahrtsstraßen. 13.04.2012 http://www.elwis.de/Schifffahrtsrecht/Verzeichnis-Rechtsverordnungen-Gesetze/BinSchStrO.pdf

WSV (2012): Rheinschifffahrtspolizeiverordnung (RheinSchPV). Stand: 02.07.2012. https://www.elwis.de/Schifffahrtsrecht/Verzeichnis-Rechtsverordnungen-Gesetze/RheinSchPV.pdf

ZKR (2013): Europäische Binnenschifffahrt. Marktbeobachtung 2013. Nr. 17. http://www.ccr-zkr.org/files/documents/om/om13_de.pdf

10 Abkürzungen und Namenskonvention

Abkürzung	Erläuterung
BC	Bias-Korrektur
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BLFU	Startseite des Bayerischen Landesamt für Umwelt
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (seit 2014 Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, BMVI)
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BinSchStrO	Binnenschifffahrtsstraßen-Ordnung (BinSchStrO)
BWaStr	Bundeswasserstraße
C4I	Community Climate Change Consortium for Ireland, IE
CNRM	Centre National de Recherches Météorologiques, FR
DESTATIS	Statistisches Bundesamt
DMI	Danmarks Meteorologiske Institut, DK
ECM	Ökonomisches Modul der Modellkette (hier: Kostenstrukturmodell oder Verwundbarkeitsanalyse)
ETHZ	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, CH
FDC	Abflussdauerkurve (Flow duration curve)
GCM	Globales Klimamodell
GKSS	Helmholtz-Zentrum Geesthacht, DE
GLW, GLQ	Gleichwertiger Wasserstand bzw. entsprechender Abfluss Wasserstand, der im langjährigen Mittel an 20 eisfreien Tagen unterschritten wird.
HBV	Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning
HC	Met Office Hadley Centre, UK
HLUG	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
HM5Q	Höchster über 5-Tage gemittelter Abfluss
HMoMQ	Höchster über einen Monat gemittelter Abfluss
HSW, HSQ	Höchster schiffbarer Wasserstand (WSV, 2011)
ICTP	Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, IT
IKSD, ICPDR	Internationale Kommission zum Schutz der Donau
IKSE	Internationale Kommission zum Schutz der Elbe
IKSR	Internationale Kommission zum Schutz des Rheins
KHR	Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes
KNMI	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, NL
KST	Kostenstrukturmodell (vgl. Abschnitt 4.5)
LANUV NRW	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
METNO	Meteorologisk institutt, NO
MPI-M	Max-Planck-Institut für Meteorologie, DE
MQ	Arithmetisches Mittel des Abflusses innerhalb eines Zeitraums
NM7Q	Niedrigster über 7-Tage gemittelter Abfluss
NMoMQ	Niedrigster über einen Monat gemittelter Abfluss
OURANOS	Consortium on Regional Climatology and Adaptation to Climate Change, CA

Abkürzung	Erläuterung
RCM	Regionales Klimamodell
RNW, RNQ	Regulierungsniedrigwasserstand bzw. entsprechender Abfluss
RheinSchPV	Rheinschifffahrtspolizeiverordnung (vgl. WSV, 2012)
SMHI	Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut, SE
SRES	Emissionsszenario gemäß dem " IPCC Special report on Emission Scenarios" Nakicenovic et al. (2000)
UBA	Umweltbundesamt, DE
UCLM	Universidad de Castilla-La Mancha, ES
VGMO	Voeikov Main Geophysical Observatory, RU
VI	Verwundbarkeitsindikator (vgl. Abschnitt 4.5)
WBM	Wasserbilanzmodell
WMO	Weltorganisation für Meteorologie

Namensgebung der Klimamodellketten

Die Bezeichnung der Modellketten folgt der in Tabelle 14 dargestellten Namenskonvention. Der Zusammenhang zwischen der Namensgebung in Tabelle 1 und der in diesem Bericht verwendeten verkürzten Namensgebung ist in

Tabelle 14: Erläuterung der Modellkettenbezeichnung am Beispiel der Kette A1B_EH5r1_CLM24_LS_HBV134_SOBEK-KLIWAS_ECM.

Elemente:	A1B	EH5r1	RCA	LS	HBV134	SOBEK-KLIWAS	ECM
Schema:	SRES	GCM	RCM	BC	WBM	Hydrodyn. Modell	Ökonomisches Modul
Erläuterung in Abschnitt	4.1	4.1	4.1	4.1	4.2	4.4	4.5

Tabelle 15: Namenszuordnung der der Klimamodellketten

Nr.	**Klimamodellketten (lang vgl. Tabelle 1) (C20-SRES_GCM_RCM)**	**Klimamodellketten (kurz, wie in diesem Bericht verwendet) (C20-SRES_GCM_RCM)**
1	C20-A1B_ARPEGE_ALADIN45#	C20-A1B_ARP_ALD45#
2	C20-A1B_ARPEGE_ALADIN51	C20-A1B_ARP_ALD51
3	C20-A1B_ARPEGE_HIRHAM	C20-A1B_ARP_HH
4	C20-A1B_BCM_HIRHAM#	C20-A1B_BCM_HH#
5	C20-A1B_BCM_HIRHAM5	C20-A1B_BCM_HH5
6	C20-A1B_BCM_RCA3	C20-A1B_BCM_RCA3
7	C20-A1B_CGCM3_CRCM#	C20-A1B_CGCM3_CRCM#
8	C20-A1B_ECHAM5r1_CLM24	C20-A1B_EH5r1_CLM24
9	C20-A1B_ECHAM5r1_REMO-UBA	C20-A1B_EH5r1_RE-UBA
10	C20-A1B_ECHAM5r2_CLM24	C20-A1B_EH5r2_CLM24
11	C20-A1B_ECHAM5r2_REMO-BFG	C20-A1B_EH5r2_RE-BFG
12	C20-A1B_ECHAM5r3_HIRHAM5	C20-A1B_EH5r3_HH5
13	C20-A1B_ECHAM5r3_RACMO	C20-A1B_EH5r3_RACMO
14	C20-A1B_ECHAM5r3_RCA3	C20-A1B_EH5r3_RCA3
15	C20-A1B_ECHAM5r3_REGCM	C20-A1B_EH5r3_REGCM
16	C20-A1B_ECHAM5r3_REMO-KLIMZUG	C20-A1B_EH5r3_RE-KLM
17	C20-A1B_ECHAM5r3_REMO-ENSEMBLES	C20-A1B_EH5r3_RE-ENS
18	C20-A1B_HADCMQ0_CLM24	C20-A1B_HCQ0_CLM24
19	C20-A1B_HADCMQ0_HIRHAM#	C20-A1B_HCQ0_HH#
20	C20-A1B_HADCMQ0_HADRMQ0	C20-A1B_HCQ0_HRQ0
21	C20-A1B_HADCMQ0_PRM#	C20-A1B_HCQ0_PRM#
22	C20-A1B_HADCMQ0_REMO-BFG	C20-A1B_HCQ0_RE-BFG
23	C20-A1B_HADCMQ0_RRCM#	C20-A1B_HCQ0_RRCM#
24	C20-A1B_HADCMQ3_HADRMQ3	C20-A1B_HCQ3_HRQ3
25	C20-A1B_HADCMQ3_RCA3	C20-A1B_HCQ3_RCA3
26	C20-A1B_HADCMQ16_HADRMQ16	C20-A1B_HCQ16_HRQ16
27	C20-A1B_HADCMQ16_RCA3	C20-A1B_HCQ16_RCA3
28	C20-A1B_IPSL_CLM48#	C20-A1B_IPSL_CLM48#
29	C20-A1B_MIC_RACMO	C20-A1B_MIC_RACMO
30	C20-A2_ECHAM5r1_REMO-UBA	C20-A2_EH5r1_RE-UBA
31	C20-A2_ECHAM5r3_RCA3#	C20-A2_EH5r3_RCA3#
32	C20-B1_ECHAM5r1_CLM24	C20-B1_EH5r1_CLM24
33	C20-B1_ECHAM5r1_REMO-UBA	C20-B1_EH5r1_RE-UBA
34	C20-B1_ECHAM5r2_CLM24	C20-B1_EH5r2_CLM24
35	C20-E1_ECHAM5Cr1_REMO-BFG	C20-E1_EH5Cr1_RE-BFG
36	C20-E1_ECHAM5Cr4_REMO-BFG	C20-E1_EH5Cr4_RE-BFG

Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)

Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe

www.baw.de
info@baw.de

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)

Bernhard-Nocht-Straße 78
20359 Hamburg

www.bsh.de
posteingang@bsh.de

Deutscher Wetterdienst (DWD)

Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach/Main

www.dwd.de
info@dwd.de

Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)

Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz

www.bafg.de
posteingang@bafg.de

BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE

IMPRESSUM

Herausgeber:
Bundesanstalt für Gewässerkunde
KLIWAS Koordination
Am Mainzer Tor 1
Postfach 20 02 53
56002 Koblenz
Tel.: 0261 / 1306-0
Fax: 0261 / 1306-5302
E-Mail: kliwas@bafg.de
Internet: http://www.kliwas.de

Redaktion: KLIWAS-Koordination
Bundesanstalt für Gewässerkunde

Autoren: Enno Nilson, Peter Krahe, Bastian Klein, Imke Lingemann, Theresa Horsten, Maria Carambia, Maria Larina, Thomas Maurer, BfG

Layout: Christin Hantsche und Tobias Knapp, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie - Rostock

Druck: Bundesanstalt für Gewässerkunde

DOI: 10.5675/Kliwas_43/2014_4.01