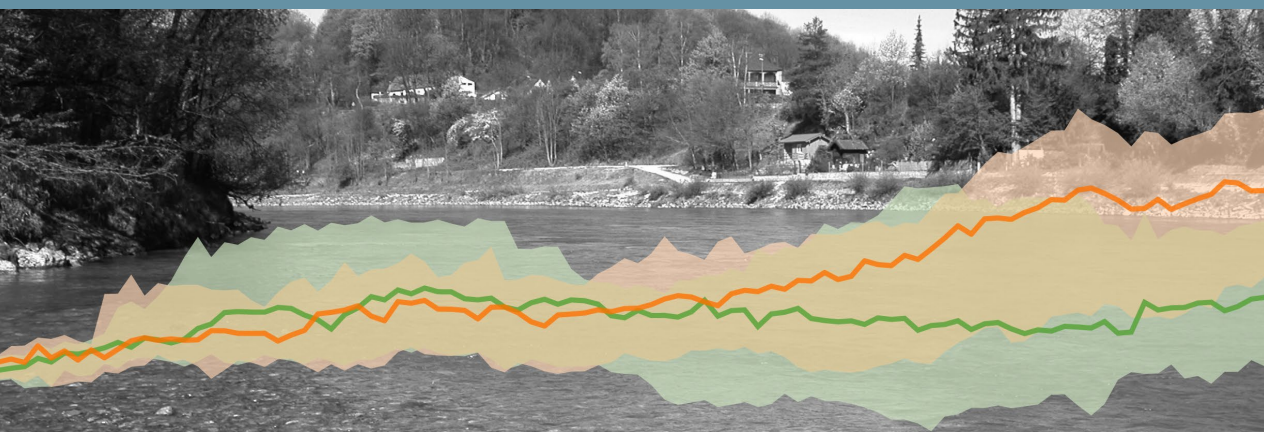




Klimawandel und Abflüsse in Bayern



wasser





Klimawandel und Abflüsse in Bayern

**Abflussprojektionen bis 2100 für die bayerischen
Flussgebiete auf Basis der IPCC Szenarien
RCP2.6 und RCP8.5**

Impressum

Klimawandel und Abflüsse in Bayern – Abflussprojektionen bis 2100 für die bayerischen Flussgebiete auf Basis der IPCC Szenarien RCP2.6 und RCP8.5

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg
Tel.: 0821 9071-0
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: www.lfu.bayern.de/

Konzept/Text:

LfU, Franz-Josef Schmid

Redaktion:

LfU, Franz-Josef Schmid & Holger Komischke

Bildnachweis:

Alle LfU außer
Titelbild: Hintergrundbild, Inn uh Kapuzinerinsel – Martin Mertl, WWA-Rosenheim
Abb. 66: WWA-Weilheim

Stand:

November 2025

Diese Publikation wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Publikation nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Publikation zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die publizistische Verwertung der Veröffentlichung – auch von Teilen – wird jedoch ausdrücklich begrüßt. Bitte nehmen Sie Kontakt mit dem Herausgeber auf, der Sie – wenn möglich – mit digitalen Daten der Inhalte und bei der Beschaffung der Wiedergaberechte unterstützt.

Diese Publikation wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 089 12 22 20 oder per E-Mail unter direkt@bayern.de erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.

Inhaltsverzeichnis

Kurzübersicht	5
1 Einleitung	6
1.1 Einführung Klimawandel und Wasserwirtschaft	6
1.2 Ziel und Inhalt	6
1.3 Länderkooperation KLIWA	9
2 Grundlagen und Methodik	11
2.1 Hydrologische Grundlagen	11
2.1.1 Die Wasserbilanz und Bezugsjahre	11
2.1.2 Das Abflussregime	13
2.1.3 Betrachtete Abflusskennwerte	14
2.2 Die Modellkette	16
2.3 Die RCP-Szenarien	19
2.4 Verwendete Klimadaten zur Erstellung von Abflussprojektionen	20
2.4.1 Meteorologische Beobachtungsdaten	20
2.4.2 Verwendete Klimaprojektionen und Modellkette: Die Ensemblebildung	21
2.5 Die Wasserhaushaltsmodellierung	23
2.5.1 Das Projekt Wasser.Klima.Bayern	23
2.5.2 Funktionsweise des hydrologischen Modells	23
2.5.3 Konfiguration und Kalibrierung des Modells	25
2.6 Auswertung von Abflussprojektionen	26
2.6.1 Abflussprojektionen	26
2.6.2 Berechnung der Klimasignale	27
2.6.3 Darstellungsmethoden der Klimasignale im Abfluss	28
2.6.3.1 Trends aus beobachteten Pegeldaten	28
2.6.3.2 Gleitende Mittel	28
2.6.3.3 Regimeänderungen	30
2.6.3.4 Jährlichkeiten	30
3 Klima und Klimawandel in Bayern	32
4 Wasserhaushalt und Abfluss	36

4.1	Einleitung und Vorbemerkung	36
4.2	Die Wasserbilanz für den Referenzzeitraum 1971 bis 2000	37
4.3	Zukünftige Entwicklung der Verdunstung und ausgewählter Abflusskomponenten	39
4.4	Abflussregime	43
4.5	Entwicklung der beobachteten Abflüsse	49
4.5.1	Trends im beobachteten mittleren Abfluss	50
4.5.2	Beobachteter Niedrigwasserabfluss	52
4.5.3	Beobachteter Hochwasserabfluss	54
4.6	Entwicklung der Abflusskennwerte aus den Abflussprojektionen für die Zukunft	56
4.6.1	Abflussprojektionen für den mittleren Abfluss	57
4.6.2	Abflussprojektionen für den Niedrigwasserabfluss	64
4.6.2.1	Zukünftige Entwicklung der Niedrigwasserkennwerte	64
4.6.2.2	Zukünftige Entwicklung von Niedrigwasserjährlichkeiten	73
4.6.2.3	Fallbeispiel: Main-Donau Überleitung	78
4.6.3	Abflussprojektionen für den Hochwasserabfluss	80
4.6.3.1	Zukünftige Entwicklung der Hochwasserkennwerte	80
4.6.3.2	Zukünftige Entwicklung von Hochwasserjährlichkeiten	90
4.6.3.3	Fallbeispiel: Sylvensteinspeicher	96
5	Zusammenfassung und Ausblick	98
6	Literaturverzeichnis	102
	Anhang A: Liste der Untersuchungspegel und Ergebnisse des Kontrolllaufes	105
	Anhang B: Vergleich der Bandbreiten des verwendeten Abflussprojektionsensembles mit und ohne die MIROC-RCP2.6 Projektion	108
	Anhang C: Jahreswerte des MQ, MNQ und MHQ für die drei Beispielpegel	115
	Anhang D: Maximales und Minimales Klimasignal sowie Median der 60 Auswertepegel	119
	Anhang E: Median der Klimaänderungssignale Niedrigwasserjährlichkeiten	137
	Anhang F: Median der Klimaänderungssignale Hochwasserjährlichkeiten	139

Kurzübersicht

Das vorliegende UmweltSpezial untersucht die Auswirkungen des Klimawandels auf den Abfluss in bayerischen Flüssen, basierend auf zwei Klimaszenarien des IPCC bis zum Jahr 2100. Ziel ist es, regionale wasserwirtschaftliche Probleme zu identifizieren, um Anpassungsstrategien zu entwickeln. Die Methodik umfasst ein hydrologisches Modell, das verschiedene Emissionsszenarien und Klimamodelle integriert. Die angewandte Modellkette zur Analyse des zukünftigen Klimas beginnt mit Emissionsszenarien und nutzt globale Klimamodelle (GCM), die hochaufgelöste meteorologische Zeitreihen liefern. Für kleinräumigere Analysen kommen regionale Klimamodelle (RCM) zum Einsatz, die eine höhere räumliche Auflösung bieten. Zur Adressierung von Unsicherheiten in den Klimamodellen wird ein Ensemble von Klimaprojektionen, das Bayern-Ensemble, verwendet, das neun Kombinationen für das RCP8.5-Szenario und sieben Modelle für das RCP2.6-Szenario umfasst. Diese RCP-Szenarien beschreiben unterschiedliche Entwicklungen der Treibhausgaskonzentrationen. Für die Modellierung des zukünftigen Abflusses wird das „Wasserhaushalts-Simulations-Modell (WaSiM)“ eingesetzt, das die regionalen Klimadaten nutzt und den Wasserkreislauf abbildet. Die resultierenden Abflussprojektionen werden anhand gewässerkundlicher Kennwerte wie mittlerer Abfluss (MQ), mittlerer Niedrigwasserabfluss (MNQ) und mittlerer Hochwasserabfluss (MHQ) quantitativ beschrieben. Die Ergebnisse werden in Bezug auf einen Referenzzeitraum (1971–2000) sowie drei Zukunftszeiträume (2021–2050, 2041–2070, 2071–2100) ausgewertet, wobei Trends, gleitende Mittel der Kennwerte und Änderungen der Abflussregime betrachtet werden.

Die Ergebnisse zeigen bis 2100 eine kontinuierliche Zunahme der Verdunstung. Die Speicherung von Niederschlägen in Form von Schneedecken nimmt ab, was zu einem erhöhten direkten Abfluss in den Wintermonaten führt. Für die Abflussregime wird der nivale Anteil bis zum Ende des Jahrhunderts stark zurückgehen, insbesondere in der Donauregion, wo sich nivo-pluviale Regime in pluviale Regime wandeln. In den Sommermonaten wird eine Zunahme der Höchstabflüsse für den schnellen Abfluss prognostiziert. Änderungen der Regimetypen sind unter dem RCP8.5-Szenario häufiger als unter RCP2.6.

Bezüglich des MQ wird für Südbayern im Sommerhalbjahr ein Rückgang projiziert, während im Winterhalbjahr ein Anstieg zu erwarten ist. In Nordbayern zeigen die Abflussprojektionen keinen klaren Trend. Der MNQ wird im Sommerhalbjahr für ganz Bayern voraussichtlich abnehmen, während im Winterhalbjahr in Südbayern ein Anstieg und in Nordbayern ein Rückgang zu erwarten ist. Die Niedrigwasserjährlichkeiten werden in Bayern lokal stark abnehmen. Der MHQ im Winterhalbjahr wird in Südbayern zunehmen, unabhängig vom Szenario, während in Nordbayern kein klarer Trend erkennbar ist. Im Sommerhalbjahr wird der MHQ in ganz Bayern voraussichtlich zunehmen. Schließlich wird für die Hochwasserjährlichkeiten bis HQ_{50} eine tendenzielle Zunahme erwartet, jedoch ist die Unsicherheit der Klimaänderungssignale, insbesondere bei höheren Jährlichkeiten, groß.

1 Einleitung

1.1 Einführung Klimawandel und Wasserwirtschaft

Seit Beginn des Industriezeitalters erwärmt sich das Klima weltweit und stellt eine der größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts dar. Laut der „World Meteorological Organization (WMO)“ lag die globale Durchschnittstemperatur im Jahre 2024 um 1,55 °C über dem vorindustriellen Mittel von 1850–1900 (WMO, 2025). Auf Deutschland bezogen gibt der „Deutsche Wetterdienst (DWD)“ hierfür einen Wert von +2,5 °C an (Deutscher Wetterdienst, 2025). Das Klimazentrum am bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) ermittelt für Bayern eine Zunahme von 2,2 °C seit 1951. Auch der Niederschlag unterlag in den letzten Dekaden globalen Veränderungen. Jedoch zeigt sich hier eine deutlich komplexere Entwicklung. Während ein sich kaum verändernder Jahresniederschlag zu beobachten ist, sind regional durchaus Abnahmen und Zunahmen in bestimmten Monaten erkennbar. Auch die Intensität und Häufigkeit von Starkregenereignissen veränderte sich in weiten Teilen der Welt und Dürreereignisse verstärkten sich, mit vielen schweren Folgen und Schäden in den betroffenen Regionen.

Einen Ausblick, welche zukünftigen klimatischen Entwicklungen zu erwarten sind, zeigen Klimamodellierungen für die nächsten Dekaden. Die Ergebnisse dieser Modellierungen ergeben, dass eine Fortsetzung der bereits messbaren Trends sehr wahrscheinlich ist. So ist zu erwarten, dass die Temperaturen auch weiterhin weltweit ansteigen. Dies ist zusammen mit vielen anderen zu erwartenden Veränderungen auf globaler Ebene sowie für Regionen wie Europa ausführlich im letzten Sachstandsbericht des „Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)“ (IPCC, 2023) dargelegt. Für Bayern weist das vom Klimazentrum bereitgestellte [„Bayerische Klimainformationssystem \(BayKIS\)“](#) hierzu bis zum Ende des Jahrhunderts eine maximale Zunahme der Jahresmitteltemperaturen um 4,8 °C im Vergleich zum Zeitraum 1971–2000 aus. Diese Zunahme beruht auf dem Szenario RCP8.5 „ohne Klimaschutz“. Über das BayKIS sind aber auch andere Szenarien abrufbar, die die verschiedenen Annahmen bezüglich der Klimaschutzanstrengungen berücksichtigen. So zeigt das Szenario RCP2.6 „2-Grad-Obergrenze“ die Entwicklung des Klimas bei Einhaltung der Ziele des Pariser Klimaschutzabkommens von Dezember 2015. Für Bayern entspricht dieses einer weiteren, maximalen Zunahme der jährlichen Durchschnittstemperatur von 1,6 °C. Im Klima-Report Bayern 2021 (StMUV, 2021) wurden diese unterschiedlichen Szenarien politisch und ökonomisch eingeordnet.

Eine zentrale Rolle bei der Beschreibung des Klimawandels kommt dem Wasserkreislauf zu. Dieser stellt den Menschen eine Vielzahl an Ökosystemdienstleistungen zur Verfügung. Er ist unmittelbar mit der globalen Erwärmung verknüpft und wird durch diese auch selbst verändert. So führen höhere Temperaturen zu höheren Verdunstungsraten. Veränderungen im Niederschlagsgeschehen können ebenfalls vielfältige Auswirkungen auf den Wasserhaushalt haben. Beispielsweise können dadurch Hochwasser sowie Dürren begünstigt werden. Auch das Auftreten von Extremwetterereignissen, wie Starkregen, kann sich in Intensität und Häufigkeit weiter verstärken.

Diese Entwicklungen sind bereits in Süddeutschland zu beobachten. Aus Messdaten lassen sich steigende Trends für Hochwasserabflüsse und abnehmende Trends der Niedrigwasserabflüsse ableiten. Die jeweilige Ausprägung eines solchen Trends kann zusätzlich im Jahresgang verschieden ausgeprägt sein (KLIWA, 2022a).

1.2 Ziel und Inhalt

Mit dem vorliegenden UmweltSpezial werden die Ergebnisse von so genannten Abflussprojektionen bayerischer Flusseinzugsgebiete unter dem Einfluss des Klimawandels überblicksartig vorgestellt. Zu

diesem Zweck werden Methodiken und Auswertungsmöglichkeiten erläutert, wie solche Abflussprojektionen künftig zur Beantwortung von Klimawandel relevanten regionalen und/oder lokalen Fragestellungen in der Wasserwirtschaft verwendet werden können.

Die dargestellten Auswertungen basieren auf einer Vielzahl von Abflussmodellierungen bayerischer Flusseinzugsgebiete. Ziel dieser Modellierungen war es, Tendenzen aufzuzeigen, wie der Klimawandel das Abflussgeschehen in den bayerischen Gewässern zukünftig verändern wird. Dieser Blick in die Zukunft wird durch die Verwendung von Klimamodellen für die Abflussmodellierungen ermöglicht. Klimamodelle lassen sich in Gruppen verschiedener Emissionsszenarios – aktuell in Bayern z. B. „ohne Klimaschutz“ bzw. „2-Grad-Obergrenze“ – zuordnen. Somit bilden auch die daraus resultierenden Abflussmodellierungen entsprechende kongruente Gruppen. Um diese Modellierungen deutlich von Modellierungen der Vergangenheit zu unterscheiden, werden sie als Abflussprojektionen bezeichnet. Der Begriff Projektion wird anstatt Prognose (o. ä.) verwendet, da es sich bei den Emissionsszenarien um verschiedene mögliche Entwicklungspfade der globalen Klimaschutzanstrengungen handelt und nicht um Vorhersagen.

Für die Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen wurden Wasserhaushalts- und Abflussmodelle für die Einzugsgebiete Bayerns aufgesetzt. Die Modelle decken somit nicht nur die Fläche Bayerns ab, sondern die Gesamtfläche aller für Bayern relevanter Flussgebiete. Dieser Raum wird als „hydrologisches Bayern“ bezeichnet. Die Wasserhaushaltsmodelle wurden mit denselben Klimamodellen betrieben, welche im BayKIS zur Abschätzung der künftigen Entwicklung klimatologischer Kennwerte basierend auf verschiedenen Szenarien verwendet werden. Aus den daraus resultierenden simulierten Abflussprojektionen kann eine Abschätzung der zukünftigen Entwicklung des Abflussgeschehens in Bayern erfolgen und Aussagen zum künftigen Hoch- und Niedrigwassergeschehen getroffen werden. Sie können somit eine wichtige Grundlage für die Entwicklung und Umsetzung von Handlungsempfehlungen darstellen und eine fachliche Entscheidungsgrundlage für wasserwirtschaftliche Planungen in den Flussgebieten Bayerns liefern.

Das hier gewählte Vorgehen erfolgte überwiegend im Rahmen der Kooperation KLIWA in Abstimmung mit den Bundesländern Baden-Württemberg, Hessen, Rheinland-Pfalz und Saarland sowie dem Deutschen Wetterdienst. Die verwendete Methodik ist zudem bei vielen anderen Klimawandelstudien in ähnlicher Form angewendet worden:

- Für Bayern wurde diese Methode schon 2012 im Rahmen des Forschungsprojektes „Québec-Bavarian International Collaboration on Climate Change — Klimawandel und Flussgebietsmanagement (QBIC³)“ (QBIC³, 2012) für kleinere Einzugsgebiete untersucht. Ziel des Forschungsvorhabens war u. a. die Untersuchung von Unsicherheiten bezüglich der verwendeten hydrologischen Modelle (Velázquez et al., 2013) und der notwendigen statistischen Skalierung der Klimamolldaten auf das zu untersuchende Einzugsgebiete (Muerth, 2012). Im Projekt „Climate Change and Extreme Events – Risiken und Perspektiven für die Wasserwirtschaft in Bayern (CLIMEX)“ wurde die Methodik erweitert mit dem Fokus auf Extremereignisse (CLIMEX, 2019). Während das erste CLIMEX-Projekt Hochwasserextreme als Schwerpunkt hatte, widmet sich das Folgeprojekt CLIMEX II den Wechselwirkungen und Folgen für Niedrigwasserabflüsse, Trockenheit und Dürre.
- Von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) werden Informationen zu klimawandelrelevanten Themen bezüglich Wasser und Klima seit 2020 über den Basisdienst der „Deutsche(n) Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS)“ (Bundesanstalt für Gewässerkunde, 2023) bereitgestellt. Die BfG hat auch ihrerseits Abflussprojektionen mit einer ähnlichen Methodik für die deutschen Wasserstraßen erstellt, die vergleichbare Ergebnisse liefern. Diese können über das WS-Klimaportal des DAS-Basisdienstes „Klima und Wasser“ abgerufen werden (<https://ws-klimaportal.bafg.de/>).

Zunächst werden die hydrologischen Grundlagen erläutert, die berechneten Kennwerte vorgestellt und die verwendete Methodik zur Beschreibung der Abflussregime erläutert (Kapitel 2.1). Die verwendete Modellkette wird in Kapitel 2.2 beschrieben. Untersucht werden die Auswirkungen zweier Szenarien auf den Abfluss: ein Szenario „mit Klimaschutz“ (RCP2.6) sowie eines „ohne Klimaschutz“ (RCP8.5) (Kapitel 2.3). Diese Szenarien wurden bereits im Klima-Report Bayern 2021 (StMUV, 2021) betrachtet und sind auch Grundlage der verschiedenen Auswertungen des Klimazentrums für die klimatischen Veränderungen in Bayern. Die verwendeten Klimamodelle werden in Kapitel 2.4 vorgestellt. Bevor in Kapitel 2.6 die Methodik zur Berechnung von Klimaänderungssignalen gezeigt und die verwendeten Abbildungsarten beschrieben werden, wird das zur Erstellung der oben genannten Abflussprojektionen verwendete hydrologische Modell vorgestellt (Kapitel 2.5). Zur Einordnung der Ergebnisse werden die Änderungen des Klimas (Kapitel 3) für Bayern kurz vorgestellt.

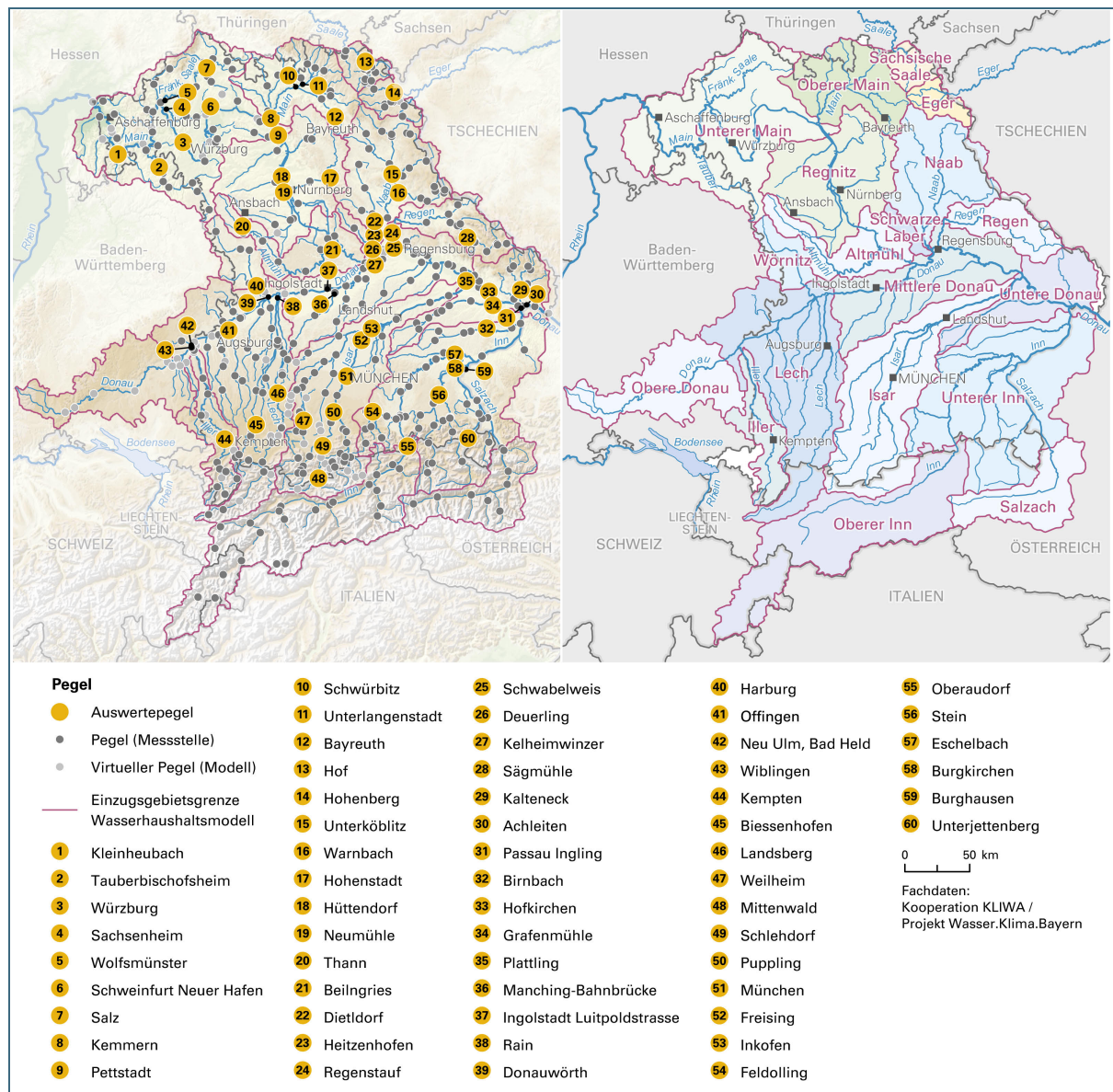


Abb. 1: Am Klimazentrum simulierte Abflusspegel (links) und die Flusseinzugsgebiete für welche ein hydrologisches Modell vorliegt (rechts). In Orange sind die für den Bericht ausgewerteten Pegel dargestellt.

Der Kern dieses UmweltSpezial ist die Auswertung von Abflussprojektionen für Bayern (Kapitel 4). Vorangestellt sind die Änderungssignale der Wasserbilanz in Bayern (Kapitel 4.2) sowie des Abflussregimes bayerischer Flüsse (Kapitel 4.4). Am Klimazentrum liegt für alle Flussgebiete (Abb. 1, rechts)

Bayerns ein hydrologisches Modell vor. Mit diesen Modellen können für 430 Pegelmessstellen Abflussprojektionen erstellt werden. Für dieses UmweltSpezial wurden davon 60 Pegel ausgewählt, die zum einen eine ausreichend gute Performanz aufweisen als auch repräsentativ für Bayern sind (Abb. 1, links). Zur Erstellung der hier ausgewerteten Abflussprojektionen wurden verschiedene Klimamodelle des Bayern-Ensembles (LfU, 2020) verwendet, angelehnt an die bisher für Bayern durchgeführten klimatischen Auswertungen im Rahmen des Klima Reports Bayern 2021 (StMUV, 2021) oder in BayKIS. Nach einer Auswahl an Auswertungen basierend auf beobachteten Abflussdaten in Kapitel 4.5 werden in den darauffolgenden Kapiteln die Ergebnisse der Abflussprojektionen bis zum Jahr 2100 behandelt.

Aus diesen werden verschiedene wasserwirtschaftliche Kennwerte berechnet und deren zukünftige Änderungen ausgewertet und für beide Szenarien „mit Klimaschutz (RCP2.6)“ und „ohne Klimaschutz vorgestellt (RCP8.5)“ (Kapitel 4.6). Kapitel 5 fasst die Ergebnisse der Auswertungen der Abflussprojektionen und somit den Einfluss des Klimawandels auf das künftige Abflussverhalten in Bayern zusammen.

1.3 Länderkooperation KLIWA

Um die Veränderungen des Abflussgeschehens und die daraus resultierenden Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und ihre Folgen für die Wasserwirtschaft zu untersuchen, hat sich 1999 die Kooperation KLIWA „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ als länder- und fachübergreifende Zusammenarbeit gebildet. Aktuell sind die Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Rheinland-Pfalz und Saarland sowie der Deutsche Wetterdienst offizielle Partner der Kooperation (KLIWA, 2023). Das Ziel von KLIWA ist es, fachliche Fragestellungen im Kontext Klimawandel/Wasserwirtschaft gemeinsam zu bearbeiten, Wissen in den Bereichen Meteorologie und Hydrologie zu bündeln, sowie Synergien zu nutzen. Damit einhergehend wird ein einheitliches Vorgehen im süddeutschen Raum für vergleichbare Fragestellungen angestrebt. In KLIWA werden aktuell die Themenbereiche Starkregen und Bodenerosion, Wasser- und Bodenwasserhaushalt, Wassertemperatur sowie Gewässerökologie betrachtet. Die Arbeitsergebnisse wurden in zahlreichen [Publikationen](#) veröffentlicht und in bisher sieben KLIWA-Symposien diskutiert. Die einzelnen Arbeitsbereiche des Projektes sind in Abb. 2 dargestellt.

In der Kooperation wurden wichtige Vorarbeiten geleistet, Expertise und hydrologische Modelle für die Wirkungsmodellierung aufgebaut und Methoden entwickelt, welche nun auf Ebene der einzelnen Bundesländer Anwendung finden. Besonders hervorzuheben ist der alle fünf Jahre erscheinende KLIWA-Monitoringbericht, in dem die Beobachtungen ausgewählter hydrologischer und hydrometeorologischer Kenngrößen dargestellt werden. Der KLIWA-Monitoringbericht 2021 ist über die KLIWA-Website www.kliwa.de verfügbar. Auch liegen aus der Kooperation für Bayern bereits Auswertungen zukünftiger Abflussveränderungen basierend auf dem älteren SRES-A1B-Emissionsszenario und dazugehörige Abflussprojektionen vor. Die SRES-Emissionsszenarien sind der Vorläufer der aktuellen Szenariobetrachtung des IPCC mit den RCP-Szenarien und bildeten die Grundlage des 4. IPCC-Sachstandsberichts (IPCC, 2007). Diese älteren Ergebnisse sind für Bayern u. a. verfügbar als Steckbriefe für die verschiedenen Abflussbereiche [mittlerer Abfluss](#), [Hoch-](#) und [Niedrigwasserabfluss](#). Methodisch folgen diese bereits weitestgehend ebenfalls dem in diesem UmweltSpezial dargestellten Vorgehen.

Ein weiteres wesentliches Ergebnis der Länderkooperation ist die methodische Vereinheitlichung zur Erstellung von Abflussprojektionen. Hier wurden Erkenntnisse und Empfehlungen aus der Forschung adaptiert, um ein einheitliches Vorgehen der beteiligten Bundesländer zu erreichen. Hierzu werden

gemeinsame Auswertungen der von den einzelnen Ländern bereitgestellten Abflussprojektionen durchgeführt (KLIWA, 2022b).

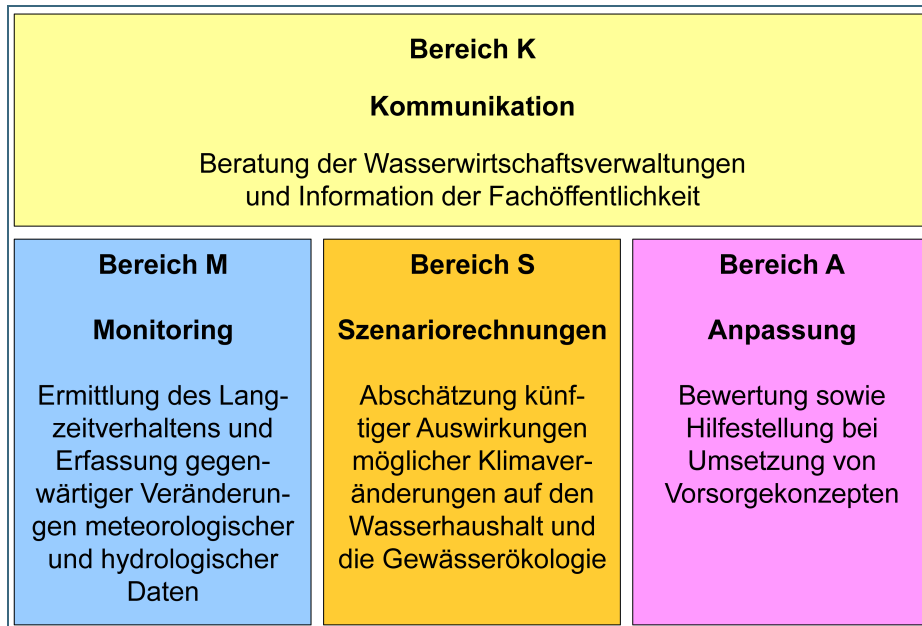


Abb. 2:
Die vier Arbeitsbereiche von KLIWA (KLIWA, 2023).

Insbesondere die Verwendung von Klimaprojektionsensembles zur Bearbeitung klimawandelrelevanter Fragestellungen stellt nun den fachlichen Standard dar. Zu Beginn der Kooperation 1999 wurden meist einzelne Klimaprojektionen einzelner Modelle verwendet, wodurch mögliche Bandbreiten und Unsicherheiten nicht berücksichtigt werden konnten (KLIWA, 2006). Durch die Zusammenarbeit in KLIWA konnten Abläufe bei der Erstellung der Modellkette automatisiert und Werkzeuge zur Bearbeitung entwickelt werden. Im Detail unterscheiden sich die angewandten Methoden zwischen den Ländern leicht. Dies liegt an den unterschiedlichen verwendeten hydrologischen Modellen und der dadurch notwendigen unterschiedlichen Aufbereitung der meteorologischen Eingabedaten. In diesem UmweltSpezial wird das bayerische Vorgehen im Detail beschrieben.

2 Grundlagen und Methodik

2.1 Hydrologische Grundlagen

2.1.1 Die Wasserbilanz und Bezugsjahre

Die Wasserbilanz beschreibt vereinfacht das Gleichgewicht zwischen den hydrologischen Komponenten Niederschlag (P), Verdunstung (ET), dem Speicherterm (ΔS) und dem Abfluss (Q) eines Gebietes für einen definierten Zeitraum und wird über die Wasserhaushaltsgleichung

$$P - ET + \Delta S = Q$$

dargestellt. Sie bezieht sich meist auf das Einzugsgebiet eines Pegels an einem Fließgewässer, also derjenigen Fläche, aus welchem das Gewässernetz seinen Abfluss bezieht. Die Grenzen dieses Gebietes werden als Wasserscheide bezeichnet.

Der Niederschlag (P) ist die wesentlichste Größe der Wasserbilanz. Dieser ist die Voraussetzung dafür, ob für die Verdunstung, zum Beispiel für Pflanzen, genügend Wasser zur Verfügung steht. Die Menge an pflanzenverfügbarem Wasser hängt davon ab, ob dieser bis zu seiner „Verwendung“ im Boden oder Grundwasser gespeichert werden kann und dies ist u. a. davon abhängig, wie viel Niederschlag in den Boden einsickern und wie viel Wasser der Boden pro Zeiteinheit aufnehmen – infiltrieren – kann. Steigt die Intensität des Niederschlags, fällt also mehr Niederschlag über einen kürzeren Zeitraum, kann bei gleicher Niederschlagsmenge weniger Wasser vom Boden aufgenommen werden (Starkniederschläge).

Die Verdunstung (ET) beschreibt den Übergang von Wasser vom flüssigen in den gasförmigen Zustand unterhalb des Siedepunktes. Sie ist u. a. von der relativen Luftfeuchte abhängig. Diese wiederum ist abhängig von der Lufttemperatur, da die Fähigkeit der Luft, Wasserdampf aufzunehmen mit zunehmender Lufttemperatur steigt. Der Einfluss der Lufttemperatur auf die Verdunstungsraten kann zwar schwanken, grundsätzlich erhöhen sich jedoch die Verdunstungsraten durch höhere Temperaturen, falls genügend Wasser vorhanden ist. Es ist also damit zu rechnen, dass sich die Menge an verdunstendem Wasser in einem humiden Klima – es ist immer genügend Wasser für die Verdunstung vorhanden – erhöhen und somit auch die Wasserbilanz beeinflussen wird. Sollte allerdings bei einem sich verändernden Klima und Wasserhaushalt nicht mehr ausreichend Wasser vorhanden sein, wird sich das auch limitierend auf die Verdunstung auswirken.

Der Speicherterm (ΔS) beschreibt die Änderungen aller im Gebiet vorhandenen (Wasser-)Speicher. Dies ist zum Beispiel der sich während eines Jahres stark ändernde Speicher der Schneedecke. Für Bayern gilt näherungsweise, dass sich dieser am Ende eines Jahres beginnt aufzubauen, um im Laufe des Folgejahres wieder abzuschmelzen. Deshalb verwendet man bei der Betrachtung hydrologischer Sachverhalte nicht das Kalenderjahr, sondern das hydrologische Jahr (01.11. bis 31.10.). Ein anderer Bezugszeitraum, welcher bei den vorliegenden Betrachtungen verwendet wird, ist das Wasserhaushaltsjahr (01.04. bis 31.03.). Während sich das hydrologische Jahr hauptsächlich aus dem Zyklus der Schneedecke ergibt, bildet das Wasserhaushaltsjahr den Zyklus der Grundwasserspeicher ab. Für den Grundwasserspeicher kann für Bayern näherungsweise angenommen werden, dass sich dieser während der Vegetationsperiode vom Frühjahr bis zum Herbst reduziert, um im Winter wieder aufgefüllt zu werden. Im Idealfall beträgt die Bilanz des Grundwasserspeicherterms innerhalb eines Wasserhaushaltsjahres Null. Da sich der Basisabfluss der bayerischen Flüsse hauptsächlich aus den Grundwasserspeichern speist, wird deshalb das Wasserhaushaltsjahr für Niedrigwasserkennwerte verwendet. Wegen der zwischenjährlichen Variabilität kann dies jedoch in der Realität nicht für einzelne Jahre angenommen werden. Bei gleichbleibendem Klima stellt sich jedoch langfristig ein Gleichgewicht ein, womit diese Aussage für das langjährige Mittel zutreffend ist. Bei einem sich ändernden

Klima muss jedoch davon ausgegangen werden, dass dieses Gleichgewicht gestört wird und sich Veränderungen in den Speichern einstellen. Eine Berechnung der Grundwasserneubildung steht jedoch bei den hier durchgeführten Betrachtungen nicht im Fokus, dieser liegt auf der Betrachtung des Abflussverhaltens. Dennoch ermittelt das Wasserhaushaltsmodell intern Grundwasserneubildungsraten zur Abbildung der Wasserhaushaltsbilanz. Gezielte Betrachtungen der Entwicklung der Grundwasserneubildung erfolgen am LfU u. a. in KLIWA mit eigenen Modellierungen zur Erstellung von Grundwasserneubildungsprojektionen mit einem Bodenwasserhaushaltsmodell.

Andere kurz- und langfristig wirkende Speicher sind beispielsweise der Interzeptionsspeicher der Vegetation, der Oberflächenspeicher beziehungsweise das Rückhaltevermögen der Landoberfläche, der Bodenwasserspeicher und der Speicher in Gerinnen oder Seen. Diese Speicher sind ebenfalls Teil des Speicherterms ΔS .

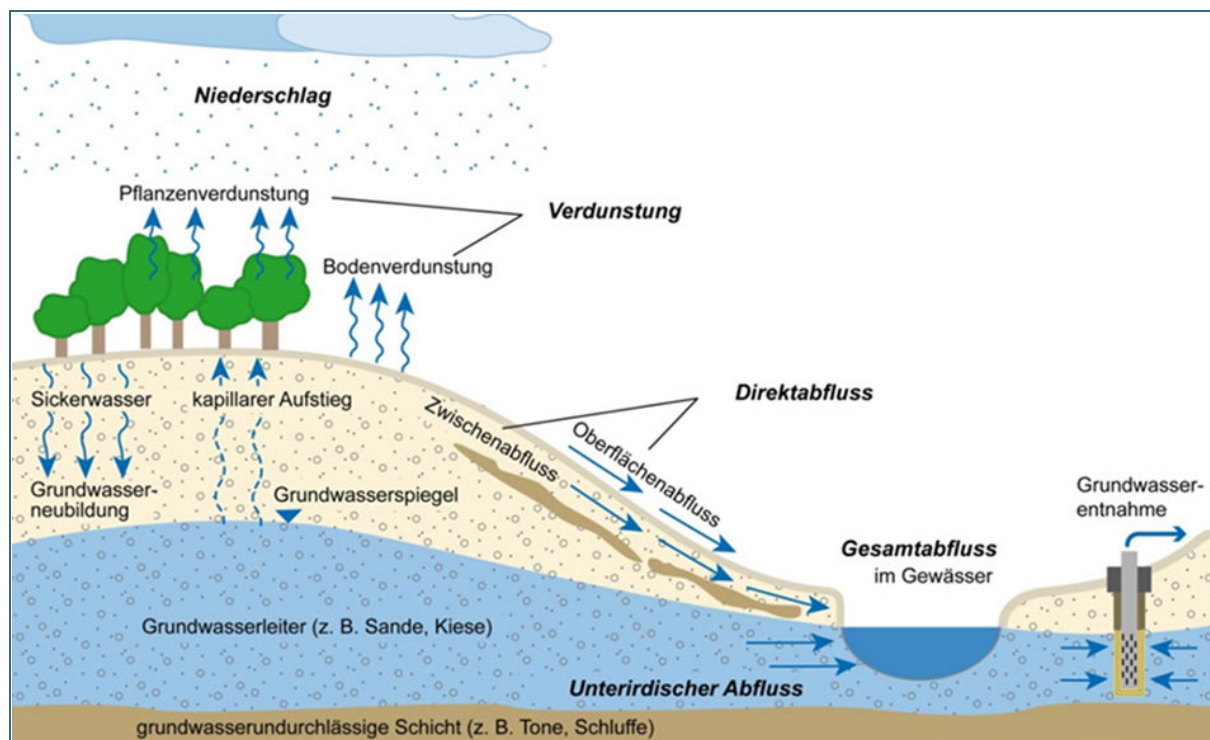


Abb. 3: Detaillierte Darstellung des Wasserkreislaufes. Die Größen der Wasserbilanz lassen sich weiter in kleinere Bestandteile unterteilen. Mit der Grundwasserentnahme ist auch dargestellt, wie der Mensch in das Gleichgewicht eines Gebietes eingreifen kann (KLIWA, 2023).

Der Abfluss eines Gebietes (Q) ist also abhängig von den drei Größen P , ET sowie dem Speicherterm ΔS . Für Bayern stehen viele beobachtete Pegeldata zur Verfügung, anhand derer Veränderungen im Abflussverhalten der Flüsse festgestellt werden können (Abb. 1, links). Jedoch kann man aus den Veränderungen nicht direkt auf die ursächliche oder dominante Komponente in der Wasserbilanz schließen, auf der ein verändertes Abflussverhalten basiert. Wasserhaushaltsmodelle simulieren alle genannten Größen der Wasserbilanz. Zudem erlauben sie auch den flächenhaften Abfluss genauer zu betrachten. Differenziert werden dabei unterschiedlich schnelle Komponenten, also wie schnell ein Abfluss im Gerinne wirksam wird. Unterschieden wird dabei wie in Direktabfluss (Oberflächenabfluss), Zwischenabfluss und Basisabfluss (Unterirdischer Abfluss). Die Größen der Wasserbilanz können Aufschluss darüber geben, bis zu welchem Grad eine Veränderung der Komponenten der Wasserhaushaltsgleichung Einfluss auf den Abfluss hat. In Abb. 3 sind verschiedene Prozesse der Wasserbilanz schematisch dargestellt, welche sich auf den Abfluss auswirken.

2.1.2 Das Abflussregime

Während die Wasserbilanz das langjährige Gleichgewicht der einzelnen Komponenten des Wasserkreislaufes beschreibt, wird die durch das Klima bestimmte Saisonalität des Abflusses über das Abflussregime dargestellt. Dabei wird bei der Analyse der Abflussdaten, wie im vorangegangenen Kapitel ausgeführt, das vom Kalenderjahr abweichende hydrologische Jahr oder auch das Wasserhaushaltsjahr verwendet. Für die Wasserwirtschaft ist die Saisonalität des gebildeten Abflusses, also wann während eines Jahres es viel bzw. weniger Abfluss gibt, von sehr großer Bedeutung.

Dominiert wird das Abflussregime vom vorherrschenden Klima in einem Einzugsgebiet. Es ist beispielsweise abhängig davon, wann während eines Jahres ein Niederschlagsmaximum auftritt oder winterliche Temperaturen den Aufbau einer Schneedecke zulassen, das den Niederschlag zunächst im Einzugsgebiet hält. Neben dem Klima haben das Relief, die Vegetation und die hydrogeologischen Eigenschaften des Gebietes Einfluss auf die Art des Abflussregimes. Eine Typisierung von Fließgewässern gemäß ihrem Abflussregime erlaubt Rückschlüsse auf wahrscheinliche Eintrittszeitpunkte und Intensitäten von Niedrig- und Hochwasserphasen und ist deshalb ein wichtiges hydrologisches Werkzeug.

Zur Bestimmung der Abflussregime wurde die Methode nach Grimm gewählt (Grimm, 1968). Diese Methode besitzt allgemeine Gültigkeit für europäische Flusssysteme. Bei diesem Ansatz werden die typisierten mittleren Abflussganglinien in verschiedene Kennziffern übersetzt (I bis III). Zunächst werden die Intensität und der Eintrittsmonat der beiden abflussreichsten Doppelmonate bestimmt (I). Durch die Betrachtung des Doppelmonats sollen Verzerrungen durch zufällige Standortwahlen ausgeglichen werden. Die Intensität wird über den Quotienten aus dem mittleren Abfluss (MQ) im abflussreichsten Doppelmonat und dem MQ im Gesamtjahr ermittelt. Beträgt der MQ des abflussreichsten Doppelmonats weniger als das Doppelte des MQ des abflussärmsten Doppelmonats, wird der Abflussgang als ausgeglichen definiert. Das Abflussminimum wird ebenfalls hinsichtlich seiner Intensität und seines Eintrittszeitpunkts untersucht (II). Eine weitere Unterscheidung wird anhand der (Jahres-) Abflussspenden vorgenommen (III). Hierfür wird der Abfluss in Beziehung zur Einzugsgebietsfläche gesetzt. Die Abflussspende ermöglicht somit einen einfacheren Vergleich der Rahmenbedingungen verschiedener Einzugsgebiete. Auf diese Weise hat Grimm, 1968, für Europa 55 verschiedene Abflussregime unterschieden, für deren Benennung er jeweils einen charakteristischen Flussnamen wählte.

Die Regimetypen werden in neun Gruppen eingeteilt bzw. systematisiert, die sich wiederum in den drei Hauptkategorien pluvial, nival und nivo-pluvial zusammenfassen lassen. Bei den pluvialen Regimen liegt der abflussreichste Doppelmonat in den Herbst- oder Wintermonaten September/Oktober bis Februar/März. Die nivo-pluvialen Regime haben den abflussreichsten Doppelmonat zwischen den Frühjahrs- und Sommermonaten März/April und Mai/Juni. Das Abflussmaximum bei den nivalen Regimen ist aufgrund der einsetzenden Schneeschmelze im Frühjahr/Sommer.

Zur Normalisierung der monatlichen Abflüsse wird der Pardé-Koeffizient (Hendl et al., 1997) genutzt. Er beschreibt das jeweilige Verhältnis des durchschnittlichen monatlichen Abflusses zum durchschnittlichen Abfluss für das Gesamtjahr. Abb. 4 zeigt den Koeffizienten für drei exemplarische Pegel in Bayern.

Die Einzugsgebiete der drei ausgewählten Pegel umfassen annähernd das gesamte hydrologische Bayern und bilden die drei in Bayern aktuell vorherrschenden Regimetypen ab (Abb. 4). Sehr gut erkennbar ist, dass der nördliche, pluvial beeinflusste Pegel Kleinheubach und der südliche, alpin bzw. nival beeinflusste Pegel Passau-Ingling ihr Maximum an unterschiedlichen Zeitpunkten im Jahr aufweisen, während der Pegel Hofkirchen ein sehr ausgeglichenes Regime aufweist (nivo-pluvial). Bei Auswertung aller Pegel nimmt der Einfluss der Schneeschmelze von Norden nach Süden zu, während der Einfluss des Niederschlagsregimes Richtung Norden zunimmt. Im Übergangsbereich zeigen sich verschiedene Abstufungen der nivo-pluvialen Mischregime. Aus diesem Grund sollen diese drei Pegel

im Weiteren als Beispielpegel für charakteristische bayerische Abflussregime dienen. Der Jahresgang der Abflussregime für die 60 Auswahlpegel findet sich im Ergebnisteil (Kapitel 4.4).

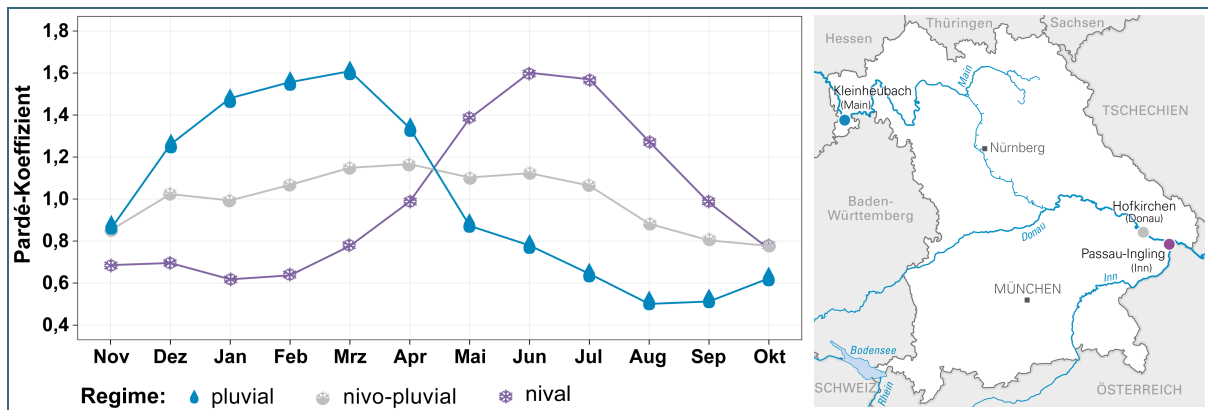


Abb. 4: Die drei Hauptkategorien der Abflussregimetypen. Dargestellt sind die Pardé-Koeffizienten von drei Pegeln bayerischer Einzugsgebiete (Passau-Ingling: Nival, Hofkirchen: Nivo-Pluvial und Kleinheubach: Pluvial).

2.1.3 Betrachtete Abflusskennwerte

Im vorangegangenen Kapitel wurde ein qualitatives Kriterium des Abflussregimes vorgestellt, die Lage des abflussreichsten Doppelmonats im Jahr. Um den Abfluss auch quantitativ zu beschreiben, werden in der Wasserwirtschaft gewässerkundliche Kennwerte verwendet. Sie können für verschiedene Zeiträume und Jahresabschnitte berechnet werden. Über den „[Gewässerkundlichen Dienst \(GKD\)](#)“ können zahlreiche dieser Kennwerte für beobachtete Pegelzeitreihen zusammen mit weiterführenden Informationen zum jeweiligen Pegel abgerufen werden. Abb. 5 zeigt den gemessenen Abfluss der drei Beispielpegel für das Jahr 2024 sowie eine Auswahl an berechneten Kennwerten. Die dargestellten fünf Kennwerte umfassen den Niedrigwasserabfluss (NQ), den mittleren Niedrigwasserabfluss (MNQ), den MQ, den mittleren Hochwasserabfluss (MHQ) sowie den Hochwasserabfluss (HQ). Sie werden als gewässerkundliche Hauptwerte bezeichnet (s. u.).

Gängig ist auch die Angabe von Jährlichkeiten, d. h. die Angabe eines maximalen Abflusses, der im statistischen Mittel alle x Jahre überschritten wird. Für Hochwasserschutzmaßnahmen ist häufig der HQ_{100} maßgebend, also Abflüsse, die statistisch alle 100 Jahre einmal erreicht werden. Je länger eine Zeitreihe ist, desto robuster kann man eine solche Extremwertstatistik durchführen. Da im Rahmen des Berichts zur Berechnung der Jährlichkeiten 30-jährige Zeitreihen verwendet wurden, wird für die Analyse der Zukunftsentwicklungen von Hochwasserjährlichkeiten lediglich der HQ_{50} und HQ_5 zu verwendet. Zusätzlich gilt zu beachten, dass Hochwasserjährlichkeiten anhand zeitlich hochaufgelösten Daten berechnet werden sollten. Gegenwärtig liegen jedoch nur Tageswerte vor.

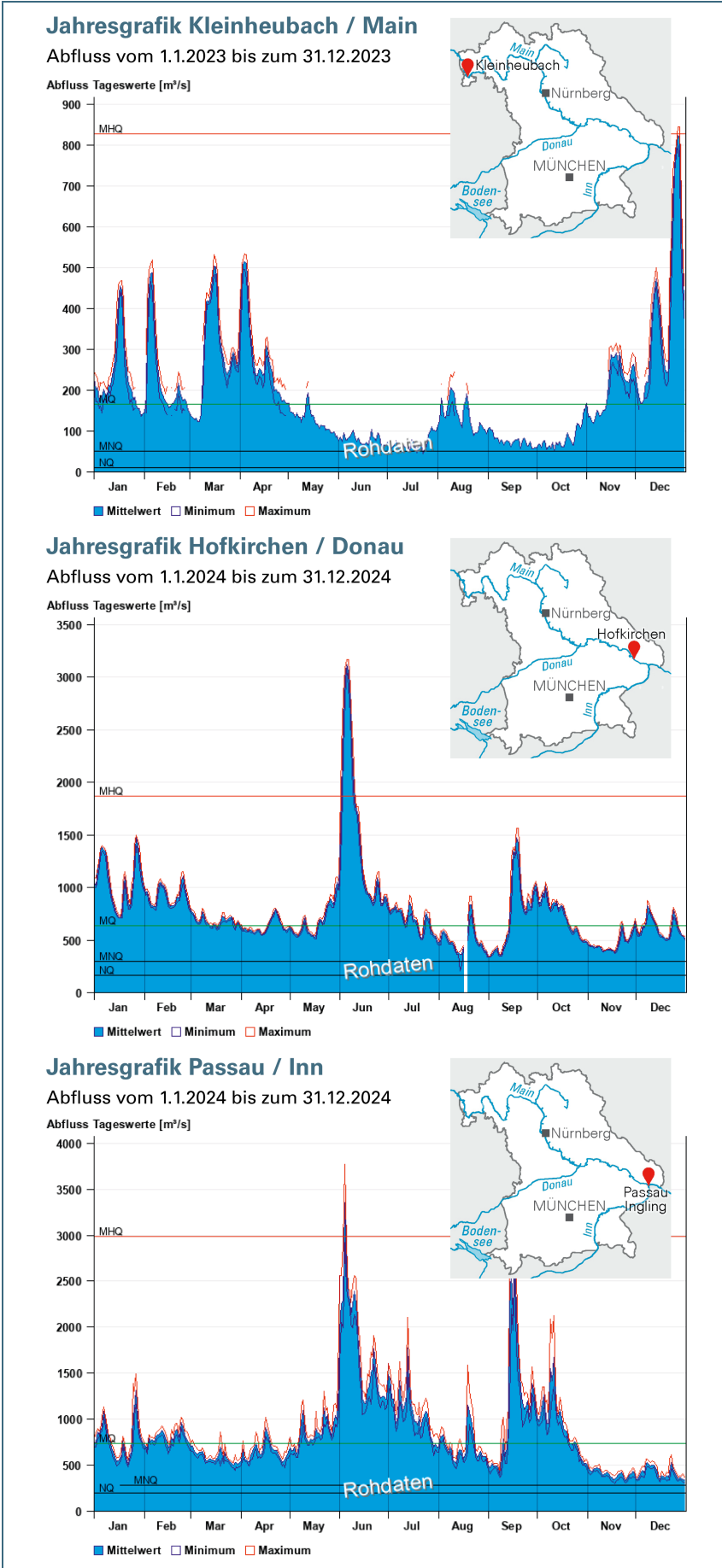


Abb. 5: Jahresgrafik (Screenshots) aus dem „Gewässerkundlichen Dienst Bayern“ für die drei Beispielpegel an Main, Donau und Inn (Gewässerkundlicher Dienst Bayern, 2025).

Die verwendeten Kennwerte im Überblick:

Gewässerkundliche Hauptwerte:

- **Mittlerer Abfluss MQ:**
Arithmetischer Mittelwert des täglichen Durchflusses über einen festgelegten Zeitraum.
→ Bezugsjahresabschnitt ist das hydrologische Jahr (November bis Oktober).
- **Niedrigwasserabfluss NQ:**
Geringster gemessener Tagesdurchfluss innerhalb eines festgelegten Zeitraums (meist >30 Jahre). Bezogen auf einzelne Jahresabschnitte (Jahr, Halbjahre, Quartale, Monate) können dagegen auch NQ-Serien ausgegeben werden. Diese enthalten pro Jahresabschnitt und Jahr eines Zeitraums jeweils einen Wert. Beispiel: Serie des sommerhalbjährlichen NQ im Zeitraum 1971–2000.
→ Bezugsjahresabschnitt ist das Wasserhaushaltsjahr (April bis März).
- **Mittlerer Niedrigwasserabfluss MNQ:**
Arithmetischer Mittelwert über einen längeren Zeitraum (meist >30 Jahre) einer jährlichen Serie der jeweils geringsten Abflusswerte eines Jahres. Soll sich der Kennwert auf eine andere Zeitspanne beziehen (z. B. hydrologische Halbjahre, Monate, ...), bezieht sich die jährliche Serie nur auf die Zeitspanne für welche der Kennwert berechnet werden soll.
→ Bezugsjahresabschnitt ist das Wasserhaushaltsjahr (April bis März).
- **Hochwasserabfluss HQ:**
Höchster gemessener Tagesdurchfluss innerhalb eines festgelegten Zeitraums (meist >30 Jahre). Bezogen auf einzelne Jahresabschnitte (Jahr, Halbjahre, Quartale, Monate) können dagegen auch HQ-Serien ausgegeben werden. Diese enthalten pro Jahresabschnitt und Jahr eines Zeitraums jeweils einen Wert. Beispiel: Serie des sommerhalbjährlichen HQ im Zeitraum 1971–2000.
→ Bezugsjahresabschnitt ist das hydrologische Jahr (November bis Oktober).
- **Mittlerer Hochwasserabfluss MHQ:**
Arithmetischer Mittelwert über einen längeren Zeitraum (meist >30 Jahre) einer jährlichen Serie der jeweils höchsten Abflusswerte eines Jahres. Soll sich der Kennwert auf eine andere Zeitspanne beziehen (z. B. hydrologische Halbjahre, Monate, ...), bezieht sich die jährliche Serie nur auf die Zeitspanne für welche der Kennwert berechnet werden soll.
→ Bezugsjahresabschnitt ist das hydrologische Jahr (November bis Oktober).

Weitere Niedrigwasser kennwerte:

- **SumD:**
Gesamt-Anzahl von Tagen innerhalb eines Jahres, an denen Wasserstand oder Durchfluss einen festgelegten Schwellenwert unterschreiten. Der **SumD** als Einzelwert stellt den langjährigen Mittelwert dar. Als Standardschwellenwert gilt der **MNQ**. Je nach Fragestellung sind auch andere Schwellenwerte möglich.
→ Bezugsjahresabschnitt ist das Wasserhaushaltsjahr (April bis März).

Jährlichkeiten:

- **HQ₅₀ und HQ₅:**
Hochwasserabflüsse, die im langjährigen Mittel statistisch alle 50 Jahre oder alle 5 Jahre erreicht werden.
- **NQ₅₀ und NQ₅:**
Eine Extremwertstatistik kann auch auf Basis von Niedrigwasserereignissen berechnet werden. Im Bericht werden Niedrigwasserereignisse, welche statistisch alle 50 (**NQ₅₀**) bzw. alle fünf Jahre (**NQ₅**) vorkommen, dargestellt.

2.2 Die Modellkette

Um den Einfluss des Klimawandels auf den Abfluss abzuschätzen, können zwei Methoden abhängig von der Art der verfügbaren Daten verwendet werden. Die erste Methode ermöglicht Aussagen über die beobachteten Änderungen, die zweite Methode Aussagen über zukünftige Änderungen des Abflussgeschehens:

1. Durch die Analyse gemessener Zeitreihen von Pegelraten können Trends berechnet oder bereits stattgefundenen Änderungen identifiziert werden. Beispielsweise kann aus diesen Daten festgestellt werden, ob Extremereignisse häufiger geworden sind, wenn die Zeitreihe hierfür ausreichend lang ist. Durch die regelmäßige Fortschreibung solcher Trenduntersuchungen kann zudem festgestellt werden, ob sich Trends verstärken oder wieder abschwächen. In der Kooperation KLIWA wird dies alle fünf Jahre durchgeführt. Die Ergebnisse werden in Monitoringberichten auf der KLIWA-Webseite veröffentlicht (KLIWA, 2022a).

2. Zukünftige Abflüsse können durch hydrologische Modelle simuliert werden, indem sie als Antrieb meteorologische Ausgaben von Klimamodellen verwenden. Da Klimamodelle als Rahmenbedingungen verschiedene Szenarien, z. B. für die Treibhausgasemissionen nutzen, können aus den so erstellten Abflussprojektionen mögliche zukünftige Veränderungen für unterschiedliche Zeiträume und unterschiedliche Entwicklungspfade abgeleitet werden. Viele Anpassungsmaßnahmen in der Wasserwirtschaft sind auf einen längeren Planungshorizont ausgerichtet. Verwendet man Klimamodelldaten als meteorologische Eingangsdaten für hydrologische Modelle, kann man das zukünftige Abflussgeschehen in Bayern bis ins Jahr 2100 abschätzen beziehungsweise den Zeitraum für welche die Anpassungsmaßnahmen ausgelegt sein sollen.

Für letztere Methodik, welche hauptsächlich für die Erstellung der hier dargestellten Ergebnisse verwendet wurde, ist die Abarbeitung einer Modellkette nötig. Abb. 6 zeigt die komplette Modellkette vom Emissionsszenario bis zum Wasserhaushaltsmodell.

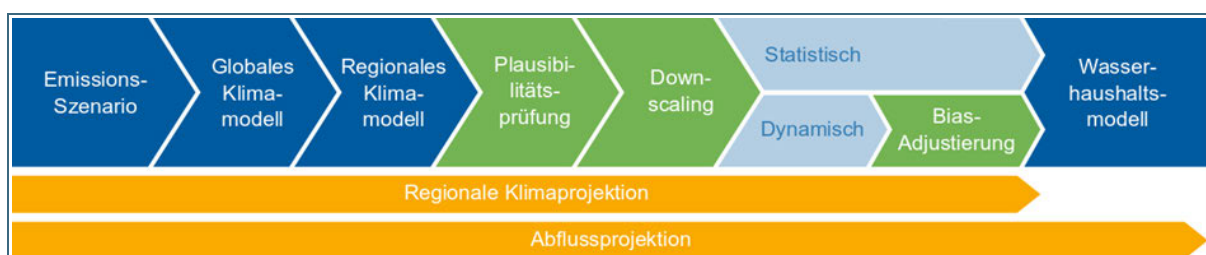


Abb. 6: Allgemeines Schema der Modellkette von der Klima- zur Wasserhaushaltsmodellierung.

Klimamodelle simulieren das künftige Klima unter Annahme verschiedener möglicher globaler Entwicklungen beziehungsweise veränderter Rahmenbedingungen. Wie bei Wettervorhersagemodellen erhält man so zeitlich hoch aufgelöste Zeitreihen für meteorologische Variablen (z. B. Temperatur und Niederschlag). Somit steht für jeden Lauf eines Klimamodells eine durchgängige Zeitreihe von der Vergangenheit bis in die Zukunft zur Berechnung von Klimasignalen zur Verfügung.

Die Ergebnisse einer Klimamodellierung werden als (Klima-)Projektion bezeichnet und sind dabei immer das Produkt einer Modellkette. Am Anfang dieser Kette stehen die Emissionsszenarien. Auf deren Annahmen basierend berechnen "Globale Klimamodelle (GCM)" das künftige Klima. Die zugrundeliegenden Emissionsszenarien werden im nachfolgenden Kapitel gesondert beschrieben, da ihr Verständnis essenziell ist, um die verschiedenen Entwicklungspfade hinsichtlich der Treibhausgasemissionen zu unterscheiden.

Je nach Fragestellung und Entwicklungszeitpunkt können sich Klimamodelle in ihrer Beschaffenheit und Komplexität, sowie der Abbildung bestimmter klimatischer Prozesse unterscheiden. Während einfache Modelle häufig nur atmosphärische Prozesse abbilden und weitere Vorgänge parametrisieren, berechnen Erdsystemmodelle zusätzlich die physikalischen und chemischen Prozesse innerhalb zusätzlicher Komponenten des Erdsystems. Mittlerweile existieren eine Vielzahl an globalen Klimamodellen. Alle derzeitigen Globalmodelle besitzen aufgrund des enormen Rechenaufwandes eine Rasterweite von mindestens 100 km. Diese Auflösung ist jedoch für differenzierte Aussagen über einzelne Regionen zu grob.

Für kleinräumigere Betrachtungen werden "Regionale Klimamodelle (RCM)" genutzt, da mit ihnen höhere räumliche Auflösungen von 25 bis zu 7 km realisiert werden können. Neuere konvektionserlaubende Modellierungsansätze haben eine höhere Auflösung, standen aber für die hier durchgeführten Modellierungen noch nicht zur Verfügung. In KLIWA wurde ein solches konvektionserlaubendes Ensemble im Rahmen eines Kurzberichtes ausgewertet (KLIWA, 2024).

Generell kann bei der Betrachtung von regionalen Klimamodellen zwischen statistischen und dynamischen Modellen unterschieden werden (Brasseur et al., 2016):

- Statistische Regionalmodelle stellen einen Zusammenhang zwischen großräumigen meteorologischen Mustern aus Klimamodellprojektionen der Vergangenheit und gemessenen Stationsdaten her. Auf diese Weise können an den Messstationen aus Ergebnissen von globalen Klimamodellen für die zukünftige Entwicklung Zukunftszeitreihen für die entsprechenden meteorologischen Variablen generiert werden. Die meist punktuell vorliegenden Daten werden anschließend auf die Fläche interpoliert. Statistische Regionalmodelle haben also keine räumliche Auflösung im eigentlichen Sinne. Da diese Modelle nur innerhalb Deutschlands zur Verfügung standen, relevante Einzugsgebiete für die Gewässer Bayerns jedoch auch außerhalb Deutschlands liegen, konnten diese nicht verwendet werden. Für frühere Berechnungen von Veränderungen des Abflusses in Bayerns wurden diese bereits genutzt.
- Dynamische Regionalmodelle simulieren genau wie globale Klimamodelle den physikalischen Zusammenhang zwischen den Komponenten des Klimasystems, allerdings in einem regional beschränkten Ausschnitt, z. B. Europa. Dies erlaubt eine bessere räumliche Auflösung der Modellierung. Die Rahmenbedingungen für die regionalen Klimamodelle stammen dabei aus einem Globalmodell. Das regionale Klimamodell ist somit in das globale Modell eingebettet und nutzt dieses als Antrieb.

Dynamische Klimaprojektionen können eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Abweichung vom gemessenen Klimageschehen aufweisen. Diese Abweichung wird über ein Auditverfahren zunächst bewertet (Plausibilitätsprüfung). Folgt die Abweichung einem regelmäßigen Muster, so wird von einem Bias – einem systematischen Fehler – gesprochen. Dieser Bias kann mit Hilfe verschiedener Methoden korrigiert werden. Am LfU erfolgt die Bias-Adjustierung, also die Korrektur der systematischen Fehler, mit Hilfe des Quantile Mappings. Dabei wird aus den Werten eines Referenzdatensatzes aus Beobachtungsdaten und den entsprechenden Werten eines Klimamodells eine Transferfunktion für die Korrektur der Verteilung der Werte abgeleitet und angewendet (LfU, 2020).

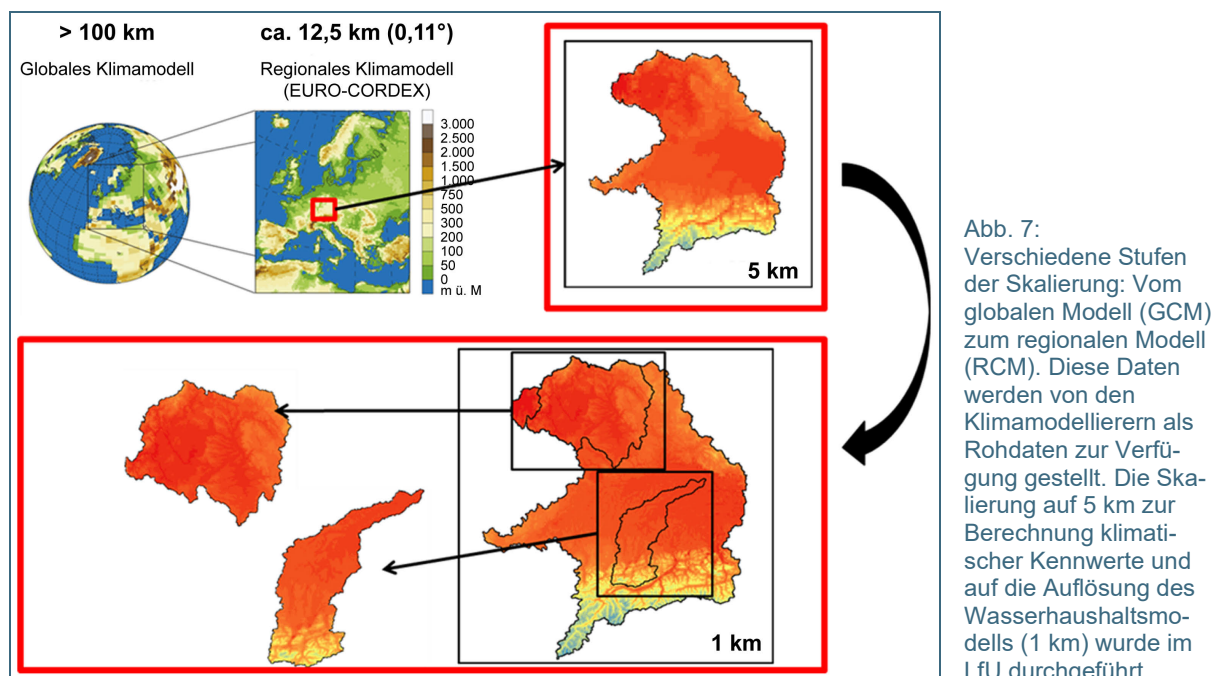


Abb. 7: Verschiedene Stufen der Skalierung: Vom globalen Modell (GCM) zum regionalen Modell (RCM). Diese Daten werden von den Klimamodellierern als Rohdaten zur Verfügung gestellt. Die Skalierung auf 5 km zur Berechnung klimatischer Kennwerte und auf die Auflösung des Wasserhaushaltsmodells (1 km) wurde im LfU durchgeführt.

Die in Bayern verwendeten regionalen Klimamodelle haben eine einheitliche, räumliche Auflösung von 12,5 km. Um eine regionale und lokale Auswertung zu ermöglichen und topographische Eigenschaften zu berücksichtigen, wurden diese Datensätze zunächst auf eine Auflösung von 5 km skaliert. Dieser Prozess wird als Downscaling bezeichnet. Basierend auf dem SCALMET-Verfahren zur Skalierung rasterbasierter Klimadaten (Marke, 2008) wurden die meteorologischen Größen Temperatur,

Niederschlag und relative Feuchte skaliert. Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit werden einfach bilinear räumlich berechnet.

Auf dieser Ebene wird anschließend eine Bias-Adjustierung durchgeführt, um systematische Fehler zwischen den beobachteten Werten und den Projektionen zu eliminieren. Für die Bias-Adjustierung wurde der am Klimazentrum aus Messdaten erstellte Referenzdatensatz KliRef2020 verwendet. Dieser wurde auf Grundlage der für die Kalibrierung der Wasserhaushaltsmodelle verwendeten Meteorologie entwickelt (siehe Kapitel 2.4.1).

Um den Einfluss des (zukünftigen) Klimawandels auf den Abfluss zu untersuchen, werden in Bayern im Rahmen von KLIWA anschließend sogenannte Wirkungsmodellierungen durchgeführt. Dazu wird in der Modellkette dem regionalen Klimamodell noch ein weiteres Modell zur Untersuchung der Auswirkungen auf den Abfluss hinten angestellt. Bei dem verwendeten Wirkungsmodell handelt es sich um das Wasserhaushaltsmodell WaSiM (WASIM, 2023), welches für alle Flussgebiete Bayerns aufgesetzt wurde. Dieses nutzt die Ergebnisse regionaler Klimaprojektionen als Antrieb. Da die räumliche Auflösung des verwendeten Wirkmodells WaSiM einen Kilometer beträgt, wurden die bias-adjustierten 5 km Daten auf eine Auflösung von einem Kilometer wiederum mit dem oben beschriebenen Verfahren skaliert. Aus den resultierenden klimatischen Daten konnten anschließend die jeweils benötigten Raumumgriffe für die einzelnen Flussgebietsmodelle ausgeschnitten werden.

2.3 Die RCP-Szenarien

Bei der Simulation des Klimas über mehrere Jahrzehnte in die Zukunft ist davon auszugehen, dass die Rahmenbedingungen der Klimaentwicklung mit Unsicherheiten behaftet sind. So ist z. B. unklar, wie sich die Menge an Treibhausgasen in der Luft durch anthropogene Einflüsse in den nächsten 100 Jahren ändern wird. Um mögliche Veränderungen der anthropogenen Rahmenbedingungen zu beschreiben, werden deshalb verschiedene Szenarien genutzt. Im Rahmen des 5. IPCC-Sachstandsberichts (IPCC, 2014) werden die sogenannten Repräsentativen Treibhausgas-Konzentrationspfade („Representative Concentration Pathways“, RCPs) genutzt.

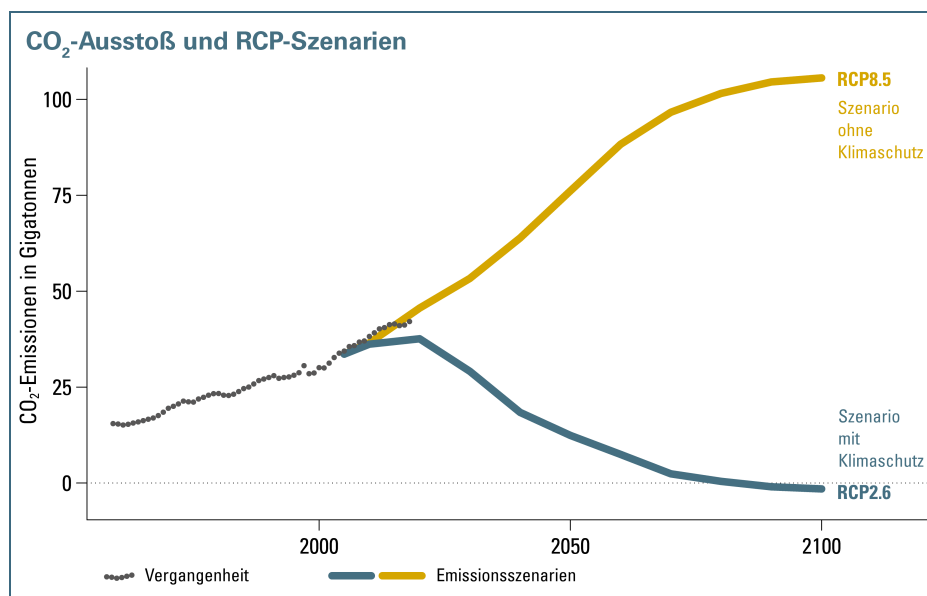


Abb. 8: Entwicklung der CO₂ Emissionen der verwendeten RCP-Szenarien („Representative Concentration Pathways“) (LfU, 2022a).

Diese dienen in der Wissenschaft als plausible Beschreibung möglicher zukünftiger Entwicklungen von Treibhausgaskonzentrationen (van Vuuren et al., 2011). Die RCP-Szenarien unterscheiden sich somit darin, welche globale Erwärmung sie als Endpunkt für das Jahr 2100 definieren. Sie integrieren

dabei viele Faktoren, die Emissionen von Treibhausgasen genauso wie z. B. Landnutzungsänderungen. Daraus berechnen die Klimamodelle die Veränderungen des Klimas. Um eine möglichst große Bandbreite an Ergebnissen zu generieren und um die potentiellen Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt zu simulieren, nutzt das verwendete Wasserhaushaltsmodell WaSiM zwei dieser RCP-Szenarien (siehe Abb. 8). Die in Bayern und am Klimazentrum für die klimatischen Veränderungen in Bayern verwendeten Szenarien repräsentieren einerseits eine positive Entwicklung hinsichtlich des Klimaschutzes (RCP2.6) und andererseits das Fehlen signifikanter Klimaschutzmaßnahmen (RCP8.5, siehe Kasten unten).

Die verwendeten Szenarien für die Abflussprojektionen:

- **Szenario mit Klimaschutz / „2 °C-Obergrenze“**
RCP2.6 wird charakterisiert durch sehr geringe Treibhausgasemissionen, eine geringe bis mittlere Luftverschmutzung und einem mittleren Anstieg von landwirtschaftlich genutzten Flächen. Damit beschreibt RCP2.6 ein Szenario mit Klimaschutz, bei dem der Anstieg der globalen Mitteltemperatur im Einklang mit dem Pariser Klimaschutzabkommen auf maximal 2,0 °C gegenüber dem vorindustriellen Klima begrenzt werden könnte.
- **Szenario „ohne Klimaschutz“**
RCP8.5 ist definiert durch hohe Treibhausgasemissionen, mittel bis hohe Luftverschmutzung und einen mittleren Anstieg landwirtschaftlich genutzter Flächen. Daher wird diese Entwicklung als Szenario ohne Klimaschutz bezeichnet (van Vuuren et al., 2011).

Eine ausführliche Beschreibung der RCP-Szenarien ist im Klimareport Bayern 2021 zu finden (StMUV, 2021).

2.4 Verwendete Klimadaten zur Erstellung von Abflussprojektionen

Das Wasserhaushaltsmodell benötigt fünf meteorologische Variablen als Eingangsdaten:

- Temperatur in °C
- Niederschlag in mm
- relative Feuchte in %
- Windgeschwindigkeit in m/s
- Globalstrahlung in Wh/d

Diese müssen sowohl für den Beobachtungszeitraum als auch aus den Klimaprojektionen vorliegen.

2.4.1 Meteorologische Beobachtungsdaten

In Kapitel 2.2 wurde beschrieben, dass zur Erstellung von Abflussprojektionen mittels eines Wasserhaushaltsmodell bias-adjustierte regionale Klimamodelle verwendet werden. Dafür wird ein meteorologischer Beobachtungsdatensatz benötigt, welcher auch für die Erstellung der Wasserhaushaltsmodelle verwendet wird. Um eine realistische Abbildung der Abflüsse für die Flussgebiete zu simulieren, werden die hydrologischen Modelle zunächst aufgestellt sowie mit gemessenen meteorologischen Daten angetrieben und kalibriert. Da das Wasserhaushaltsmodell die Abflussbildung mittels physikalischer Prozesse beschreibt und räumlich differenziert simuliert, ist auch bei den meteorologischen Antriebsdaten ein flächenhafter Datensatz nötig. Diese meteorologischen Messdaten liegen üblicherweise aber nur punktuell an den Stationsstandorten vor, weshalb die Werte für die Flächen zwischen den Stationen interpoliert werden müssen. Dies kann einerseits extern erfolgen und der flächenhafte Datensatz wird somit nur noch in das Wasserhaushaltsmodell eingelesen. Oder das Wasserhaushaltsmodell übernimmt diese Aufgabe selbst indem es Routinen zur Interpolation meteorologischer Eingabedaten beinhaltet. Beide Vorgehen werden in den Wasserhaushaltsmodellen für Bayern genutzt.

Die so berechneten Werte können also die realen Bedingungen lokal aufgrund der Interpolation nur schätzen und weichen daher ggf. von ihnen ab. Wie groß die Abweichung ist, hängt u. a. davon ab, wie

gut die gewählte Interpolationsmethode die lokalen Verhältnisse bzw. Variabilität der meteorologischen Variablen abbildet und wie dicht das zugrunde liegende Messnetz ist. Beispielsweise spielt bei der Temperatur die Topografie eine entscheidende Rolle. Mit steigender Höhe nimmt die Temperatur ab. Dies kann durch ein Höhenmodell realisiert und bei der Berechnung berücksichtigt werden. Während die Temperatur über die Topografie gut nachgebildet werden kann, gestaltet sich die Interpolation des Niederschlags schwieriger. Zum Beispiel kann an einer Station Niederschlag gemessen werden und zum gleichen Zeitpunkt an einer benachbarten Station kein Niederschlag aufgezeichnet werden. Damit ist eine Aussage zum Niederschlag zwischen diesen Stationen schwierig, kann aber mittels Interpolation näherungsweise beschrieben werden. Besonders der Alpenraum ist aufgrund seiner Topografie und der Verteilung der Klimastationen dabei eine besondere Herausforderung.

Für eine Kalibrierung der Wasserhaushaltsmodelle stehen im Normalfall gemessene Pegel­daten zur Verfügung. In dieser Kalibrierungsphase können so neben den Parametern der Landoberflächenmodule auch im beschränkten Umfang die interne Interpolation der meteorologischen Daten angepasst werden. Die daraus resultierende räumlich interpolierte Meteorologie wird vom Modell ebenfalls ausgegeben. Zur Erstellung des zur Bias-Adjustierung verwendeten Beobachtungsdatensatzes wurden alle Parameter und Eingabedaten zur Interpolation der 19 Flussgebietsmodelle zusammengefasst und als eigenständiges Modell ohne die Landoberflächenmodule betrieben. Somit konnte der Gesamtdatensatz KliRef2014 erstellt werden. Dieser wurde im Jahr 2020 überarbeitet und wird im Weiteren für die Erstellung von Referenzläufen sowie zur Bias-Adjustierung der o. g. fünf meteorologischen Variablen der Klimamodell­daten verwendet (LfU, 2020).

2.4.2 Verwendete Klimaprojektionen und Modellkette: Die Ensemblebildung

Eine Gruppe von Klimaprojektionen wird als Ensemble bezeichnet. Das LfU arbeitet mit einem bayerischen Klimaprojektionsensemble, genannt Bayern-Ensemble. Dieses Ensemble besteht aus einer Auswahl an verfügbaren regionalen Klimaprojektionen und setzt sich aus den Arbeiten verschiedenster wissenschaftlicher Institute zusammen, die diese Klimaprojektionen erstellt haben. Zur Qualitätsprüfung und einer anschließenden Auswahl der einzelnen Projektionen wurde für das Gebiet des hydrologischen Bayern ein Audit durchgeführt. Dabei wurden die Klimaprojektionen für den Referenzzeitraum 1971–2000 mit dem bayerischen Klimareferenzdatensatz KliRef2014 mit Hilfe von verschiedenen Qualitätsindikatoren verglichen und bewertet. Konnten die Projektionen die Vergangenheit nicht zufriedenstellend simulieren, wurden diese verworfen. Alle Projektionen, die den vorher festgelegten Qualitätsstandards für die Referenzperiode genügten, wurden in das Bayern-Ensemble übernommen (LfU, 2020).

Das Bayern-Ensemble besteht daher aus insgesamt zwölf Kombinationen von Klimaprojektionen für das RCP8.5- und neun Modellen für das RCP2.6-Szenario. Eine ausführliche Beschreibung der Bayerischen Klimadaten liefert die LfU-Publikation „Bayerische Klimadaten–Beobachtungsdaten, Klimaprojektionsensemble und Klimakennwerte für Bayern“ (LfU, 2022b). Da zur Simulation der bayerischen Flussgebiete die nicht bayerischen Teile der Einzugsgebiete mitberücksichtigt werden mussten, die statistischen Modelle aber nur für den Umgriff Deutschlands vorlagen (siehe Kapitel 2.2), konnten diese nicht in der Abflussmodellierung verwendet werden. Zudem stand für ein dynamisches Klimamodell eine Variable (Globalstrahlung) nicht zur Verfügung, so dass ein reduziertes Ensemble aus neun Modellen („ohne Klimaschutz“, RCP8.5) beziehungsweise sieben Modellen („2 °C-Obergrenze“, RCP2.6) verwendet wird.

Tab. 1 listet alle für die Wasserhaushaltsmodellierung in Bayern verwendeten Klimaprojektionen des Bayern-Ensembles auf. Es ist davon auszugehen, dass auch künftige neue Szenarien basierend auf SSPs (Shared Socioeconomic Pathways, gemeinsame, sozioökonomische Entwicklungspfade, seit 2022), in diesem Rahmen veröffentlicht werden, die für den 6. IPCC-Sachstandsbericht entwickelt

wurden. Weitere Infos zu den SSPs beinhaltet das UmweltWissen „Wege in die Klimazukunft: Szenarien und Optionen“ (LfU, 2024).

Tab. 1: Verwendete Kombinationen aus globalen Klimamodellen (GCMs) und regionalen Klimamodellen (RCMs) des Bayern-Ensemble. Die verwendeten Szenarien in der ersten Spalte, die Namen der einzelnen Klimamodelle setzen sich aus dem betreibenden Institut/Gruppe und dem verwendeten Modell zusammen. Weitere Informationen in den Modellnamen sind die jeweilige Version des Modells und das jeweilig verwendete Member (Anfangsbedingungen der Modellläufe).

Szenario	Globales Klimamodell (GCM)	Member	Regionales Klimamodell (RCM)
RCP8.5, RCP2.6	ICHEC-EC-EARTH	r12i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17
RCP8.5, RCP2.6	ICHEC-EC-EARTH	r12i1p1	KNMI-RACMO22E
RCP8.5, RCP2.6	ICHEC-EC-EARTH	r12i1p1	SMHI-RCA4
RCP8.5	ICHEC-EC-EARTH	r1i1p1	KNMI-RACMO22E
RCP8.5, RCP2.6	MIROC-MIROC5	r1i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17
RCP8.5	MOHC-HadGEM2-ES	r1i1p1	UHOH-WRF361H
RCP8.5, RCP2.6	MPI-M-MPI-ESM-LR	r1i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17
RCP8.5, RCP2.6	MPI-M-MPI-ESM-LR	r1i1p1	SMHI-RCA4
RCP8.5, RCP2.6	MPI-M-MPI-ESM-LR	r1i1p1	UHOH-WRF361H

nicht verwendete Modelle:

Szenario	Globales Klimamodell (GCM)	Member	Regionales Klimamodell (RCM)
RCP8.5	ICHEC-EC-EARTH	r12i1p1	UHOH-WRF361H (Globalstrahlung nicht verfügbar)
RCP8.5	MOHC-HadGEM2-ES	r1i1p1	CEC-WETTREG2018 (statistisch)
RCP8.5, RCP2.6	MPI-M-MPI-ESM-LR	r1i1p1	CEC-WETTREG2018 (statistisch)

Kürzel	Regionales Klimamodell (RCM)	Kürzel	Globales Klimamodell (GCM)
SMHI:	<i>Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut</i>	MPI-M:	<i>Max-Planck-Institut für Meteorologie</i>
KNMI:	<i>Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut</i>	ICHEC:	<i>Irish Centre for High-End Computing</i>
CLMcom:	<i>Climate Limited-area Modelling Community</i>	MIROC:	<i>Research Institute for Global Change, Japan</i>
UHOH:	<i>Universität Hohenheim</i>	MOHC:	<i>Met Office Hadley Centre</i>
RCA:	<i>Rosby Centre regional Atmospheric climate model</i>	ESM:	<i>Meteorology Earth System Model</i>
RACMO:	<i>Regional Atmospheric Climate Model</i>	EC-EARTH:	<i>European community Earth-System Model</i>
CCLM:	<i>COSMO model in CLimate Mode</i>	MIROC:	<i>Model for Interdisciplinary Research on Climate</i>
WRF:	<i>Weather Research and Forecasting Model</i>	HadGEM:	<i>Hadley Centre Global Environmental Model</i>

Das Ensemble mit der aus verschiedenen Klimaprojektionen ermittelbaren Bandbreite drückt die aktuelle Unsicherheit bei der Betrachtung des zukünftigen Klimas aus. Diese vielschichtigen Unsicherheiten lassen sich vereinfacht in zwei Kategorien einteilen: Faktoren bezüglich des Klimasystem selbst und Faktoren der Klimamodellierung. Unsicherheiten im Klimasystem sind beispielsweise die Unvorhersagbarkeit zukünftiger Treibhausgasemissionen, der Auswirkung des zusätzlichen Strahlungsantriebs, die Vorhersagbarkeit einiger Komponenten des Klimasystems, z. B. Kippunkte und unvorhersehbare Ereignisse wie vulkanische Aktivität (Foley, 2010). Unsicherheiten in den Klimamodellen können sich z. B. aus einer vereinfachten physikalischen Abbildung der Prozesse oder aus einer zu geringen Modellauflösung ergeben. Um die modellbedingten Unsicherheiten zu minimieren bzw. aufzuzeigen, wird daher ein sogenanntes Ensemble von Klimaprojektionen verwendet. Bei der Verwendung von verschiedenen Emissionsszenarien wird dabei jeweils ein eigenes Ensemble mit einer eigenen Bandbreite betrachtet.

2.5 Die Wasserhaushaltsmodellierung

Am Klimazentrum wird zur Modellierung des Abflusses von Flusseinzugsgebieten das Wasserhaushaltsmodell WaSiM verwendet. Es ist ein flächendifferenziertes, deterministisches Modell, mit dessen Hilfe der Wasserkreislauf sowohl über als auch unter der Erdoberfläche modelliert werden kann. Die Simulation der Bodenwasserströme in der ungesättigten Bodenzone kann entweder nach dem Richards- oder dem TOPMODEL-Ansatz erfolgen. Die Version, die auf dem Richards-Ansatz beruht, stellt seit 1998 die Hauptlinie der Modellweiterentwicklung dar (www.wasim.ch) und wird am Klimazentrum genutzt.

2.5.1 Das Projekt Wasser.Klima.Bayern

Mit dem vom StMUV finanzierten Projekt „Wasser.Klima.Bayern 2“ unterstützt das LfU die bayerische Wasserwirtschaft bei klimawandelbedingten Fragestellungen. Gemeinsam mit der bayerischen Wasserwirtschaft werden regionale wasserwirtschaftliche Problemfelder identifiziert und anwendungsbezogene fachliche Grundlagen erarbeitet. Diese dienen als Basis und Orientierungsgrundlage für Anpassungsmaßnahmen und -strategien. Zudem wird die gemeinsame Zusammenarbeit im Themenkomplex Klimawandel und Wasserwirtschaft gestärkt. Hierzu sollen auch die in diesem UmweltSpezial vorgestellten Abflussprojektionen hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für spezifische regionalisierte Fragestellungen bewertet und anschließend weiter genutzt werden.

2.5.2 Funktionsweise des hydrologischen Modells

Mit dem aufbereiteten meteorologischen Datensatz KliRef2014 mit Messdaten von 1971 bis 2000 können die Wasserhaushaltsmodelle die hydrologischen Prozesse für jeden beliebigen Ort modellieren. Dies geschieht mittels physikalisch basierter Algorithmen beispielsweise für die Fließbewegung im Boden und dessen Speicherfähigkeit. Bestimmt werden diese von den physikalischen Eigenschaften des Bodens, wie der Bodenart, dem Aufbau des Bodens und dessen Mächtigkeit. In Abb. 9. ist schematisch der Aufbau des Modells dargestellt. Hier sind die jeweiligen simulierten Prozesse aufgeführt und in welcher Reihenfolge sie vom Modell berechnet werden.

Alle beschriebenen Prozesse werden im Modell über Algorithmen abgebildet, die auf messbaren Beobachtungen basieren. Allerdings kann nicht jeder Prozess, der das Abflussgeschehen beeinflusst, im Modell umgesetzt werden. Für manche Größen ist nur eine näherungsweise Berechnung möglich. Die Ursachen können zum einen fehlendes Prozessverständnis und/oder unzureichende Eingabedaten von physikalischen Kenngrößen sein. Zum anderen wird die Möglichkeit, ein so großes Gebiet wie das hydrologische Bayern mit einer hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung für eine sehr langen Zeitraum zu modellieren, aufgrund der Limitierung durch die verfügbare IT-Technik begrenzt. Jedoch nehmen die Datenlage, das Prozessverständnis und die Computerleistung zu, sodass eine stetige Verbesserung der Modelle möglich ist.

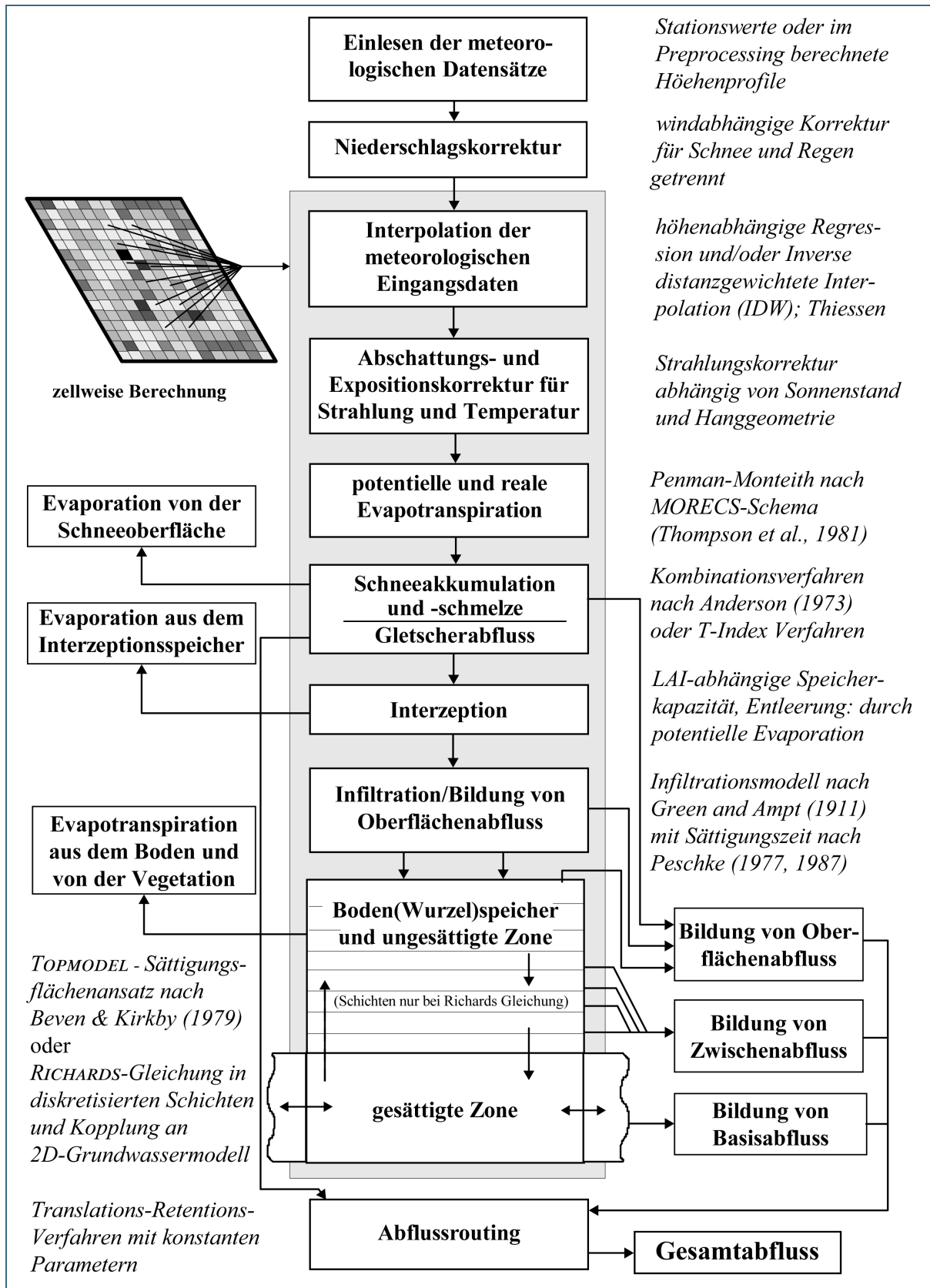


Abb. 9: Die Modellstruktur des Wasserhaushaltsmodells WaSiM. Das Schema zeigt die prozessuale Abarbeitung der Simulation des Wasserhaushaltes (LfU, 2025 verändert nach WASIM, 2023).

2.5.3 Konfiguration und Kalibrierung des Modells

Dem Klimazentrum stehen insgesamt 19 Wasserhaushaltsmodelle basierend auf dem Wasserhaushaltsmodell WaSiM zur flächendeckenden hydrologischen Modellierung des gesamten hydrologischen Bayerns zur Verfügung (Abb. 1). Die Aufstellung und Anwendung der Modelle erfolgte für Tages-schritte und für eine räumliche Modellauflösung von 1 km. Die Modelle werden für die Ermittlung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt und die Abflüsse in Bayern verwendet. Der Begriff des hydrologischen Bayern umfasst alle Gebiete, die über die Flussgebiete Bayerns in seinen Landesgrenzen entwässern.

Insgesamt wird mit diesem Modellsystem der Abfluss für 636 Einzugsgebiete simuliert. Für 430 Einzugsgebiete existieren Pegelpunkte, an denen parallel auch Messungen vorliegen. Für die vorliegenden Auswertungen werden von diesen 430 Einzugsgebieten 60 ausgewählte Pegel genauer betrachtet, die repräsentativ über Bayern verteilt sind.

Die räumlichen Eingangsdaten stammen aus dem CORINE-Projekt (Landnutzung), der European Soil Database (Bodenarten) und vom LfU (Hydrogeologische Übersichtskarten, Bodenübersichtskarten, Digitales Geländemodell). Die räumlichen Eingangsdaten wurden vor der Kalibrierung auf die Zielauf-lösung von 1 km skaliert.

Gemeinsam ist allen verwendeten Wasserhaushaltsmodellen die Berechnung der Verdunstung über die Penman-Monteith-Gleichung. Der Abbau der Schneedecke wurde je nach Wasserhaushaltsmodell mithilfe des Anderson-Ansatzes, des Temperatur-Index-Verfahrens oder des Temperatur-Wind-Index-Verfahrens berechnet. Für das Bodenmodell wurde der Richards-Ansatz genutzt (WASIM, 2023).

Wasserhaushaltsmodelle können nicht alle relevanten Prozesse rein physikalisch-basiert abbilden, weshalb bei ihrer Verwendung Parametrisierungen vorgenommen werden müssen. Während der Kalibrierung wird versucht, einen Parameter-Satz zu finden, mit dem gemessene Abflüsse möglichst realitätsnah vom Modell wiedergegeben werden. Die Kalibrierung und Validierung der Wasserhaushaltsmodelle des hydrologischen Bayerns wurde für Zeiträume von mehreren Jahren in mehreren Phasen von externen Auftragnehmern durchgeführt. Die Plausibilitätsprüfung erfolgte durch eine Langzeitsimulation im Zeitraum 1971–2000.

Diese Wasserhaushaltsmodelle wurden allesamt auf gemessene klimatische und hydrologische Daten kalibriert und validiert. Hierfür wurden als meteorologische Eingangsdaten Zeitreihen für die Klimavariablen Niederschlag, Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit sowie Globalstrahlung bzw. Sonnenscheindauer genutzt. Wie in Kapitel 2.2 beschrieben resultierte daraus der KliRef2014 Beobachtungsdatensatz. Für die Validierung standen zudem gemessene Abflusszeitreihen zur Verfügung.

Die Modellierungen wurden jeweils mit zwei Konfigurationen durchgeführt, mit und ohne anthropogene Strukturen. Zur Kalibrierung der Modelle war es notwendig, verschiedene anthropogene Strukturen wie Ableitungen oder Speicherseen in die Modelle mit einzubauen. Diese Konfiguration kann in den Modellen auch deaktiviert werden und man erhält so modellierte Abflüsse, die den potenziellen natürlichen Abfluss repräsentieren. Da die anthropogenen Strukturen ggf. ein Änderungssignal im Abfluss maskieren können, wurden nur die Modellkonfiguration für den natürlichen Abfluss verwendet. Zudem ist nur schwer zu definieren, wie diese anthropogenen Strukturen in den Zukunftsszenarien weitergeführt werden, z. B. ein Speicher in Zukunft konkret gesteuert wird. Dieser Sachverhalt muss bei der Betrachtung der Ergebnisse berücksichtigt werden.

2.6 Auswertung von Abflussprojektionen

2.6.1 Abflussprojektionen

Angetrieben von Klimaprojektionen werden mit dem Wasserhaushaltsmodell Abflussprojektionen erstellt. In Abb. 10 sind beispielhaft die Abflussprojektionen für das Szenario „ohne Klimaschutz“ RCP8.5 für den Zeitraum 1971–2100 für den Pegel Hofkirchen dargestellt.

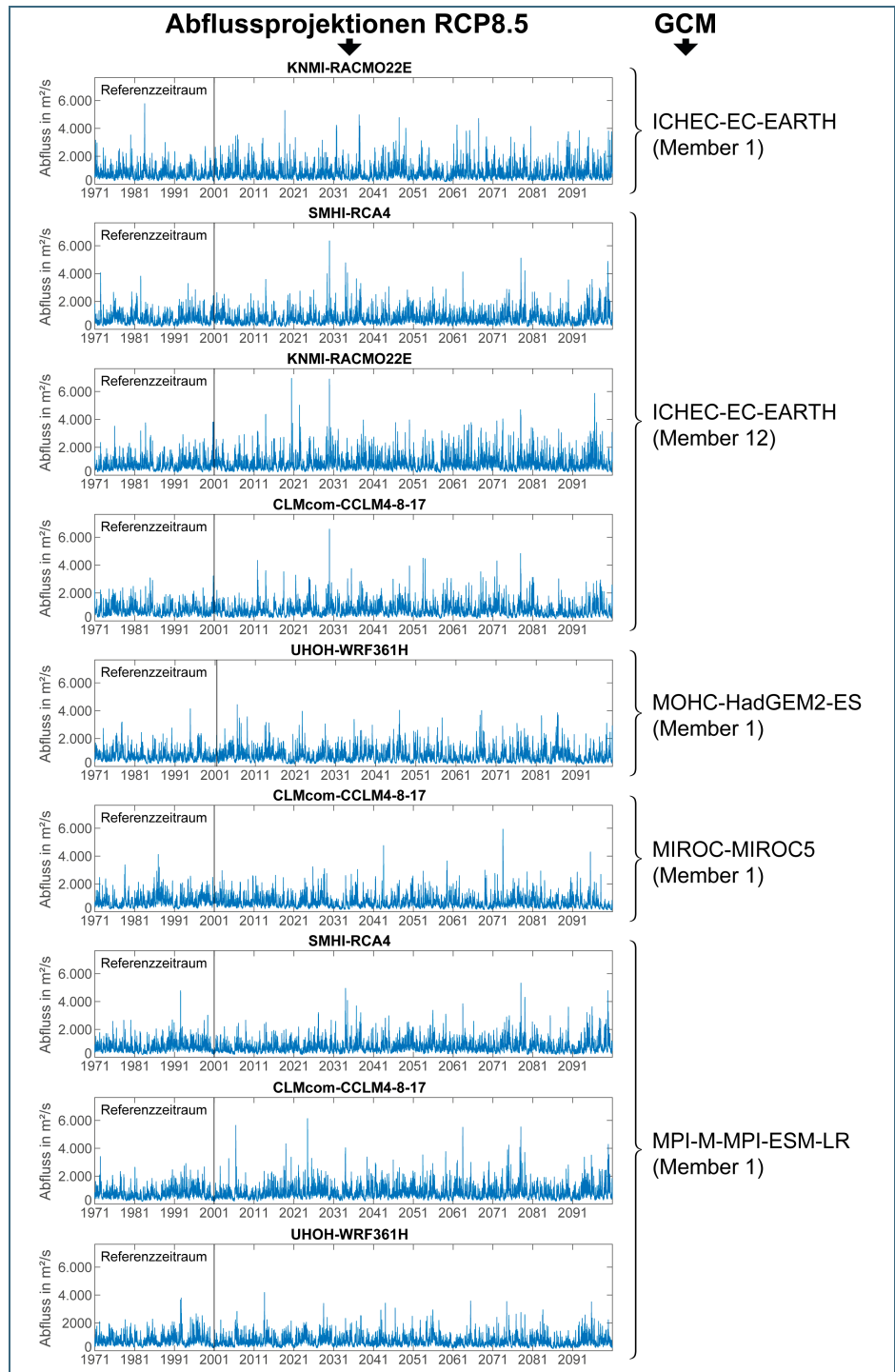


Abb. 10: Abflussprojektionen für das Szenario RCP8.5 für den Pegel Hofkirchen. Auf der rechten Seite ist das globale Klimamodell aufgeführt, welches das jeweilige regionale Klimamodell antreibt.

Diese durchgängigen (transienten) Zeitreihen der Abflüsse werden zunächst bezüglich der hydrologischen Kennwerte ausgewertet. In weiteren Schritten werden die gewonnen Kennwerte zeitlich für 30-Jahreszeiträume analog der Betrachtung des Klimas und anschließend hinsichtlich des Medians

und den maximalen und minimalen Klimaänderungssignalen zusammengefasst. Im Weiteren werden nur diese drei Werte verwendet, um die projizierte Bandbreite des Ensembles zu beschreiben bzw. darzustellen. Das dargestellte Ensemble kann gemäß der verwendeten Modellkombination der Klimaprojektionen der antreibenden GCMs weiter in Gruppen eingeteilt werden. Man sieht z. B., dass die meisten Hochwasserspitzen der Abflussprojektionen, welche über die drei vom GCM ICHEC-EC-EARTH (Member 12) angetriebenen regionalen Klimamodelle gewonnen wurden, zum selben Zeitpunkt auftreten. Deutlich ist dies z. B. bei der Hochwasserspitze um das Jahr 2031. Diese Gemeinsamkeiten sind bei der Bewertung der Ergebnisse zu beachten.

2.6.2 Berechnung der Klimasignale

Durch die Verwendung von Klimamodellprojektionen als Antrieb des Wasserhaushaltsmodells können Aussagen zum zukünftigen Abflussgeschehen und zur Abflussentwicklung getroffen werden. Da die verwendeten Klimamodelle auch das vergangene Klima simulieren, steht für jedes Modell des verwendeten Ensembles eine durchgängige Abflusszeitreihe 1971 bis 2100 zur Verfügung. Für den Zeitraum 1971 bis jetzt wird dabei allerdings nicht das Wetter, wie es tatsächlich gemessen wurde, simuliert. Vielmehr simulieren die Klimamodelle auch für die Vergangenheit das mittlere Klima. Der Tageswert hat somit nichts mit den ebenfalls zur Verfügung stehenden Messwerten zu tun.

Um Veränderungen darzustellen und zu quantifizieren, wird zunächst ein 30-jähriger Referenzzeitraum definiert, hier die hydrologischen Jahre beziehungsweise Wasserhaushaltsjahre 1971 bis 2000. Veränderungen in der Zukunft werden in Bezug auf diesen Referenzzeitraum dargestellt. Um klimatisch bedingte Veränderungen zu berechnen, wird das in Abb. 11 gezeigte und in Kapitel 2.2 zur Modellkette beschriebene Vorgehen angewandt. Sowohl für Abflussprojektionen als auch für die Klimaprojektionen können Kennwerte für verschiedene 30-jährige Zeiträume berechnet werden.

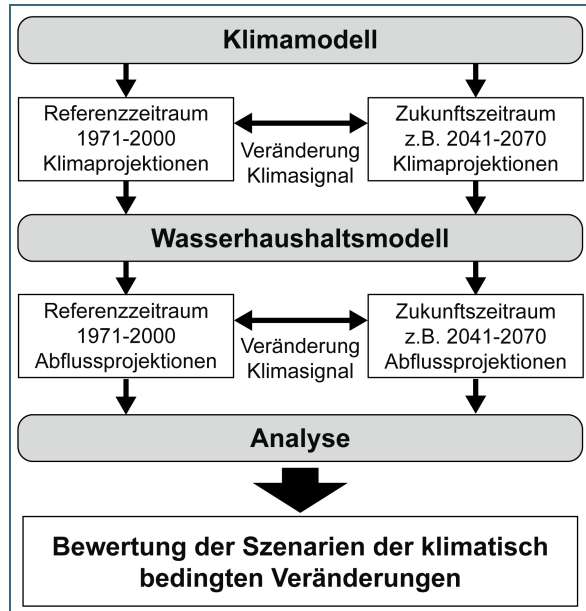


Abb. 11:
Schema zur Berechnung klimatisch bedingter Veränderungen.

Die berechneten Klimasignale zeigen immer die Veränderung eines Zukunftszeitraums in Bezug auf den Referenzzeitraum 1971–2000. In der Auswertung der Klimaprojektionen werden vom Klimazentrum standardmäßig die in Tab. 2 dargestellten Zukunftszeiträume verwendet. Auswertungen zu mittleren Abflüssen sowie Niedrig- und Hochwasserabflüssen bilden die Basis zur Bewertung der vom Klimawandel beeinflussten Änderungen der Abflusscharakteristik. Zusätzlich werden für die Beantwortung spezieller Fragestellungen weiterführende Kennwerte betrachtet. Es werden sowohl jährliche als auch jahreszeitliche Analysen durchgeführt, dabei ist die zeitliche Bezugsperiode je nach Kennwert das hydrologische Jahr (01.11. – 31.10.) oder das Wasserhaushaltsjahr (01.04. – 31.03.) (siehe Kapitel 2.1.1).

Bezeichnung	Zeitraum
Referenzzeitraum	1971–2000
nahe Zukunft (NZ)	2021–2050
mittlere Zukunft (MZ)	2041–2070
ferne Zukunft (FZ)	2071–2100

Tab. 2:
Auswertungszeiträume. Die Jahresangaben beziehen sich je nach auszuwertendem Kennwert auf hydrologische- beziehungsweise Wasserhaushaltsjahre. Die verwendeten Bezugszeiträume finden sich in Kapitel 2.1.3.

2.6.3 Darstellungsmethoden der Klimasignale im Abfluss

2.6.3.1 Trends aus beobachteten Pegeldaten

Um die vergangene Entwicklung darzustellen, werden aus den Pegelmessdaten Trends für verschiedene Kennwerte abgeleitet. Die Methodik wird auch in der Kooperation KLIWA angewendet (KLIWA, 2022a). Hierbei wird aus den Abflusszeitreihen zunächst der MQ, HQ, NQ und NM7Q eines jeden verfügbaren Jahres berechnet. Aus der resultierenden jährlichen Zeitreihe wird anschließend der lineare Trend abgeleitet und die Signifikanz mittels Mann-Kendall Test berechnet. Die berechneten Trends und deren Signifikanzniveau der einzelnen Pegel können anschließend in einer Karte dargestellt werden. Es wurden die Trends seit 1951 bis 2023 berechnet und ausgewertet. Für 43 der 60 untersuchten Pegel lagen für diesen Zeitraum Beobachtungsdaten vor (siehe Abb. 29).

2.6.3.2 Gleitende Mittel

Die Ergebnisse der Abflussprojektionen werden im zeitlichen Verlauf als relative Änderungen eines 30-jährigen gleitenden Mittels gegenüber der Referenzperiode (1971–2000) dargestellt. Somit kann für jeden beliebigen zukünftigen 30-jährigen Zeitraum die Änderung abgelesen werden. Die folgenden Erläuterungen können beispielhaft an Abb. 12 nachvollzogen werden.

Abb. 12 zeigt anhand des Kennwerts MNQ für das Sommerhalbjahr beispielhaft die einzelnen Schritte, um von den vorliegenden täglichen Zeitreihen der Abflussprojektionen auf die im vorherigen Absatz beschriebenen Darstellungen zu kommen. In der ersten Zeile der Abbildung sind die täglichen Abflüsse während des Sommerhalbjahrs am Pegel Hofkirchen dargestellt. Links sieht man die geplotteten Zeitreihen des RCP2.6, rechts die Zeitreihen des RCP8.5. In Schritt 1 wird aus den einzelnen Tages-Zeitreihen im Falle des MNQ eine Jahresreihe der minimalen Abflüsse aller Sommerhalbjahre gebildet. In Schritt 2 wird für diese Jahresserie das gleitende 30-jährige Mittel gebildet. Die Jahreszahlen der X-Achse beziehen sich dabei auf das jeweilige Zentraljahr eines 30-jährigen Zeitraumes. Für Schritt 3 wird das jeweilige Änderungssignal für jeden Punkt berechnet, indem der Referenzwert (dem MNQ des Zeitraumes 1971–2000) vom jeweiligen Wert subtrahiert und anschließend die prozentuelle Abweichung berechnet wird. In Schritt 4 werden nun für jeden 30-jährigen Zeitraum jeweils der maximale und minimale Wert ermittelt und der Median bestimmt. Der Median gibt das Änderungssignal an, über bzw. unter dem jeweils 50 % der ermittelten Werte des verwendeten Ensembles liegen. In dem dargestellten Fall bedeutet dies für RCP8.5 mit neun Projektionen, dass vier Projektionen mit ihren Änderungen darunter bzw. darüber liegen. Bei RCP2.6 sind dies jeweils drei Projektionen. Je nach Größe der Fläche über bzw. unterhalb des Medians ist dies zudem eine Aussage, wie sehr die Projektionen ggf. streuen. Ist die Fläche klein, liegen einheitlichere Änderungssignale vor, als wenn die Fläche groß ist. Dabei ist zudem zu beachten, dass den Projektionen keine Wahrscheinlichkeit zugeordnet werden kann. Allerdings ist eine Interpretation möglich, wie viele der betrachteten Projektionen mindestens solch ein Änderungssignal oder höher/geringer liefern – im Fall vom Median jeweils 50 %.

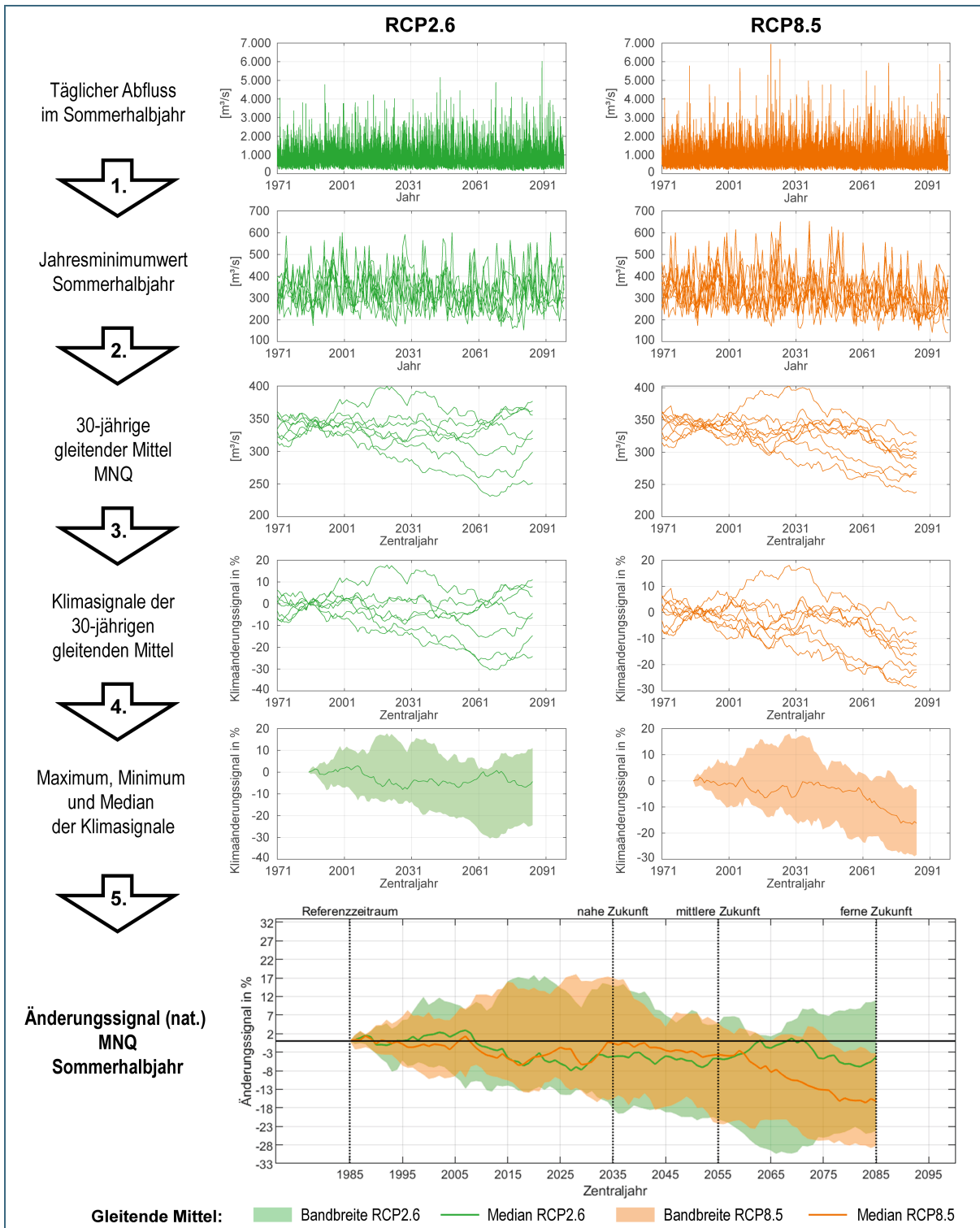


Abb. 12: Ableitung der Klimaänderungssignale für den MNQ des Pegels Hofkirchen und Darstellung als minimales und maximales Signal.

Möchte man dagegen 100 % der aktuell ermittelbaren, möglichen Entwicklung eines Szenarios betrachten, ist je nach Fragestellung der Minimum- (z. B. Niedrigwasser) oder Maximumwert (z. B. Hochwasser) der Bandbreite zu betrachten. In der Grafik werden daher im Folgenden nicht mehr die einzelnen Klima-projektionen gezeigt, sondern die Bandbreite dargestellt, die alle vorkommenden Klimaänderungssignale beinhaltet. Auf eine weitere Eingrenzung der Bandbreite z. B. mit der Betrachtung von Perzentilen wird verzichtet, weil diese durch das in Bayern verwendete Bayern-Ensemble mit seiner Qualitätsprüfung /

Audit (vgl. 2.4.2) bereits in einem vorherigem Schritt stattgefunden hat. Eine weitere Eingrenzung würde das vorliegende Ensemble daher zu sehr in seiner Bandbreite reduzieren. Für Schritt 5 werden die Ergebnisse der beiden Szenarien gemeinsam dargestellt. Anhand der Abbildung kann man nun für jeden beliebigen zukünftigen Zeitraum das jeweilige Klimaänderungssignal ablesen.

2.6.3.3 Regimeänderungen

Für das Abflussregime werden die Veränderungen verschiedener Kennwerte ermittelt. Bei diesen Auswertungen wird das zukünftige Abflussregime dargestellt, indem die relativen monatlichen Änderungssignale auf die beobachteten monatlichen Durchschnittswerte des Referenzzeitraumes angewendet werden. Hierfür werden zunächst die relativen Veränderungen der einzelnen Abflussprojektionen für die in Tab. 2 aufgeführten Zeiträume für den jeweiligen Kennwert berechnet. Wie bei der Darstellung der Änderungen des 30-jährigen gleitenden Mittels werden in den Abbildungen jeweils der Maximal- und Minimalwert sowie der Median dargestellt. Die auf diese Weise gewonnenen Regimekurven der Projektionszeiträume weisen absolute Werte auf. Ein Beispiel für eine solche Auswertung ist in Abb. 13 dargestellt.

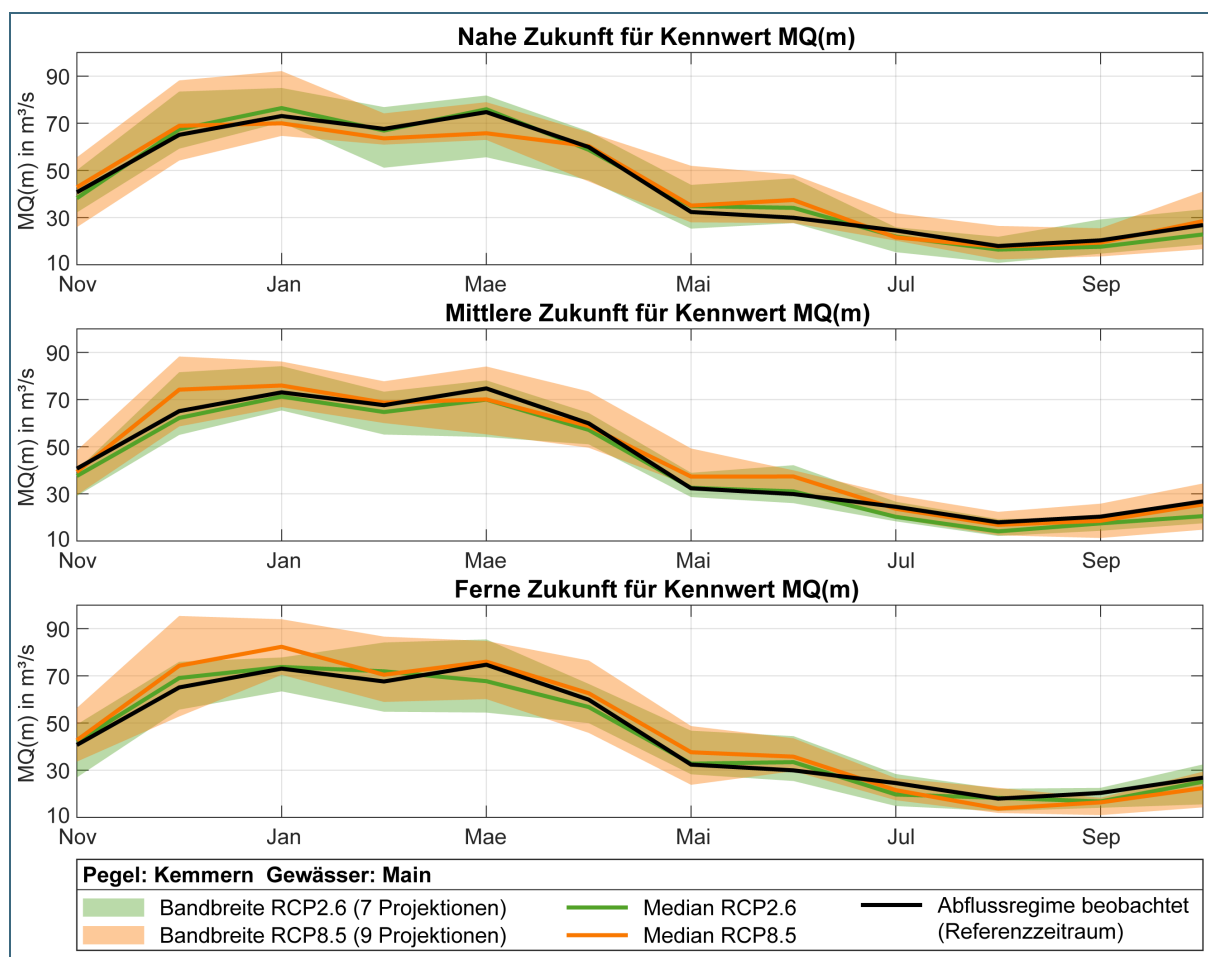


Abb. 13: Beispiel für die Darstellung der Regimeänderungen für die drei Zukunftszeiträume nahe, mittlere und ferne Zukunft. Dargestellt ist der modellierte natürliche Abfluss am Pegel Kemmern am Main.

2.6.3.4 Jährlichkeiten

Auf Basis der oben genannten 30-jährigen Auswertungszeiträume werden verschiedene Jährlichkeiten des Abflusses abgeleitet. Anschließend wird deren Änderungssignal in Bezug auf den Referenzzeitraum berechnet. Diese Änderungssignale werden in zwei Formen dargestellt: zum einen als Boxplots bezogen auf die gewählten Beispielpegel und zum anderen die maximalen, mittleren und minimalen Änderungssignale für alle Pegel in Kartenform.

Ein Beispiel für die Boxplotdarstellung ist in Abb. 14 dargestellt. In der Achsenbeschriftung ist jeweils die hydrologische Kenngröße (1) und der Bezugszeitraum (2) angegeben. In der horizontalen Achse werden die dargestellten Pegel und ihre zugehörigen Gewässer (3) aufgeführt. Für jeden Pegel werden beide Szenarien dargestellt (4), dabei wird RCP2.6 in grün und RCP8.5 in orange abgebildet. Die Balken stellen die Ensemble-Spanne dar. Das obere Ende gibt das jeweilige Maximum des Ensembles (5) an, während das untere Ende das zugehörige Minimum (6) anzeigt. Analog zu den anderen Ergebnisdarstellungen wird zusätzlich der Median (Erläuterung siehe Kapitel 2.6.3.2) des Ensembles als graue Linie (7) ins Diagramm eingetragen. Für eine detaillierte Übersicht über die Verteilung der einzelnen Abflussprojektionen innerhalb des Ensembles sind ihre Einzelwerte in Punktform über die Balken der Ensemble-Spanne gelegt worden (8). Liegen die Werte mehrerer Projektionen zu dicht beieinander, werden die Punkte waagrecht versetzt zueinander dargestellt. Eine Kurzform dieser Erklärung ist zudem durch die Legende in den Diagrammen gegeben. Hier sind zum einen die unterschiedlichen Szenarien (9) und zum anderen eine Übersicht zum Aufbau der Ensemble-Darstellung (10) abgebildet.

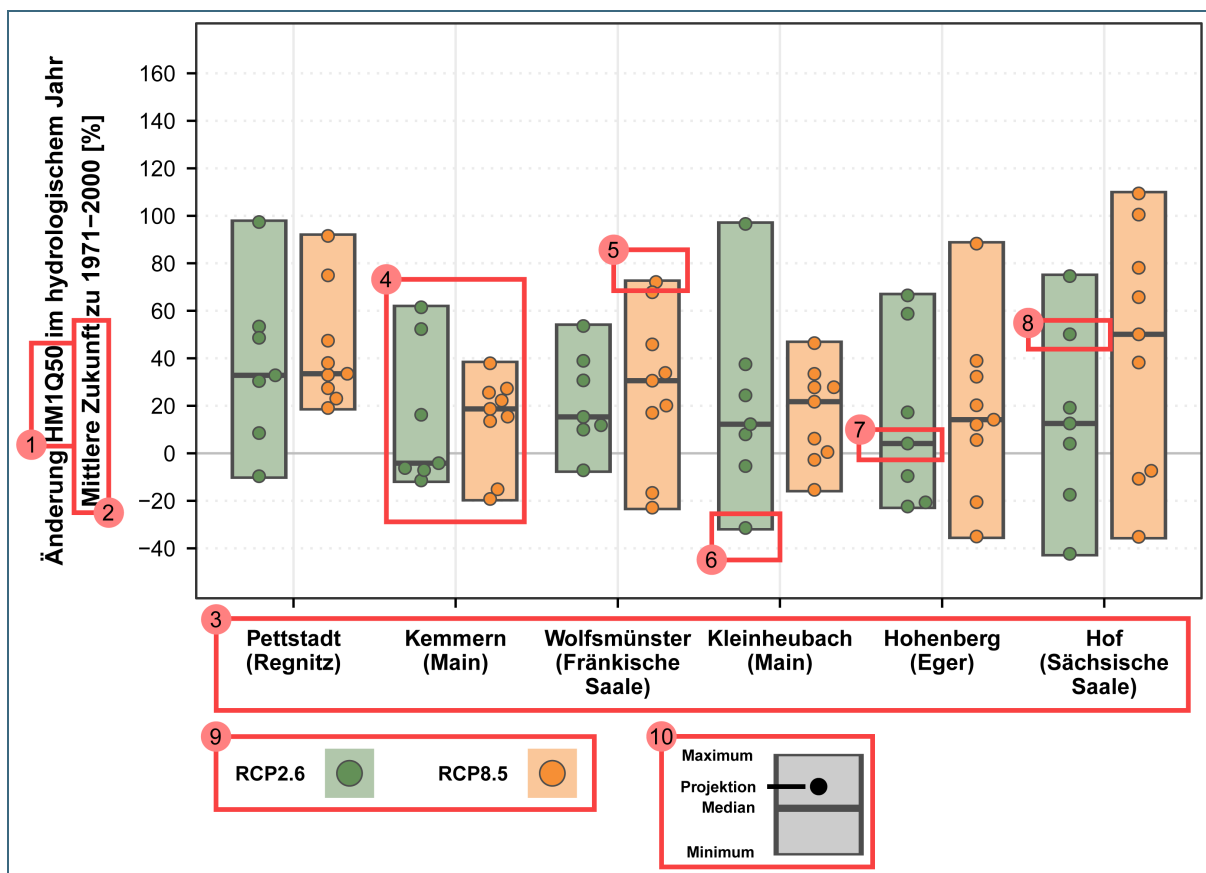


Abb. 14: Beispiel einer Boxplotdarstellung für das Klimaänderungssignal des HQ₅₀ für einige nordbayerische Pegel.

3 Klima und Klimawandel in Bayern

Im Fokus stehen die zukünftigen Veränderungen des Abflusses. Da die Temperatur und der Niederschlag wesentliche klimatische Faktoren für den Wasserhaushalt und die Abflüsse sind, soll im folgenden Kapitel die räumliche Differenzierung dieser Größen und deren Entwicklung basierend auf den verwendeten Klimaprojektionen erläutert werden. Für den Raum des politischen Bayerns wurden durch das Klimazentrum am LfU umfangreiche Fachinformationen erstellt, welche die bisherige und künftige Entwicklung des Klimas in Bayern und seine sieben Klimaregionen aufzeigen:

- Klima-Report Bayern 2021 (StMUV, 2021)
- Klima-Faktenblätter (LfU, 2021)
- Broschüren "Bayerns Klima im Wandel - Heute und in der Zukunft" (LfU, 2022a)
- [Bayerisches Klimainformationssystem BayKIS](#)

Um bisherige Klimaentwicklungen zu quantifizieren und mögliche zukünftige Klimaveränderungen besser einschätzen zu können, ist die Analyse verfügbarer Messdaten der Vergangenheit und Gegenwart von großer Bedeutung. Hierfür wurden Rasterdaten des Deutschen Wetterdienstes (HYRAS) verwendet, um die klimatischen Kenngrößen abzuleiten. Im Gegensatz zum hauptsächlich für dieses UmweltSpezial verwendeten Beobachtungsdatensatz KliRef2014 werden diese regelmäßig fortgeschrieben und liegen ebenfalls für die meteorologischen Größen Niederschlag und Temperatur vor. Da aber die Unterschiede auf der betrachteten Skala marginal sind —sie beruhen hauptsächlich auf unterschiedlichen Interpolationsmethoden— und die Rasterdaten des DWD im Bayerischen Klimainformationssystem die Grundlage bilden, werden sie in diesem Kapitel verwendet.

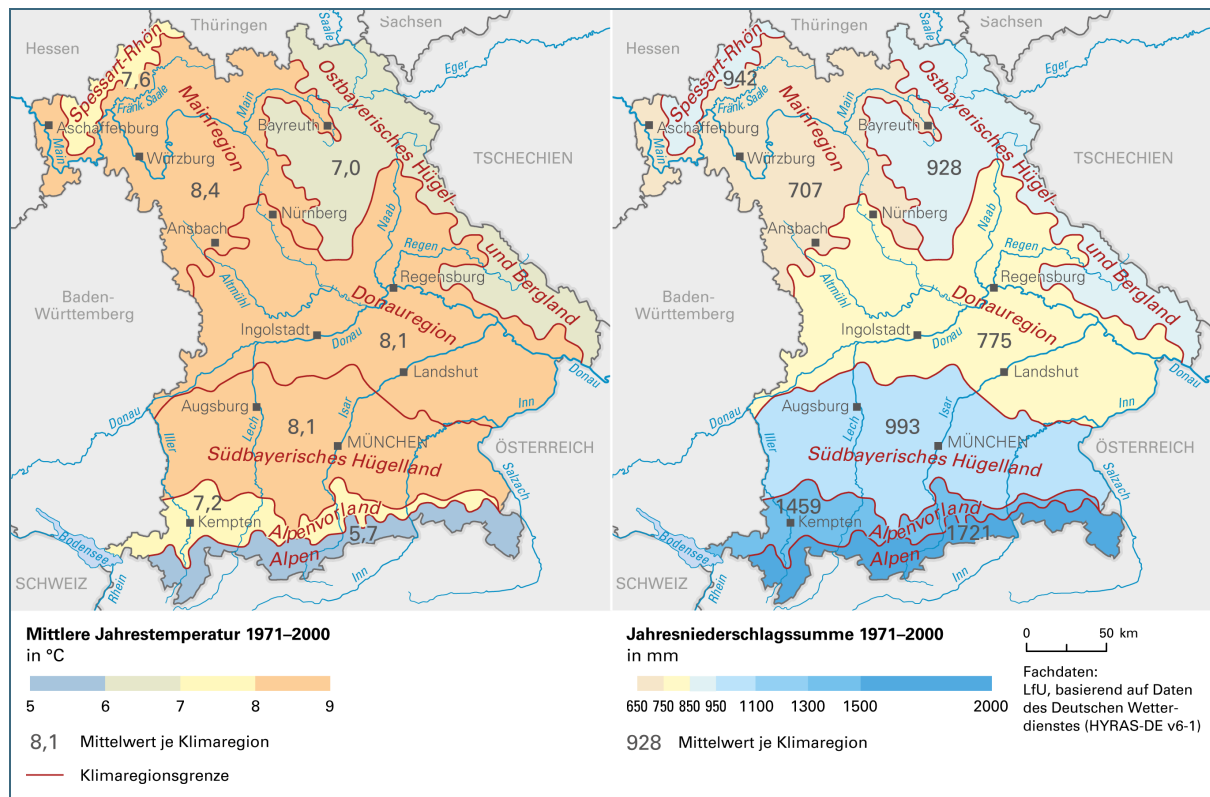


Abb. 15: Durchschnittswerte für die mittlere Jahrestemperatur und die mittlere Jahresniederschlagssumme für den Referenzzeitraum 1971–2000 in den Klimaregionen Bayerns.

Das Klima in Bayern ist regional sehr unterschiedlich ausgeprägt. Um diese Unterschiede darzustellen, wurde Bayern in sieben Klimaregionen unterteilt, die statistisch nach klimatischen Kenngrößen gegliedert wurden. In Abb. 15 sind die Grenzen dieser Regionen dargestellt. Innerhalb dieser Regionen bewegen sich die Durchschnittswerte der Temperatur und des Niederschlags in einem vergleichbaren Rahmen.

Die mittlere Jahrestemperatur in Bayern betrug im Referenzzeitraum 1971–2000 7,8 °C. In Bayern treten saisonal große Unterschiede bezüglich der Temperatur auf: Die mittlere Temperatur im Sommer betrug 16,2 °C (Juni–August), im Winter lag die Durchschnittstemperatur bei -0,6 °C (Dezember–Februar). Neben saisonalen Unterschieden zeigen sich vor allem regionale Unterschiede in Bayern: So sind die Alpen mit einer Jahresdurchschnittstemperatur von 5,7 °C die kälteste Region und die Mainregion mit 8,4 °C die wärmste (siehe Abb. 15).

Die mittlere Jahresniederschlagssumme lag im Zeitraum 1971–2000 im bayerischen Durchschnitt bei 924 mm. Der Niederschlag fällt mit 308 mm vermehrt im Sommerquartal (Juni–August) und ansonsten relativ homogen verteilt über Herbst mit 214 mm (September–November), Winter mit 194 mm (Dezember–Februar) und Frühjahr mit 208 mm (März–Mai). Der Niederschlag in Bayern ist stark vom Relief geprägt. So weist die Klimaregion Alpen den Spitzenwert von 1.721 mm auf. In den nördlich anschließenden Klimaregionen nimmt dieser bis zur Mainregion kontinuierlich ab. Demgegenüber weisen auch die durch die Mittelgebirge geprägten Klimaregionen Spessart-Rhön und Ostbayerisches Hügel- und Bergland höhere Niederschlagssummen auf. Insgesamt prägt der starke Süd-Nordgradient wesentlich das Abflussgeschehen der nord- und südbayerischen Flüsse sowie die Wasserverfügbarkeit in den einzelnen Regionen.

Für die Darstellung der zukünftigen klimatischen Entwicklung wurden Klimamodellprojektionen des Bayern-Ensembles verwendet (siehe Kapitel 2.4.2). Diese liegen durch eine vorherige weitere Bearbeitung in derselben räumlichen und zeitlichen Auflösung wie der Beobachtungsdatensatz vor (LfU, 2022b). Aus diesen wurden für die beiden klimatischen Größen Temperatur und Niederschlag die jeweiligen Signale für verschiedene Zukunftszeiträume berechnet und als gleitende Mittel dargestellt. Die Veränderungen dieser beiden Größen sind die wesentlichen Triebfedern für Veränderungen des Wasserhaushalts. Weitere klimatische Kennwerte und Auswertungen können den eingangs genannten Publikationen des Klimazentrums entnommen werden.

Die nachfolgend vorgestellten Auswertungen wurden über das Bayerische Klimainformationssystem (BayKIS) erstellt, in dem eine Vielzahl an Kennwerten regionalisiert abgerufen werden können.

In Abb. 16 werden die Klimasignale der Jahresdurchschnittstemperatur in Bezug auf den Referenzzeitraum 1971 bis 2000 für die zwei in Kapitel 2.3 vorgestellten Treibhausgasszenarien RCP2.6 und RCP8.5 gezeigt. Beim Szenario RCP2.6 („2 °C-Obergrenze“) würden laut der Mehrzahl der Klimamodelle zukünftig nur noch moderate Klimaänderungen stattfinden. Bis zum Ende des Jahrhunderts (2071–2100) würde sich eine langfristige Erwärmung im Median von +1,1 °C im Vergleich zum Referenzzeitraum einstellen. Im Gegensatz dazu steht eine Entwicklung des simulierten Klimas anhand eines Szenarios RCP8.5 („ohne Klimaschutz“). Die in orange eingezeichnete Kurve zeigt diesen Verlauf. Demnach steigen hier die jährlichen Mitteltemperaturen stark an. Gegen Ende des Jahrhunderts wäre für das 30-jährige Mittel eine Erwärmung von +3,8 °C im Median und bis zu +4,8 °C im Maximum der Simulationen im Vergleich zum Referenzzeitraum möglich.

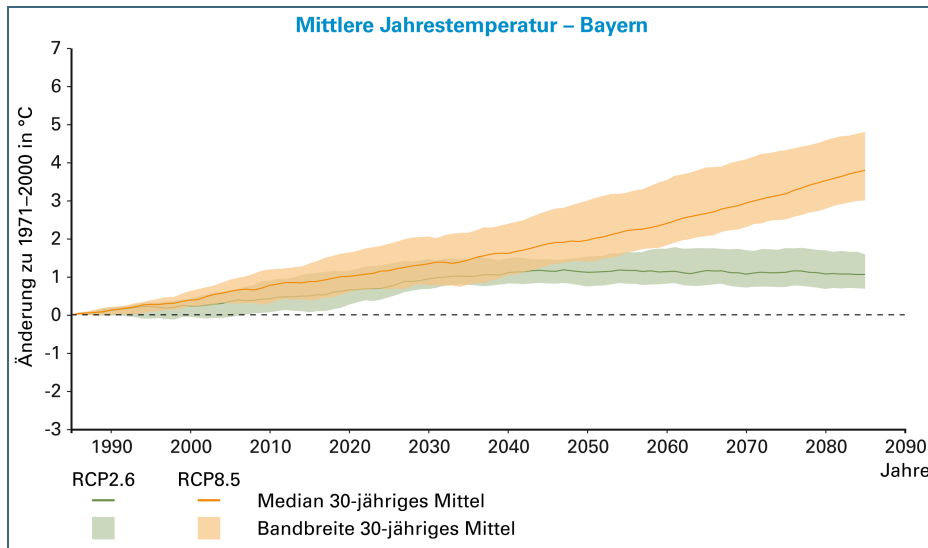


Abb. 16: Klimasignale der jährlichen Durchschnittstemperatur in Bayern in Bezug zum Referenzzeitraum 1971–2000. Dargestellt sind die beiden Szenarien RCP2.6 und RCP8.5 (Quelle: BayKIS).

Im starken Gegensatz zur Temperatur, die im Zuge des Klimawandels eine eindeutige Zunahme aufweist, sind mögliche Änderungen der Niederschlagssummen mit größeren Unsicherheiten behaftet und insgesamt eher gering ausgeprägt. Die in Abb. 17 dargestellte zukünftige Entwicklung der jährlichen Niederschlagssummen unter RCP2.6 und RCP8.5 lassen keine signifikanten Veränderungen erkennen. Differenziert man jedoch nach Winter- und Sommerhalbjahren, lassen sich trotz großer Spannweiten Tendenzen erkennen. So zeigen die unter dem Szenario „ohne Klimaschutz“ simulierten Ergebnisse ab Mitte des Jahrhunderts eine Abnahme der Sommerniederschläge (in der fernen Zukunft 2071–2100 um -11 % im Median) sowie Zunahmen im Winterhalbjahr (um etwa +14 % im oben genannten Zeitraum). Diese Tendenzen werden für das Sommer- bzw. Winterquartal noch einmal deutlicher, die entsprechenden Abbildungen für Quartale sind im BayKIS verfügbar. Die Bandbreiten der möglichen Änderungen für eine Zukunft „ohne Klimaschutz“ sind generell größer als unter dem „2-Grad-Obergrenze“-Szenario. Insgesamt ist die Unsicherheit der Entwicklung der Niederschlagssummen deutlich größer als bei der Temperaturentwicklung.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Temperatur generell zunehmen wird. Hier zeigen alle Modelle sehr ähnliche Ergebnisse. Das Klimasignal kann somit als robust gewertet werden. Damit kann sowohl die Richtung als auch das Ausmaß der Änderungen genau beschrieben werden. Auch die beiden betrachteten Szenarien RCP2.6 und RCP8.5 lassen sich eindeutig unterscheiden und zeigen den Einfluss der künftigen Treibhausgasemissionsentwicklung deutlich. Der Niederschlag zeigt zwar Tendenzen einer Zunahme im Winter und einer Abnahme im Sommer, jedoch belegt die hohe Schwankungsbreite und die teilweise projizierte gegensätzliche Richtung des Signals einiger Modelle eine große Unsicherheit der Variable Niederschlag. Diese wird sich auch in den Abflussprojektionen bemerkbar machen.

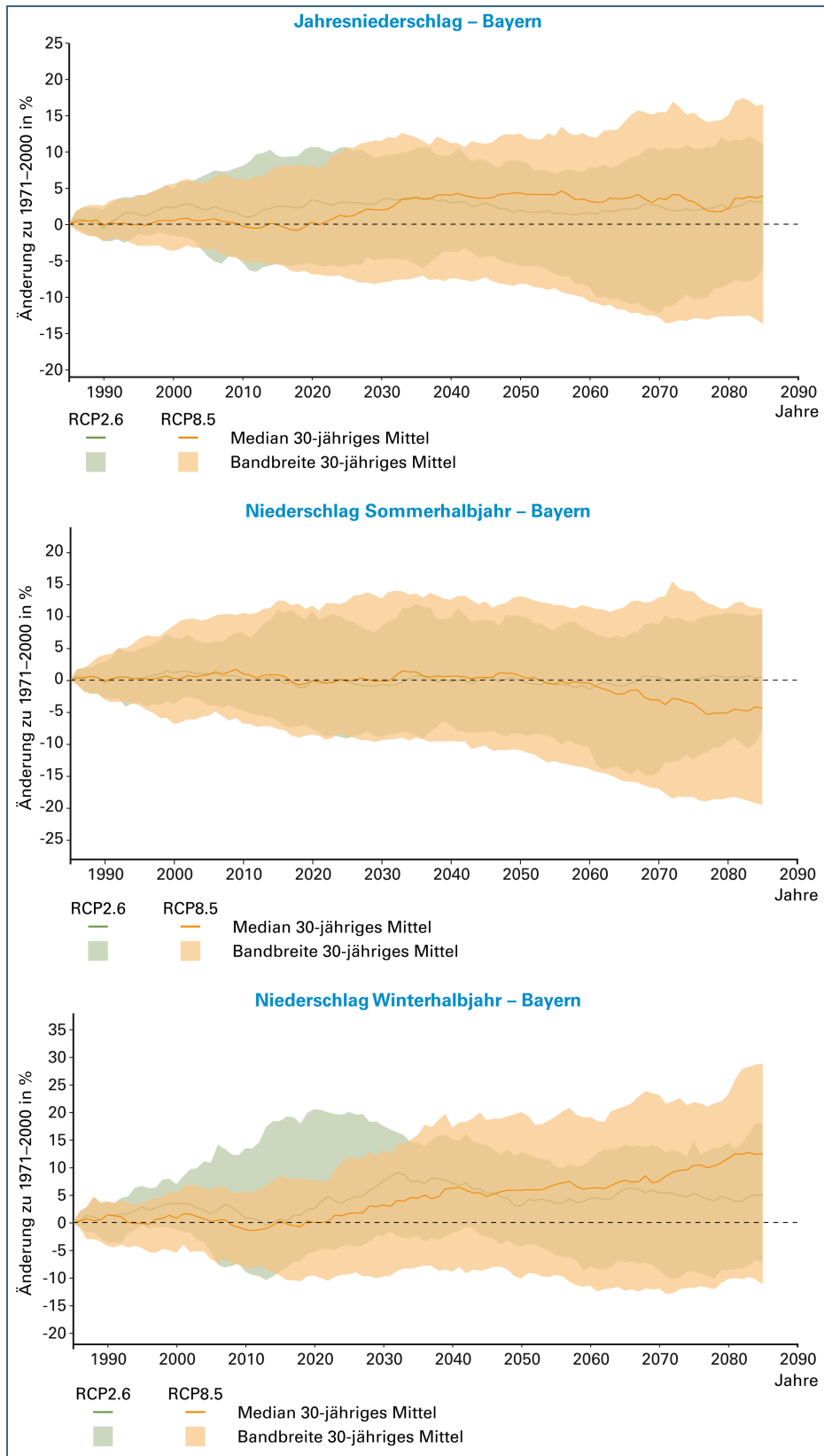


Abb. 17: Klimasignale des durchschnittlichen Niederschlags für das gesamte Jahr sowie das Winter- und Sommerhalbjahr in Bayern in Bezug zum Referenzzeitraum 1971–2000. Dargestellt sind die beiden Szenarien RCP2.6 und RCP8.5. (Quelle: BayKIS).

4 Wasserhaushalt und Abfluss

4.1 Einleitung und Vorbemerkung

Die Analyse des Abflussgeschehens wurde für das gesamte hydrologische Bayern durchgeführt und umfasst alle Flussgebiete die teilweise oder ganz innerhalb des politischen Bayerns liegen. Anhand von 60 repräsentativen Pegel (Abb. 1) werden Detailauswertungen durchgeführt. Beispielhaft werden die Ergebnisse anhand der in Tab. 3 aufgeführten Pegel detaillierter vorgestellt. Die jeweiligen Einzugsgebiete dieser drei Pegel repräsentieren fast das gesamte hydrologische Bayern und beeinflussen sich nicht wechselseitig. Somit ermöglicht diese Auswahl einen Überblick über die Abflusscharakteristik für Nord-, Mittel- und Südbayern. Im Zusatzmaterial finden sich die jeweiligen Auswertungen für alle Kennwerte der restlichen 57 ausgewerteten Pegel.

Tab. 3: Die drei Beispielpegel zur Darstellung der Ergebnisse.

Pegel	Regime	Abflussmaxima	Flussgebiet
Kleinheubach	Puvial	Winter	Main
Passau-Ingling	Nival	Sommer	Inn
Hofkirchen	Nivo-pluvial	Sommer	Donau

Die vorliegenden Abflussprojektionen sind ein wichtiger Baustein für Fragestellungen der Wasserwirtschaft hinsichtlich möglicher Anpassungsmaßnahmen. Aus diesem Grund werden in zwei Fallbeispielen die Pegel Kelheimwinzer und Sylvenstein detaillierter betrachtet und mögliche Anwendungen diskutiert. Der Pegel Kelheimwinzer ist ein Referenzpegel für die Donau-Main Überleitung zur Aufhöhung der Regnitz in Niedrigwasserzeiten. Der Pegel Sylvenstein soll die Möglichkeiten der Anwendung für hochwasserspezifische Fragestellungen aufzeigen.

Da die Projektionsdaten des Bayern-Ensembles als klimatische Eingangsparameter für die Wasserhaushaltsmodellierung verwendet werden, sollten auch die Qualitätskriterien der klimatischen Kennwertanalyse dieser Projektionen beachtet werden. Basierend auf den Empfehlungen der Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgesprächs für Auswertungen der Klimaprojektionen ist die Mindestgröße eines Untersuchungsraumes bei der klimatischen Kennwertanalyse für valide Aussagen 1.500 km². Diese Mindestgröße orientiert sich an der aktuellen Auflösung der verwendeten Klimaprojektionen und soll daher auch bei der Interpretation der Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellierung berücksichtigt werden:

- Pegel mit einem Einzugsgebiet > 1.500 km² zeigen tendenziell robustere Ergebnisse
- Pegel mit einem Einzugsgebiet < 1.500 km² zeigen ggf. tendenziell weniger robuste Ergebnisse

Von den 60 untersuchten Pegel weisen 25 Pegel Einzugsgebiete von weniger als 1.500 km² auf. Für alle Pegel wurde deshalb eine Plausibilisierung der Modellperformanz durchgeführt: Hierbei wurden die auf der Grundlage von Klimaprojektionen simulierten Abflüsse des Referenzzeitraumes (1971–2000) mit den Abflusssimulationen eines sogenannten Kontrolllaufes verglichen, bei dem das hydrologische Modell von beobachteten meteorologischen Daten des Referenzzeitraumes angetrieben wird. Der Vergleich war für alle zu betrachtenden Pegel zufriedenstellend. Deshalb werden alle 60 Pegel im Weiteren als „gleich robust“ angesehen. Die Ergebnisse des Referenzlaufes finden sich in Anhang A.

4.2 Die Wasserbilanz für den Referenzzeitraum 1971 bis 2000

Der Klimawandel in Bayern führt zu höheren Temperaturen, veränderten Niederschlagsverhältnissen und damit einhergehend zu einem veränderten Wasserhaushalt. Dieser lässt sich über die Wasserbilanz beschreiben und bestimmt den Abfluss der bayerischen Flüsse (Kapitel 2.1.1). Da es sich um ein flächenverteiltes Wasserhaushaltsmodell handelt, ist es möglich, die Wasserhaushaltskomponenten für einzelne Flussgebiete separat auszuwerten. Ein Überblick über die einzelnen Komponenten wird im Folgenden anhand der in Abb. 18 dargestellten Einteilung der Flussgebiete Inn, Donau, Main und Elbe gegeben.

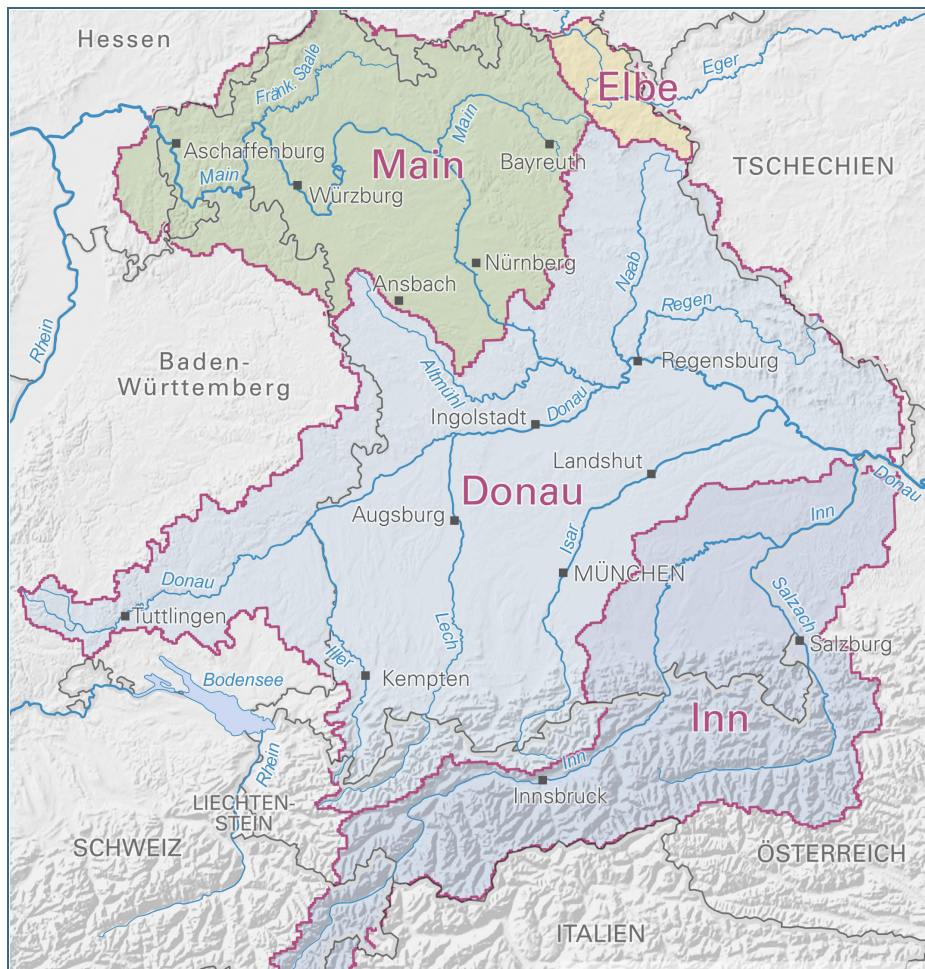


Abb. 18:
Flussgebiete der berechneten Wasserbilanzgrößen.

Im langjährigen Mittel (1971–2000) verdunstet in Bayern über die Hälfte des gefallenen Niederschlages über Pflanzen und Böden, knapp ein Viertel des Niederschlages trägt zur Grundwasserneubildung bei und ein weiteres Viertel fließt aus den Flussgebieten ab (Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss und Basisabfluss) (LfU, 2023). Das verwendete hydrologische Modell WaSiM deckt den größeren Raum des hydrologische Bayerns ab und umfasst somit auch größere Teile von Baden-Württemberg (Donau) und Österreich (Inn, Salzach, Lech, Isar), welche nach Bayern entwässern und somit den Abfluss in den größeren bayerischen Flüssen mitprägen.

In Tab. 4 sind die zur Berechnung der Wasserbilanz benötigten Größen bezogen auf den Referenzzeitraum 1971 bis 2000 aufgeführt. Bis auf den Niederschlag handelt es sich hier um modellierte Werte. Sie wurden von den Wasserhaushaltsmodellen unter Verwendung des Beobachtungsdatensatz (KliRef2014) berechnet, welcher auch für die Kalibrierung der Modelle und für die Plausibilisierung der Abflussprojektionen verwendet wurde (Kapitel 2.4.1). Dargestellt sind der Niederschlag, die aktuelle Verdunstung und die einzelnen Abflusskomponenten für das Gesamtjahr und die beiden Halbjahre bezogen auf das hydrologische Bayern und die in Abb. 18 dargestellten Flussgebiete. Für die Halbjahre wurde

auch der prozentuale Anteil der Speicherspende am Abfluss berechnet. Dieser beschreibt, wie groß der Anteil des Abflusses eines Halbjahres ist, der nicht aus dem Niederschlag, sondern aus den Speichern —Grundwasserspeicher, Schneespeicher, Bodenwasserspeicher, usw.— der Gebiete bilanziell stammt.

Der maximale Unterschied der jährlichen (modellierten) tatsächlichen Verdunstung tritt zwischen Elbe und Donau auf und beträgt 71 mm/a. Wesentlich größer ist die Bandbreite des Niederschlags zwischen den vier Gebieten mit maximal 673 mm/a zwischen den Gebieten von Inn und Main. Somit stellt der Niederschlag die wesentlichste variable Größe dar und bestimmt hauptsächlich den resultierenden Abfluss. Dessen Bandbreite (Schneller- und Basisabfluss) beträgt 669 mm/a, ebenfalls zwischen den Gebieten Inn und Main.

Tab. 4: Durchschnittswerte (mm/Jahr) der Wasserbilanz- und Abflusskomponenten für das hydrologische Bayern und die Flussgebiete des Inn, der Donau, des Main und der Elbe (Anteile innerhalb des hydrologischen Bayerns). Die Werte des Niederschlags basieren auf dem KliRef2014 Datensatz, alle anderen Größen basieren auf dem Referenzmodelllauf (Simulationslauf mit meteorologischen Beobachtungsdaten). Die Werte beziehen sich auf den Referenzzeitraum 1971 bis 2000.

Jahr	Inn	Donau	Main	Elbe	Hydrologisches Bayern
Niederschlag (beobachtet) [mm/a]	1.427	990	755	793	1.043
akt. Verdunstung (modelliert) [mm/a]	518	539	500	468	523
Schneller Abfluss (modelliert)* [mm/a]	651	270	136	210	334
Basisabfluss (modelliert) [mm/a]	269	208	115	113	200
Sommerhalbjahr	Inn	Donau	Main	Elbe	Hydrologisches Bayern
Niederschlag (beobachtet) [mm/a]	853	578	397	421	603
akt. Verdunstung (modelliert) [mm/a]	368	397	384	363	386
Gesamtabfluss (modelliert)* [mm/a]	606	239	85	101	293
Halbjahresbilanz (Delta Speicher) [mm/a]	-121	-58	-72	-43	-76
Prozentueller Anteil des Speichers am Abfluss [%]**	-20 %	-24 %	-85 %	-43 %	-26 %
Winterhalbjahr	Inn	Donau	Main	Elbe	Hydrologisches Bayern
Niederschlag (beobachtet) [mm/a]	572	411	358	371	439
akt. Verdunstung (modelliert) [mm/a]	148	139	115	103	135
Gesamtabfluss (modelliert)** [mm/a]	313	238	166	224	240
Haljahresbilanz (Delta Speicher) [mm/a]**	+111	+34	+77	+44	64
Prozentueller Anteil des Speichers am Abfluss [%]	+35 %	+14 %	+46 %	+20 %	+27 %

*Direkt- + Zwischenabfluss, **Direkt- + Zwischen- + Basisabfluss; ***positiv: Wasser wird dem Speicher hinzugefügt / negativ: dem Speicher wird Wasser entnommen.

Berechnet man die Bilanzgrößen der beiden Halbjahre wird deutlich, dass sich die Herkunft des Abflusses zwischen den Gebieten wesentlich unterscheidet. Im Winterhalbjahr fließt in allen Gebieten weniger ab, als aus der Halbjahres-Wasserbilanz möglich wäre. Diese Differenz trägt hier zum Auffüllen der Speicher bei und schwankt zwischen 34 mm/a (Donau) und 111 mm/a (Inn). Im Sommerhalbjahr hingegen fließt mehr aus den Gebieten ab, als aus der Halbjahres-Wasserbilanz möglich wäre. Hier besteht der Abfluss also zu einem gewissen Anteil aus im Winterhalbjahr gespeicherten Wasser. Dieser Anteil beträgt im Inn Gebiet lediglich 20 % und 24 % für die Donau. Der Anteil der nördlichen Gebiete hingegen ist doppelt so groß für das Gebiet Elbe und viermal so hoch (85 %) für den Main.

Bei den letzteren zwei Gebieten zeigt sich also eine stärkere Abhängigkeit vom innerjährlichen Zusammenspiel der Wasserbilanzgrößen. Der Abfluss im Sommerhalbjahr ist wesentlich davon abhängig, ob genügend Wasser im Winterhalbjahr gespeichert werden konnte. Diese Gebiete werden also hinsichtlich des Basisabflusses sensitiver auf klimatische Veränderungen reagieren. Die südlichen Gebiete sind aufgrund der wesentlich höheren Niederschlagsmenge diesbezüglich weniger sensitiv. Änderungen des Niederschlags werden sich somit nicht so stark auswirken wie in den beiden nördlichen Gebieten. Dies bezieht sich aber nur auf den Mittleren und Niedrigwasserabfluss. Der Hochwasserabfluss ist vielmehr von der Intensität des Niederschlags beziehungsweise der Schneeschmelze abhängig. Dieser Zusammenhang wird in Kapitel 4.3 näher erläutert.

4.3 Zukünftige Entwicklung der Verdunstung und ausgewählter Abflusskomponenten

Kernaussagen Wasserbilanz:

- Die Verdunstung wird bis zum Ende des Jahrhunderts kontinuierlich zunehmen.
- Die Abflussprojektionen für den Basisabfluss zeigen keinen eindeutigen Trend, jedoch ist zum Ende des Jahrhunderts eine Tendenz zur Abnahme beim RCP8.5-Szenario erkennbar.
- Die Speicherung des Niederschlags in Form einer Schneedecke nimmt ab und führt dadurch zu mehr direktem Abfluss in den Wintermonaten.
- In den Sommermonaten nehmen die Höchstabflüsse des schnellen Abflusses zu.

Abb. 19 zeigt die Änderungssignale der mit den Klimaprojektionen modellierten tatsächlichen Verdunstung für das hydrologische Bayern. Der Verlauf für die in Abb. 18 gezeigten Flussgebiete ist vergleichbar und wird deshalb nicht gesondert hier abgebildet. Da die Verdunstung indirekt von der Temperaturzunahme abhängt und die Klimamodelle hier einen sehr klaren und eindeutigen Trend aufweisen ist zu erwarten, dass die Zukunftssimulation der Verdunstung ein ähnlich eindeutiges Änderungssignal aufweist, sofern genügend Wasser für die Verdunstung zur Verfügung steht. Während beim Szenario RCP2.6 („2 °C-Obergrenze“) das maximale Änderungssignal bis zum Ende des Jahrhunderts eine Zunahme von ca. +5 % aufweist, muss beim Szenario RCP8.5 („ohne Klimaschutz“) mit einer maximalen Zunahme von knapp +15 % gerechnet werden. Dass die tatsächliche Verdunstung stetig ansteigt zeigt, dass auf das hydrologische Bayern bezogen genug Wasser für eine konstante Steigerung vorhanden ist. Dem Boden und dem Grundwasserspeicher wird durch kapillaren Aufstieg zusätzlich Wasser entzogen, was wiederum vor allem auf den MQ und den MNQ Auswirkungen hat. Ob die projizierten Niederschlagszunahmen im Winterhalbjahr (Abb. 17) dieses Defizit bei der Grundwasserneubildung ausgleichen oder ob der eher abnehmende oder gleichbleibende Niederschlag im Sommerhalbjahr für beide Szenarien diese Situation verschärfen wird, ist abhängig vom zeitlichen Zusammenspiel der einzelnen Speicher und deren Kapazität. Inwiefern diese Entwicklung Einfluss auf den Abfluss haben wird, kann anhand der Modellierungen des Abflusses abgeschätzt werden.

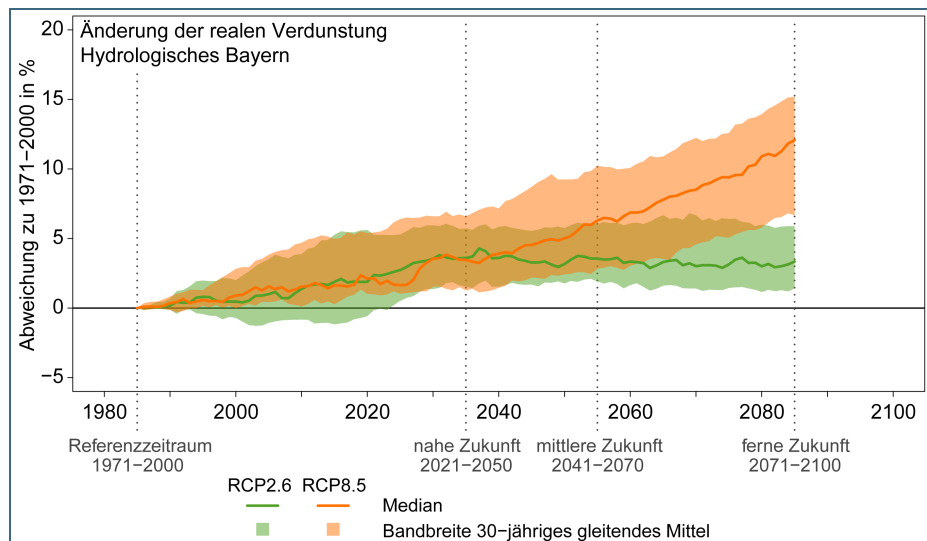


Abb. 19:
Änderungssignale der realen (modellierten) Verdunstung für das hydrologische Bayern. Dargestellt sind die prozentualen Änderungen für die 30-jährigen gleitende Mittel des Wasserhaushaltsjahres.

Hydrologische Modelle bieten die Möglichkeit, alle Komponenten der Wasserbilanz zu simulieren. Somit können auch die verschiedenen Abflussarten (Direkt-, Zwischen- und Basisabfluss), aus denen sich der Abfluss zusammensetzt, mit dem Modell ausgewertet werden. In Kapitel 4.2 wurden diese modellierten Werte für den Referenzzeitraum dargestellt und besprochen. Beobachtete beziehungsweise modellierte Änderungen lassen Rückschlüsse auf deren Einfluss auf Hoch-, Mittel- und Niedrigwasser zu. Beispielsweise hat eine Erhöhung des Anteils an Direktabfluss, welcher dem unmittelbar abflusswirksam werdenden Niederschlag entspricht, Auswirkungen auf den Hochwasserabfluss. Auf der anderen Seite versickert Direktabfluss nicht und kann so auch nicht zur Grundwasserbildung beitragen. Aus diesem Grund führt beispielsweise eine Erhöhung von Starkniederschlagsereignissen mit höherem Direktabfluss trotz gleichbleibender Summe des Jahresniederschlags zu einer Reduzierung des infiltrierenden Niederschlags und somit zu einer verringerten Grundwasserneubildung. Außerdem reduziert sich dadurch auch das gespeicherte Wasser im Oberboden und steht somit den Pflanzen für die Verdunstung nicht mehr zur Verfügung.

Die Änderungssignale des modellierten Basisabflusses (Abb. 20) zeigen sowohl für das Sommer- als auch für das Winterhalbjahr eine große Bandbreite. Für das Winterhalbjahr liegen die maximalen und minimalen Signale bei +/- 10 % für das RCP8.5-Szenario. Das RCP2.6 Szenario weist eine vergleichbare Bandbreite auf. Damit ist keine eindeutige Aussage über die Entwicklung des Basisabflusses für das Winterhalbjahr möglich. Im Sommerhalbjahr hingegen zeigt sich beim Szenario „ohne Klimaschutz“ RCP8.5 eine erkennbare Abnahme des Medians in der fernen Zukunft. Die maximale Änderung beträgt wie für das Winterhalbjahr etwa +10 %, das minimale Signal jedoch ist doppelt so groß und liegt bei -20 %.

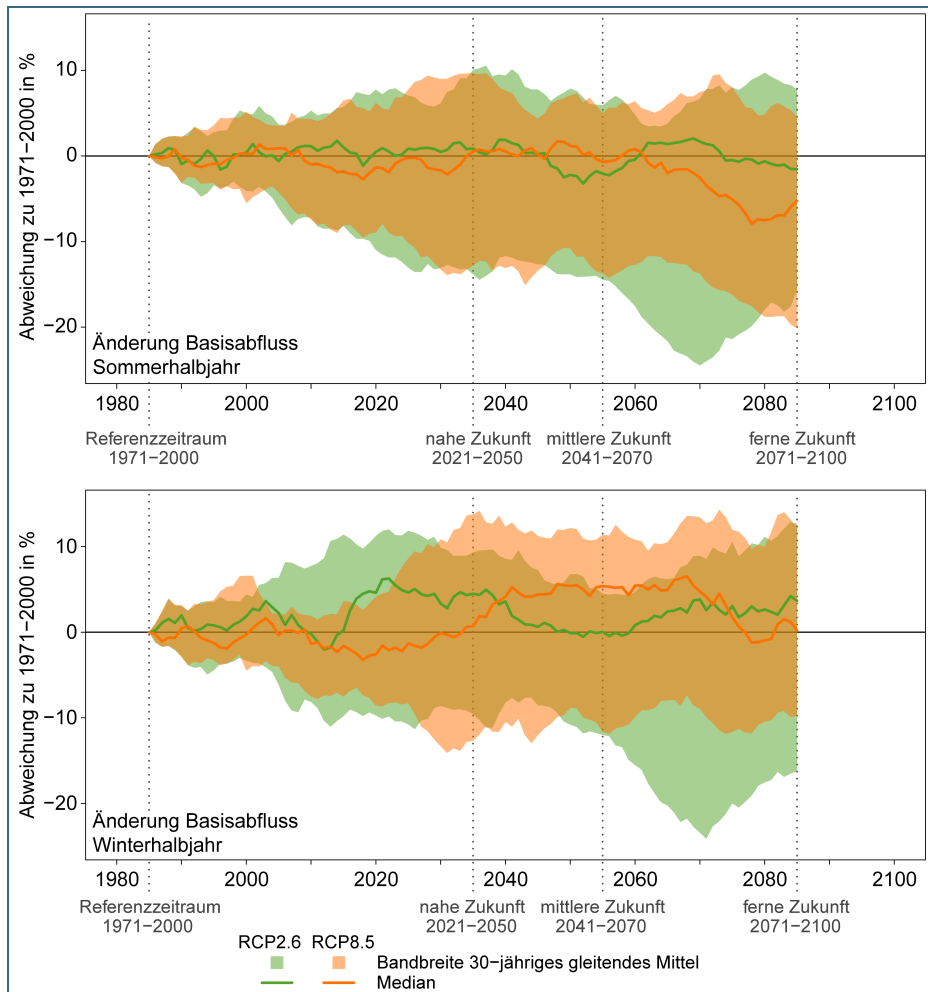


Abb. 20: Änderungssignale des (modellierten) Basisabflusses für das hydrologische Bayern. Dargestellt sind die prozentualen Änderungen für die 30-jährigen gleitenden Mittel des Sommerhalbjahrs (oben) und des Winterhalbjahrs (unten).

Auffällig ist die sehr starke Abnahme am Ende des Jahrhunderts beim RCP2.6 Szenario. Dies ist auf eine einzelne Abflussprojektion zurückzuführen. In Anhang B ist dargestellt, welche Änderungssignale sich ohne dieses Modell ergeben. Das minimale Signal läge so bei -15 %. Auch bei den anderen Auswertungen beeinflusst diese Klimaprojektion die Ergebnisse.

Eine Ursache von Hochwasser im Gebiet des hydrologischen Bayern ist die Schneeschmelze. Abb. 21 zeigt eine abnehmende Entwicklung des mittleren Schneewasseräquivalents im Winterhalbjahr. Im Gegensatz zur Schneehöhe ist das Schneewasseräquivalent ein Maß für die Menge an Wasser aus welcher die Schneedecke besteht und ist somit unabhängig vom physikalischen Zustand (z. B. Dichte) der Schneedecke. Der Median der Änderungssignale für das Szenario „ohne Klimaschutz“ RCP8.5 zeigt eine Reduzierung um 60 % bis zum Ende des Jahrhunderts, während der Median für das Szenario „mit Klimaschutz“ RCP2.6 im Vergleich nur kleinere Änderungen zeigt. Die Abnahme unter RCP8.5 ist auf die steigenden Temperaturen zurückzuführen. Ein direkter Effekt ist, dass Niederschlag in Zukunft nicht mehr in der Schneedecke gespeichert wird, sondern direkt abflusswirksam wird. Dies wird deutlich, wenn man das Änderungssignal des Direkt- und Zwischenabflusses (Schneller Abfluss) im Winterhalbjahr betrachtet (siehe Abb. 21). Dieser zeigt deutliche Zunahmen von bis zu 40 % beim RCP8.5. Das Szenario RCP2.6 hingegen zeigt ein etwas geringeres Signal sowohl bei der Entwicklung des Schneewasseräquivalents als auch dem Signal des schnellen Abflusses. Sehr deutlich ist dabei der Unterschied zwischen den beiden Szenarien beim Schneewasseräquivalent.

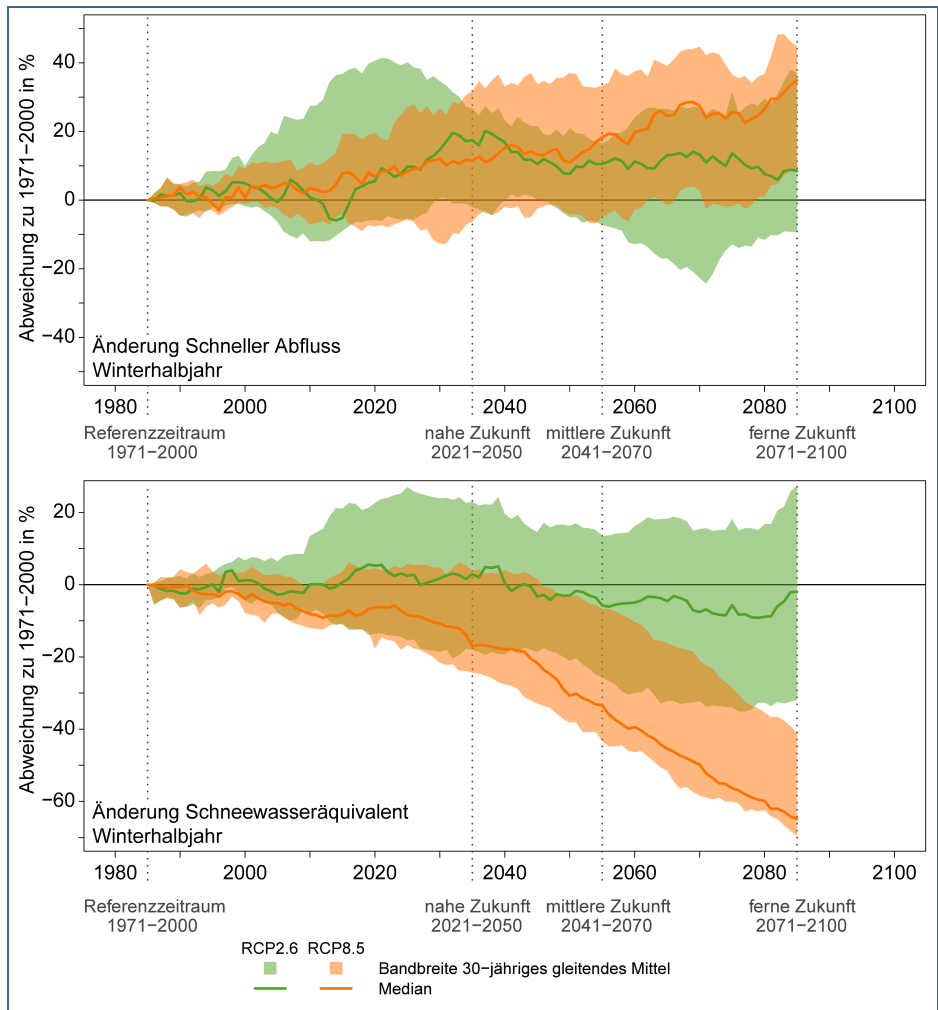


Abb. 21: Änderungssignale im Winterhalbjahr des modellierten Schneewasseräquivalents (unten) und der schnell wirksamen Abflusskomponenten (oben), Direkt- und Zwischenabfluss, für das hydrologische Bayern.

Die Änderungssignale beim schnellen Abfluss im Sommerhalbjahr zeigen einen negativen Trend (Abb. 22). Erwartbar wäre jedoch, dass dieser durch steigende Starkniederschlagsereignisse eher ansteigt. Das sich diese Beobachtung nicht widerspricht wird bei der Änderung der mittleren Höchstwerte des schnellen Abflusses deutlich. Berechnet wurde diese wie der MHQ indem zunächst die Jahreshöchstwerte berechnet wurden. Für die 30-jährigen Zeiträume wurden diese anschließend gemittelt. Man erkennt deutlich, dass sich dieser Kennwert um bis zu +40 % erhöhen wird. Die gesamte Bandbreite dieses Kennwertes liegt fast durchweg im positiven Bereich für beide Szenarien. Der mittlere Anteil des schnellen Abflusses wird sich also reduzieren, die Höchstwerte jedoch deutlich steigern. Somit werden sich auch die Hochwasserspitzen des Abflusses erhöhen, wie sich bei der in Kapitel 4.6.3 dargestellten Entwicklung des MHQs für das Sommerhalbjahr zeigt.

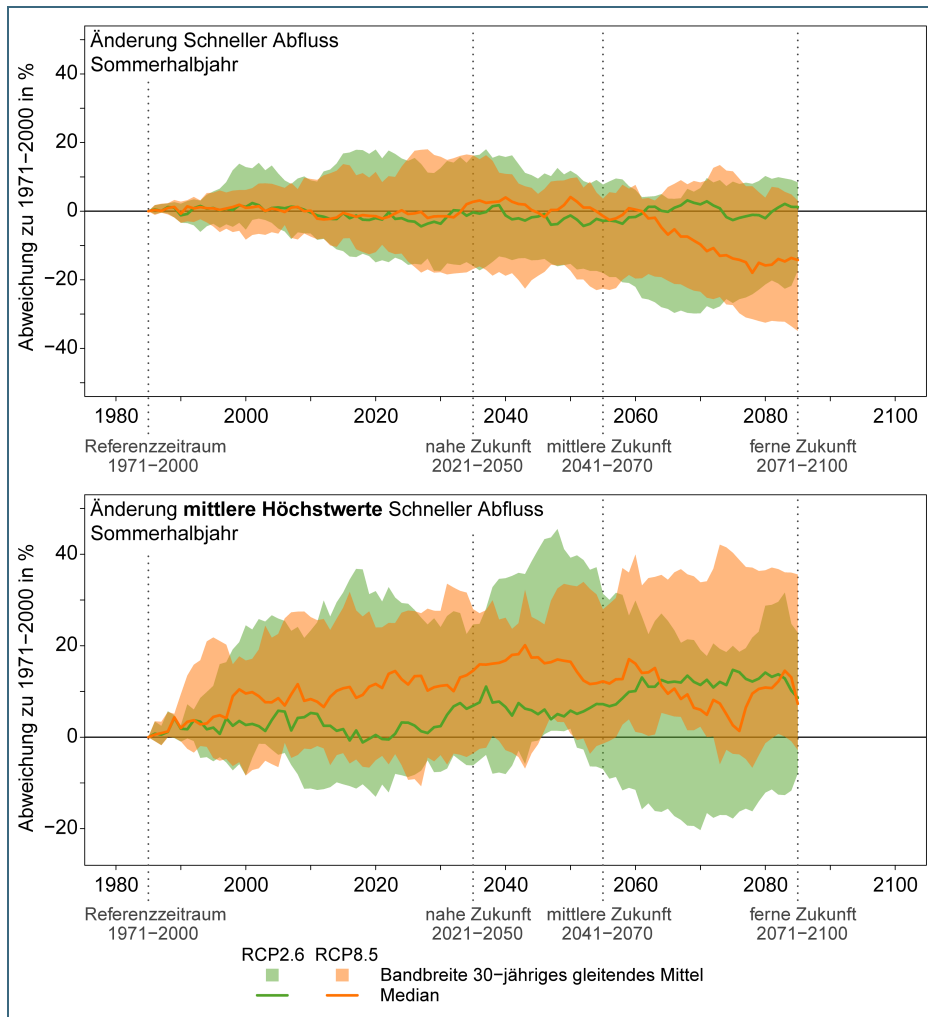


Abb. 22: Klimasignale für den mittleren schnellen Abfluss (oben) und die mittleren Höchstwerte des schnellen Abflusses für das Sommerhalbjahr für das hydrologische Bayern.

4.4 Abflussregime

Kernaussagen Abflussregime:

- Der nivale Anteil am Abflussregime wird bis zum Ende des Jahrhunderts stark abnehmen.
- Vormalig nivo-pluviale Regime entwickeln sich vor allem in der Donauregion zu reinen pluvialen Regimen.
- Änderungen der Regimetypen sind unter dem Szenario RCP8.5 „ohne Klimaschutz“ häufiger als unter RCP2.6 „mit Klimaschutz“.

Über die im Kapitel 2.1.2 beschriebene Abflussregimetypisierung lassen sich aus den Messdaten der untersuchten Pegel drei Abflussregimetypen für Bayern unterscheiden:

- pluvial
- nivo-pluvial
- nival

Die räumliche Lage der verschiedenen Abflussregimegruppen ist in Abb. 23 zu sehen. Alle nördlichen Pegel gehören dem pluvialen Abflussregime an. Dazu zählen die Pegel, die über Elbe und Main entwässern, sowie die meisten Pegel, die an den nördlichen Donauzuflüssen liegen. Entlang der Donau

befindet sich die Übergangszone zum nivo-pluvialen Regime, in der beide Regimetypen gleichermaßen vorkommen. Weiter südlich herrscht das nivo-pluviale Regime vor. Zu den Alpen hin treten auch mehrere Pegel mit nivalem Regime auf.

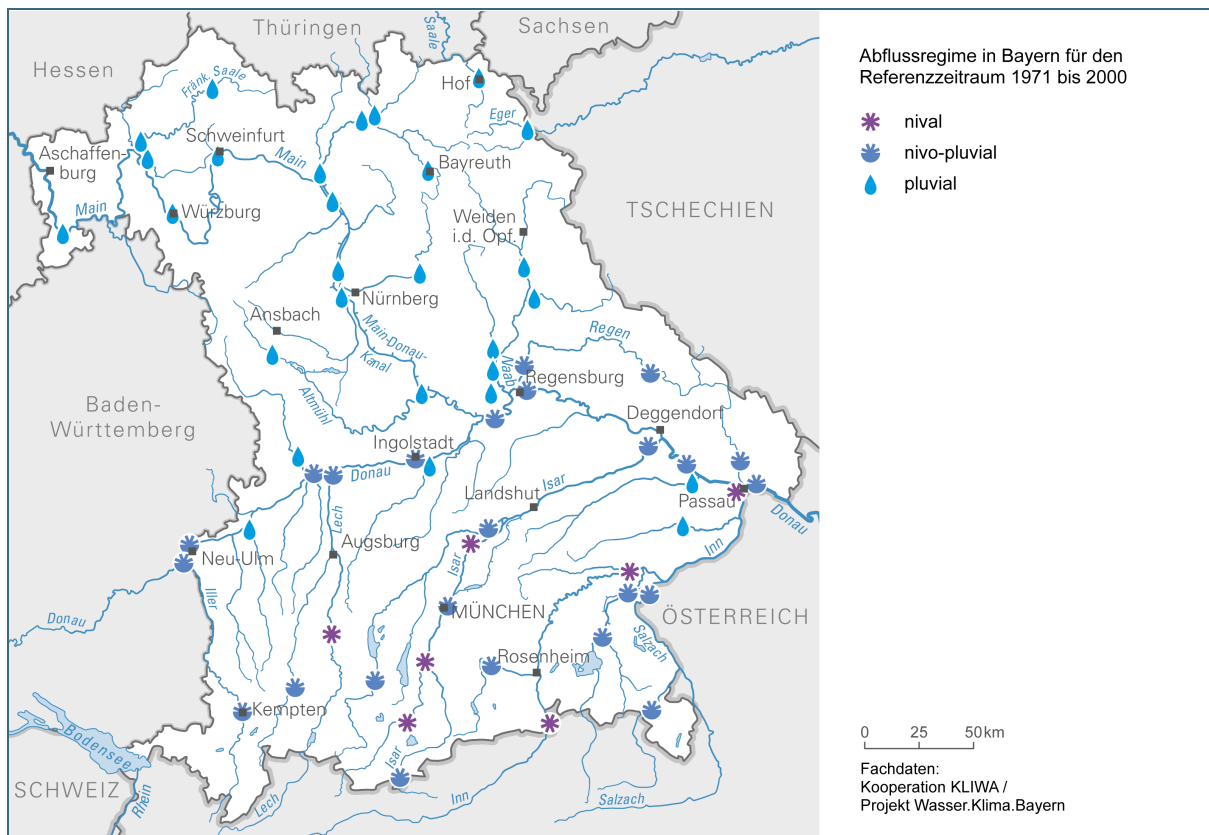


Abb. 23: Abflussregime 60 ausgewählter Pegel auf Grundlage von Messdaten (Zeitraum 1971–2000).

Bei der Betrachtung der Abflussregime ist zu beachten, dass der Mensch durch wasserwirtschaftliche Maßnahmen (z. B. Niedrigwasseraufhöhung, Zu- und Ableitungen oder Hochwasserschutz) Einfluss auf das Abflussgeschehen nimmt. Hierdurch sind die Messdaten an einigen Pegeln anthropogen beeinflusst und werden anhand der Messdaten so anderen Regimen zugeordnet, als dies unter natürlichen Umständen möglicherweise der Fall wäre.

Die Abflussregimetypisierung nach Grimm (Kapitel 2.1.2) wurde auch für die verwendeten Zukunftszeiträume anhand der Abflussprojektionen durchgeführt. Hierbei wurde für jede Projektion zunächst das Abflussregime abgeleitet. Das am häufigsten vorkommende Regime innerhalb des Ensembles wurde dann für die weitere Auswertung übernommen. Bei einem Pegel (Biessenhofen) konnte kein Regime für den Zukunftszeitraum abgeleitet werden und wird deshalb als „nicht definiert“ bezeichnet. So kann untersucht werden, ob sich das Abflussregime eines Pegels bis zum Ende des Jahrhunderts wahrscheinlich ändert.

In Abb. 24 sind die 60 Auswertepiegel aufgeschlüsselt nach den drei Regimetypen dargestellt. Zum einen wird die Anzahl an Pegeln für die Vergangenheit aufgeführt, zum anderen die Anzahl der einzelnen Regimetypen für die ferne Zukunft (2071–2100) für beide Szenarien. Die Verteilung der Regime in der Vergangenheit zeigt, dass fast 50 % der Pegel ein pluviales Regime aufweisen. Nivo-pluviale Regime treten an 40 % der Pegel auf, während an etwa 10 % ein nivales Regime vorliegt. Unter RCP2.6 verändert sich die Verteilung in der fernen Zukunft dahingehend, dass der Anteil an nivo-pluvialen Regimen sinkt und die pluvialen Regime häufiger werden, während die nivalen Regime konstant bleiben. Die Ergebnisse des Szenarios „ohne Klimaschutz“ (RCP8.5) zeigen eine deutlichere Verschiebung

der Regime. Hier treten keine reinen nivalen Regime in der fernen Zukunft mehr auf. Pluviale und nivo-pluviale Regime verhalten sich ähnlich wie unter RCP2.6.

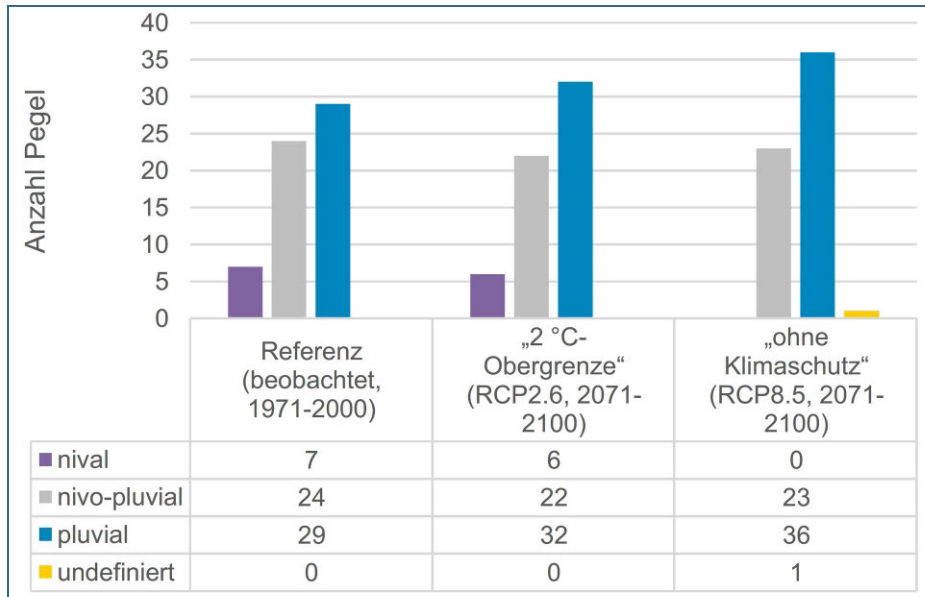


Abb. 24:
Abflussregime der 60
Auswertepegel in der
fernen Zukunft (2071–
2100) für RCP2.6 und
RCP8.5 im Vergleich
zum Referenzzeitraum.

Die Karten in Abb. 25 zeigen die räumliche Verteilung der Regime. Regimeänderungen kommen ausschließlich in der südlichen Hälfte Bayerns vor. Es ist zudem aufgrund der Klimaveränderungen zu erwarten, dass die bereits vorherrschenden Abflussregime im Norden ausgeprägter werden. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich die Regime im Szenario ohne Klimaschutz RCP8.5 in größerem Ausmaß verändern als beim Szenario RCP2.6 mit Einhaltung der 2 °C-Obergrenze. Insgesamt fällt auf, dass eine Verschiebung von nival und nivo-pluvial hin zu pluvial stattfindet. Dies deutet darauf hin, dass sich durch den Klimawandel die Bedeutung der Schneedecke vermindert, während die des flüssigen Niederschlags im Winter zunimmt.

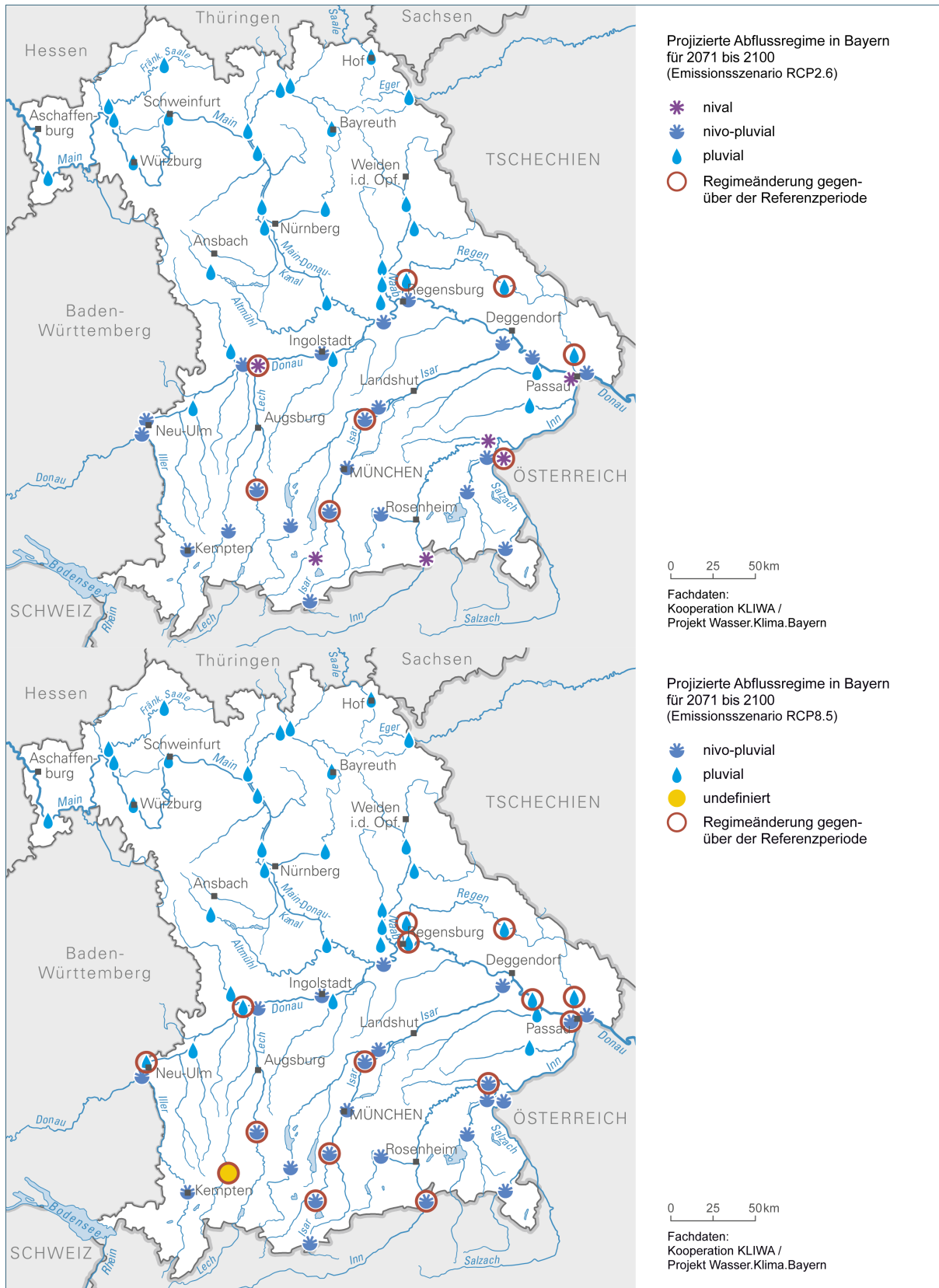


Abb. 25: Abflussregime der 60 Auswertepel in Bayern bezogen auf die ferne Zukunft (2071 bis 2100) für die beiden Szenarien RCP2.6 und RCP8.5. Regimeänderungen im Vergleich zu den Regimen des Referenzzeitraums sind mit einem roten Kreis gekennzeichnet.

Für die drei Beispielpegel sind in Abb. 26 bis Abb. 28 direkte Vergleiche der durchschnittlichen monatlichen Abflüsse aus den beobachteten Pegeldata für den Referenzzeitraum und den dazugehörigen Abflussprojektionen für die drei betrachteten Zukunftszeiträume dargestellt. Die beobachteten Abflüsse liegen weitestgehend innerhalb der Bandbreiten der beiden Szenarien für alle Zeiträume. Betrachtet man hingegen nur den Median der Abflussprojektionen zeigen sich größere Unterschiede:

Am Pegel Kleinheubach zeigen die Abflussprojektionen im Median kaum Änderungen. Bis zum Ende des Jahrhunderts verstärkt sich zwar auch hier die Abnahme der sommerlichen durchschnittlichen Abflüsse, dies hat aber keinen Effekt, der zu einer Änderung des Regimetyps führen würde, sondern verstärkt viel eher das vorherrschende Regime.

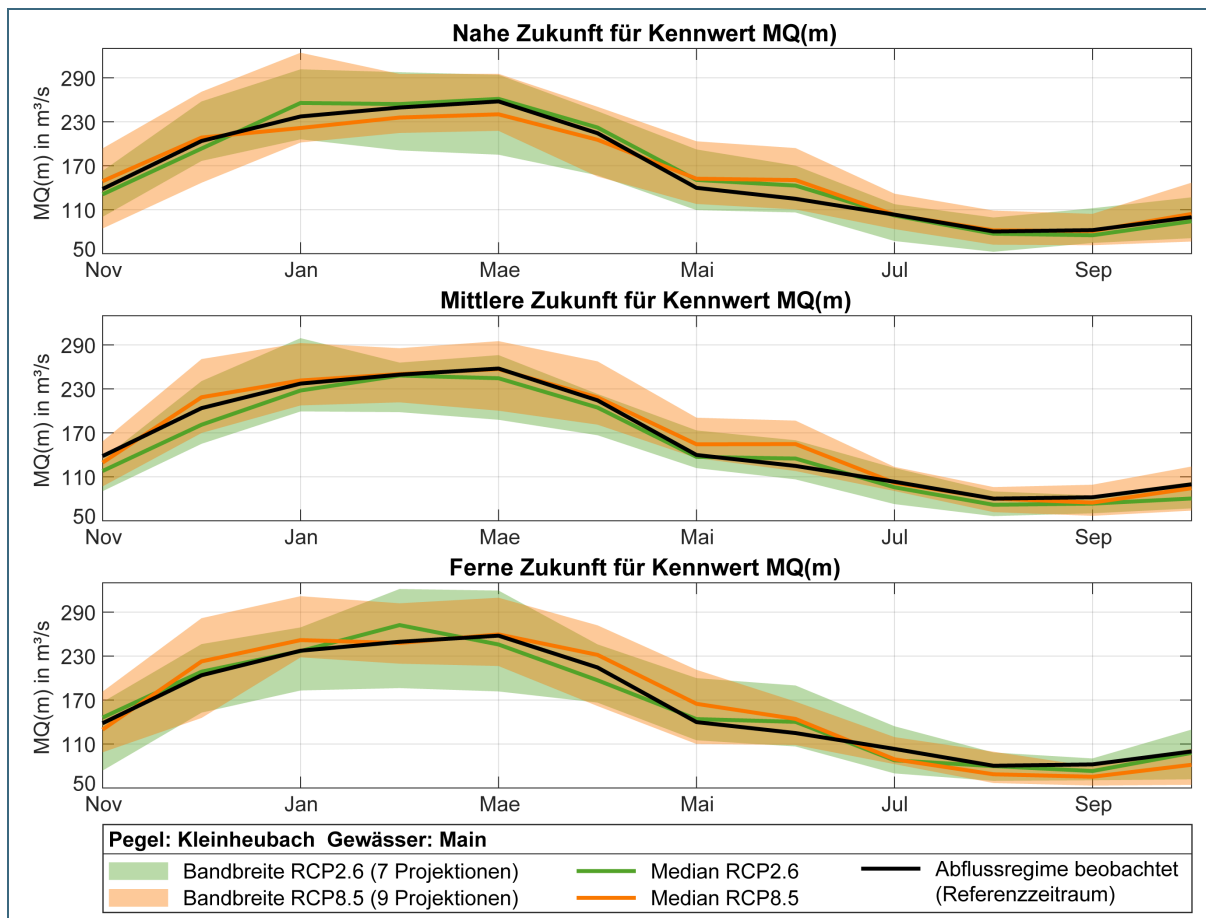


Abb. 26: Jahresgang des Abflusses (monatlicher MQ) für den Pegel Kleinheubach.

Der Pegel Hofkirchen lässt im Winter eine ähnliche Entwicklung erkennen, die aber nicht so ausgeprägt ist wie am Pegel Passau-Ingling. Zusätzlich kann hier auch noch eine Verringerung des Abflusses in den Monaten Juli bis Oktober festgestellt werden, welche sich bis zum Ende des Jahrhunderts verstärken wird. Daraus ergibt sich besonders beim RCP8.5 eine Veränderung hin zu einem pluvialen Regime. Die Auswertungen der Bundesanstalt für Gewässerkunde im LAWA Klimawandel-Bericht 2020 (LAWA, 2020) zeigen eine vergleichbare Veränderung.

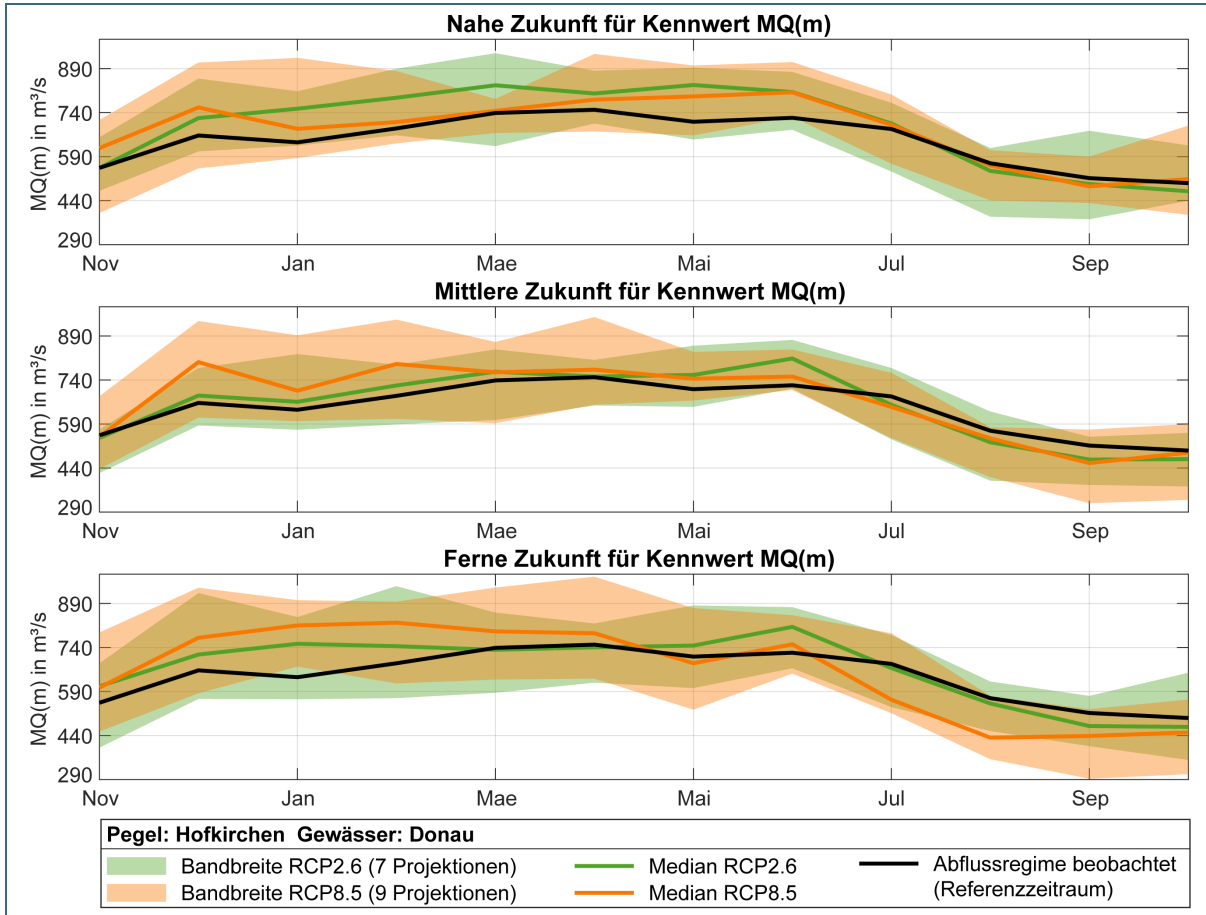


Abb. 27: Jahresgang des Abflusses (monatlicher MQ) für den Pegel Hofkirchen.

Am Pegel Passau-Ingling zeigt das nivale Regime starke Veränderungen in den Wintermonaten. Von etwa November bis März liegen die Abflussprojektionen schon in der nahen Zukunft über den beobachteten Wert des Referenzzeitraumes. In der fernen Zukunft differenziert sich der monatliche Abfluss je nachdem welches Szenario betrachtet wird. Dies kann direkt auf die stärker ansteigende Temperatur beim Szenario RCP8.5 zurückgeführt werden und hängt mit der dadurch reduzierten Speicherung des Niederschlags in der Schneedecke zusammen. Während die Änderung für das RCP2.6 nicht stark genug ist, damit ein anderer Regimetyt entsteht, wird dieser Pegel für das RCP8.5 zukünftig ein nivo-pluviales anstatt eines rein nivalen Regimes aufweisen. Die Auswertungen der Bundesanstalt für Gewässerkunde im LAWA Klimawandel-Bericht 2020 (LAWA, 2020) zeigen ebenfalls eine vergleichbare Veränderung.

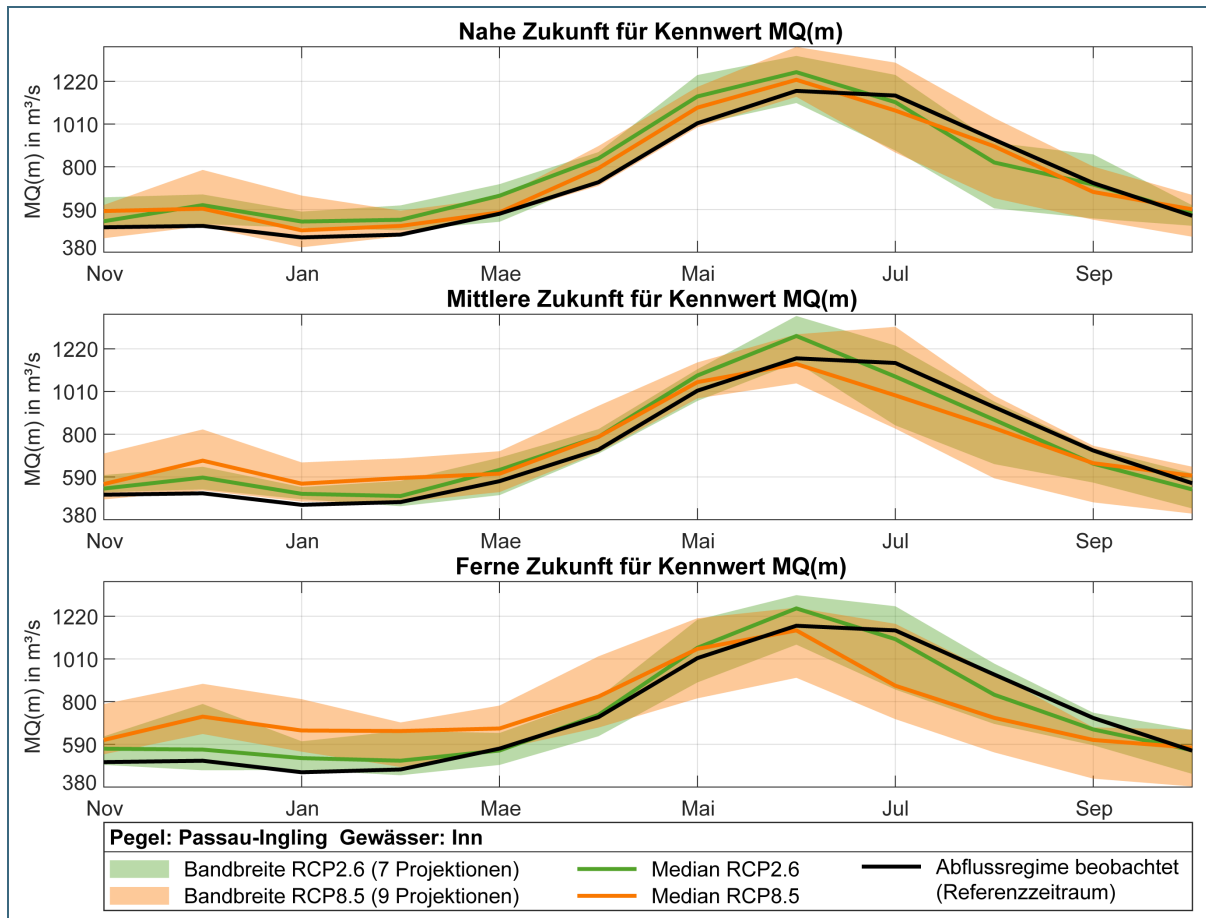


Abb. 28: Jahresgang des Abflusses (monatlicher MQ) für den Pegel Passau-Ingling.

4.5 Entwicklung der beobachteten Abflüsse

Kernaussagen Trends aus den Beobachtungen:

- Mittlerer Abfluss: Während der MQ im Sommerhalbjahr von 1951 bis heute größtenteils abgenommen hat, hat er im Winterhalbjahr eher zugenommen.
- Jährliche Niedrigstabflüsse: Die NQs haben seit 1951 im Sommerhalbjahr für Gesamtbayern abgenommen. Diese Entwicklung ist bei vielen Pegel signifikant. Im Winterhalbjahr zeigen viele Pegel eine Zunahme oder auch keine Veränderungen.
- Jährliche Höchstabflüsse: Die HQs haben in beiden Halbjahren größtenteils zugenommen. Jedoch sind diese Trends in den meisten Fällen nicht signifikant.
- Zu beachten ist, dass es sich dabei um gemessene Werte handelt, die teilweise zusätzlich durch wasserwirtschaftliche Maßnahmen (z. B. Niedrigwasseraufhöhung, Hochwasserschutz) beeinflusst sind. Die messbaren Veränderungen sind somit nicht zwingend alleine auf den Klimawandel zurückzuführen.

Bevor im Folgenden die Ergebnisse der Kennwertanalyse aus den Abflussprojektionen gezeigt werden, ist zunächst zur ergänzenden Einordnung ein Blick auf die beobachteten Trends der Vergangenheit im Zeitraum von 1951 bis 2023 sinnvoll. Dafür wurde die in der Länderkooperation KLIWA entwickelte Methodik (KLIWA, 2022a) auf die verfügbaren beobachteten Pegeldata angewandt. Da nicht für alle Auswertepegel Beobachtungen ab 1951 vorlagen, musste für die Auswertung der Messdaten

die Anzahl der ausgewerteten Pegel auf 43 reduziert werden (Abb. 29). Dabei wird zuerst ein linearer Trend auf Basis einer Reihe aus jährlichen MQ, NQ und HQ-Werten berechnet. Über die Steigung der Geraden wurde ein Änderungssignal berechnet. Liegt die Änderung bei maximal +/- 5 % wird dies nicht als Zu- oder Abnahme interpretiert. Zusätzlich wurde die Signifikanz nach Mann-Kendall bestimmt. Für die Interpretation wurde ein Signifikanzwert von 0,99 als hoch signifikant, ein Wert größer 0,95 als signifikant klassifiziert. Die aufgeführten Signifikanzen und Trends verwenden alle das Anfangsjahr 1951. Dadurch wird gewährleistet, dass alle analysierten Zeitreihen dieselbe Länge aufweisen. Das Endjahr der betrachteten Zeitreihen ist 2023. Da Messdaten verwendet werden, ist auch hier zu berücksichtigen, dass damit auch anthropogene Einflüsse mit erfasst werden.

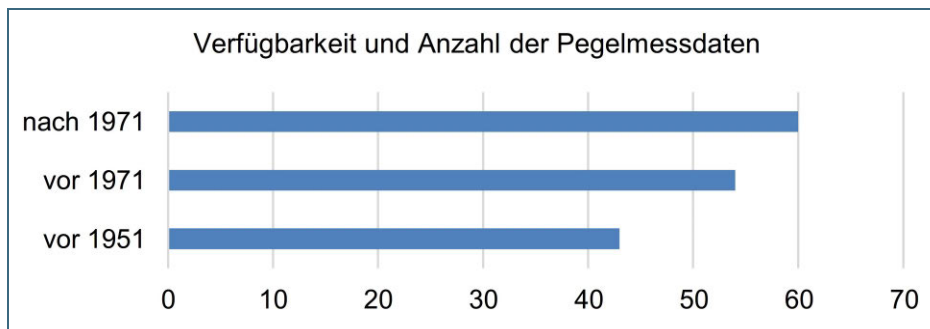


Abb. 29:
Anzahl der gemessenen Pegelzeitreihen für den mittleren täglichen Abfluss sortiert nach Beginn der Aufzeichnungen.

4.5.1 Trends im beobachteten mittleren Abfluss

In der Karte (Abb. 30) sind die Zu- oder Abnahmen des MQs sowie die Signifikanzen der 43 betrachteten Pegel für die beiden hydrologischen Halbjahre dargestellt. Im Winterhalbjahr können überwiegend zunehmende Trends festgestellt werden, im Sommerhalbjahr überwiegend abnehmende Trends. Auffallend sind die hoch signifikanten Zunahmen der Pegel an der Rednitz bzw. Regnitz. Während alle Pegel des Mains oberhalb der Mündung der Regnitz in den Main mainaufwärts abnehmende Trends zeigen, weisen alle mainabwärts gelegenen Pegel zunehmende Trends im Sommerhalbjahr auf. Dies ist auf den Einfluss durch das fränkische Überleitungssystem zurückzuführen. Die Auswertungen zeigen damit, dass das Überleitungssystem Wirkung zeigt und als effektive Maßnahme zur Klimaanpassung hinsichtlich der Niedrigwasserproblematik angewendet werden könnte. Weitere Informationen zur Überleitung sind auf der [Internetseite des Wasserwirtschaftsamt Ansbach](#) oder in Kapitel 4.6.2.3 zu finden.

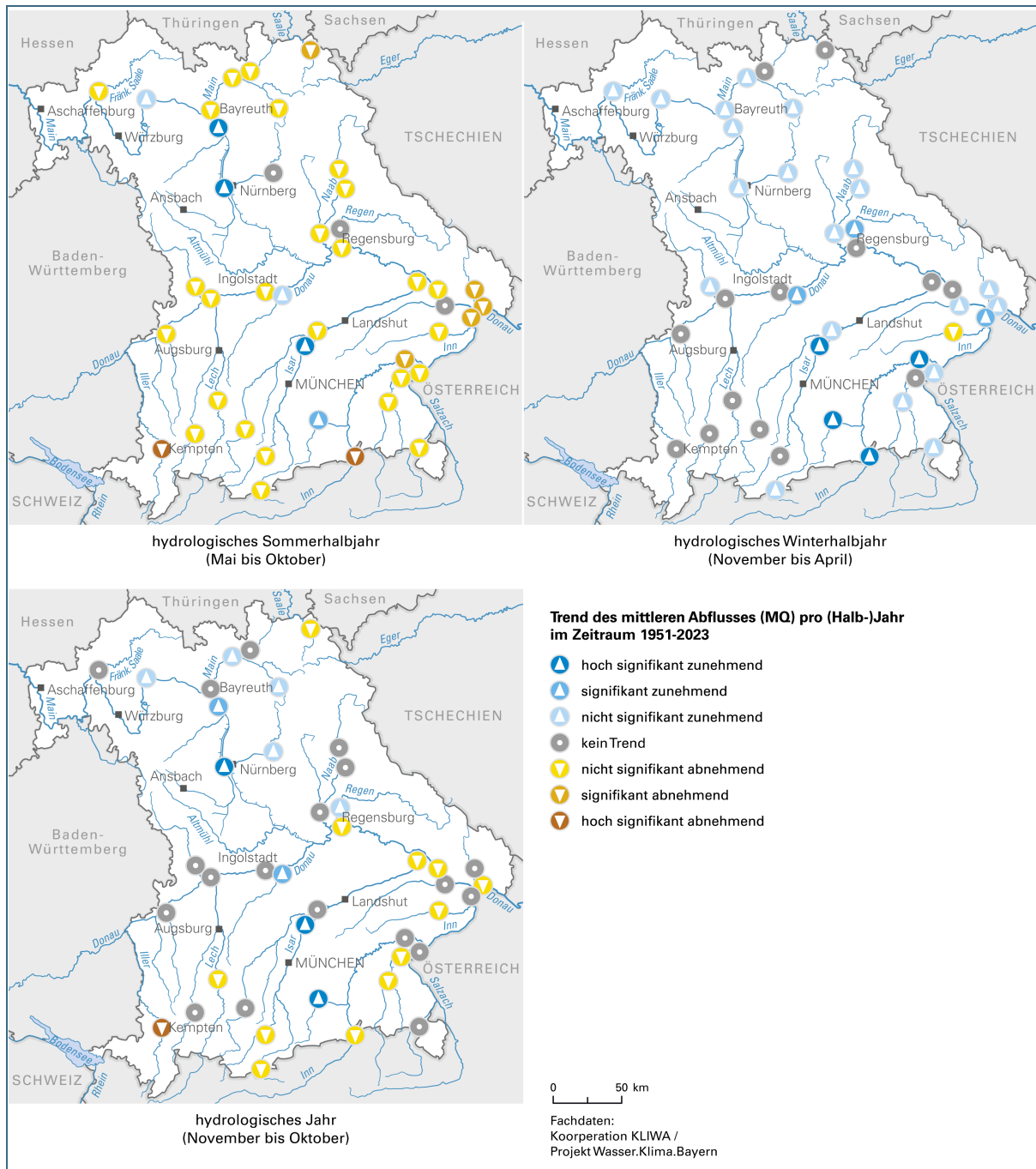


Abb. 30: Zu- und abnehmende Trends des MQs von 1951 bis 2023 im hydrologischen Jahr, Sommer- und Winterhalbjahr in Bayern.

Eine zusammenfassende Darstellung der gemessenen Veränderungen des jährlichen und halbjährlichen MQs aller 43 Pegel zeigt Abb. 31. Für den jährlichen MQ weisen in etwa die gleiche Anzahl an Pegel jeweils einen zunehmenden oder unveränderten Trend auf. Die Anzahl der Pegel mit abnehmendem Trend ist hierbei nur leicht erhöht. In den überwiegenden Fällen sind die Trends aber nicht signifikant.

Ein differenzierteres Bild zeigen die Zu- und Abnahmen während der Sommer- und Winterhalbjahre. Hier weisen die Signale mehrheitlich eine Abnahme im Sommer und eine Zunahme im Winter auf. Auch hier kann aber nur bei den wenigsten Pegeln eine Signifikanz der Trends festgestellt werden.

Berücksichtigt werden muss zudem, dass im Sommerhalbjahr vier von fünf Pegel mit einem hoch signifikant zunehmenden Trend von der Donau-Main Überleitung beeinflusst sind. Dieses Ergebnis deckt sich auch mit den gemeinsam mit anderen südlichen Bundesländern im Projekt KLIWA ermittelten Trends (KLIWA, 2022a).

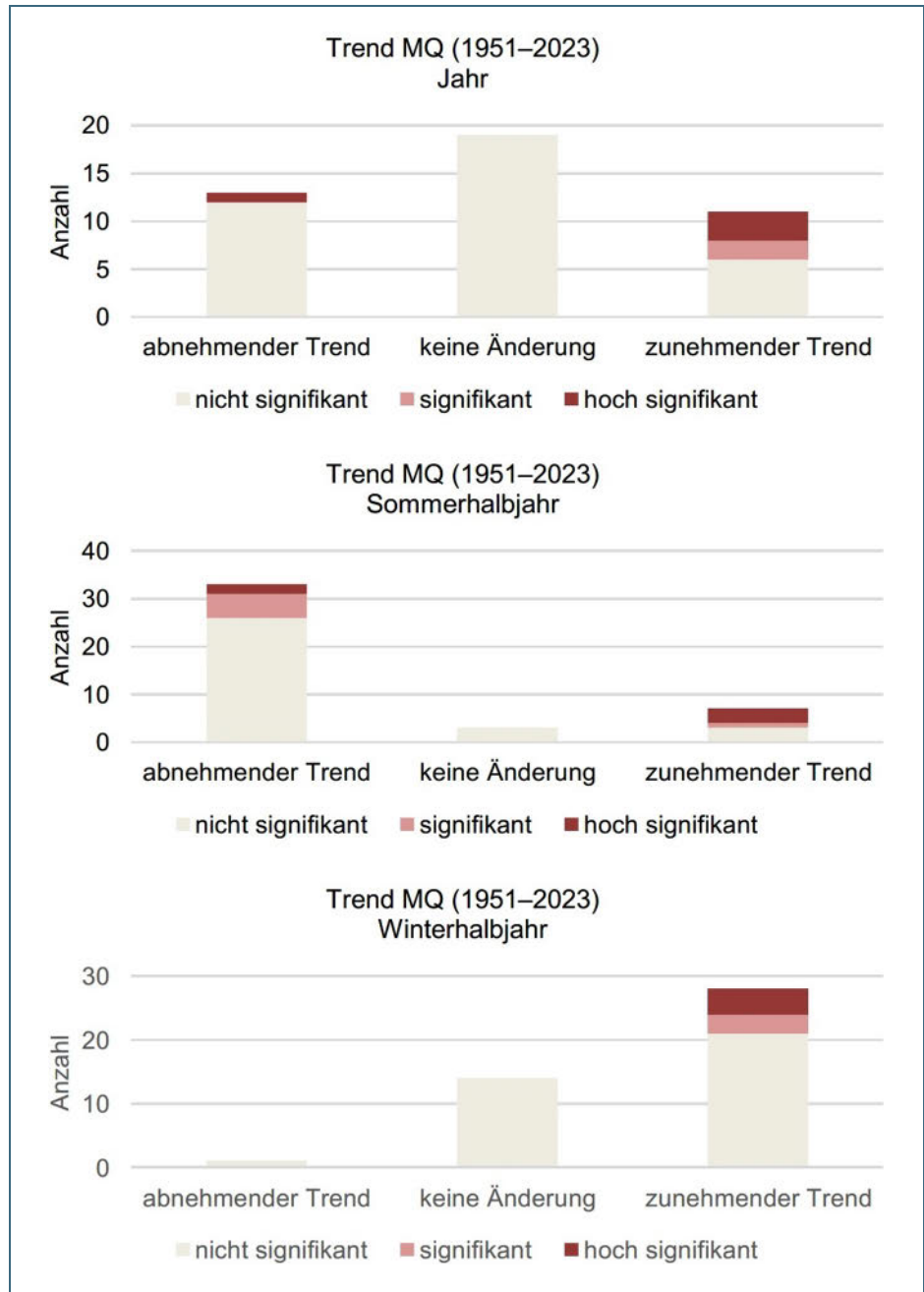


Abb. 31: Anzahl der Pegel mit zu- und abnehmenden Trends für die jährlichen und halbjährlichen MQs von 1951 bis 2023 für 43 Untersuchungspegel.

4.5.2 Beobachteter Niedrigwasserabfluss

In der Karte (Abb. 32) sind die Zu- oder Abnahmen sowie die Signifikanzen der 43 betrachteten Pegel der NQs für die beiden Halbjahre dargestellt. Abnehmende Trends der Niedrigwasserabflüsse können im Sommer in ganz Bayern beobachtet werden, mit Ausnahme der Pegel an der Regnitz mit dem Einfluss der Überleitung und einzelner Pegel an den südlichen Zuflüssen der Donau. Viele der sommerlichen abnehmenden Trends sind hoch signifikant. Im Winter hingegen weist die Mehrheit der Pegel einen zunehmenden Trend auf oder zeigt keine Änderung. Lediglich vereinzelte Pegel zeigen auch im Winter einen abnehmenden Trend.

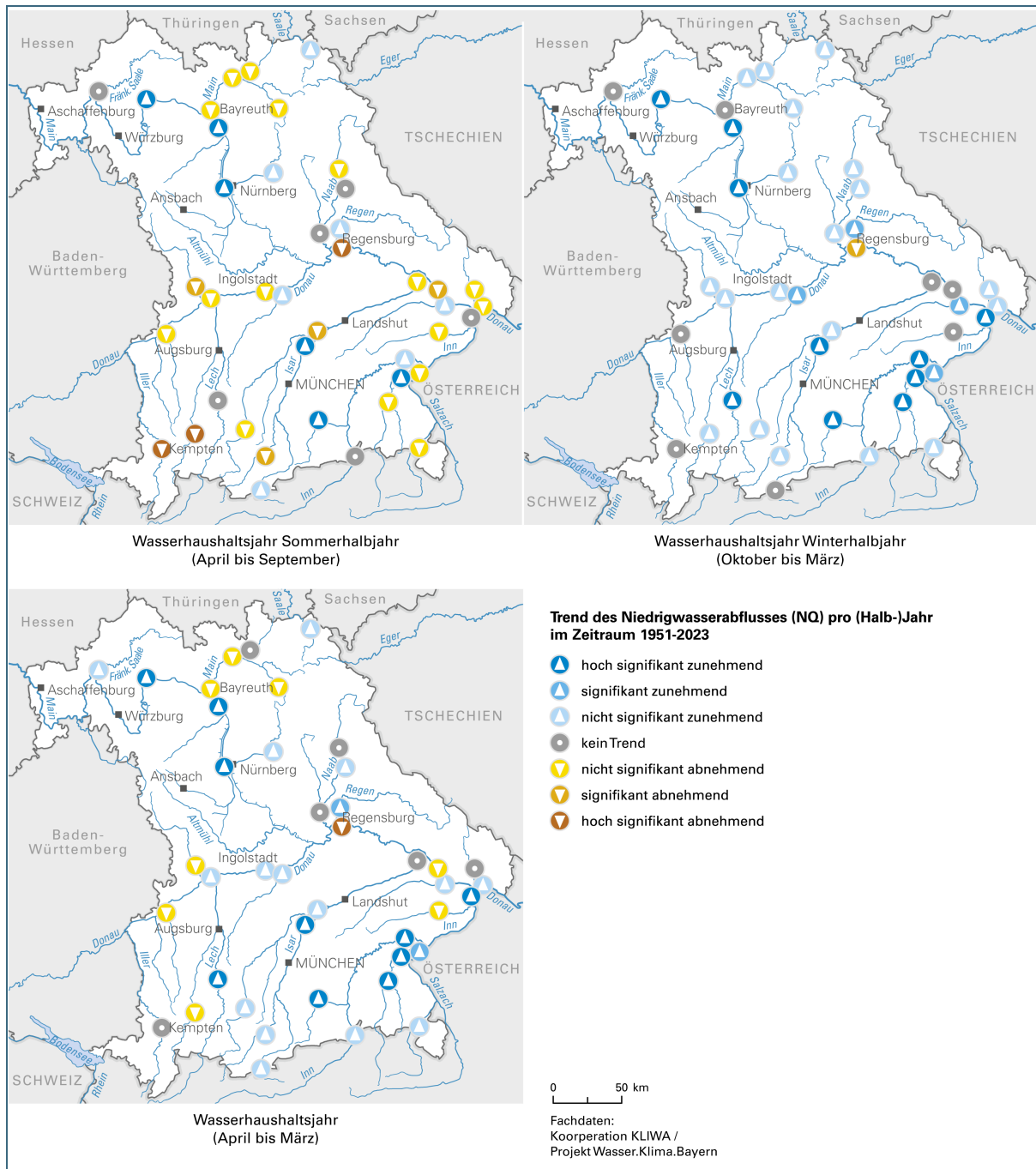


Abb. 32: Zu- und abnehmende Trends beim NQ von 1951 bis 2023 im hydrologischen Sommer- und Winterhalbjahr in Bayern.

Eine zusammenfassende Darstellung der gemessenen Veränderungen der jährlichen und halbjährlichen NQs der 43 betrachteten Pegel zeigt Abb. 33. Gesamtjährlich betrachtet weist die Mehrheit der Pegel einen abnehmenden Trend der jährlichen Niedrigabflüsse auf. Bei etwas weniger als der Hälfte der Pegel sind diese Änderungen signifikant. Dies gilt zwar auch für die Zunahmen, jedoch muss davon ausgegangen werden, dass diese hohe Signifikanz der hier ausgewerteten Pegel an der Regnitz und am Main auf die seit den 90er-Jahren bestehende Donau-Main Überleitung zurückzuführen ist.

Die Entwicklung der Zu- und Abnahmen sowie die Unterschiede zwischen Gesamtjahr, Winter- und Sommerhalbjahr werden in der Darstellung der halbjährlichen Trends deutlich. Gut ersichtlich sind die Unterschiede zwischen den Jahreszeiten: Im Sommer sind mehrheitlich Pegel mit abnehmenden

Trends zu beobachten. Nur etwa zehn Pegel weisen einen zunehmenden Trend auf – fünf Pegel davon mit einer hohen Signifikanz. Die hohe Anzahl an hoch signifikanten Zunahmen ist, wie auch bei der gesamtjährlichen Betrachtung, auf die Donau-Main Überleitung zurückzuführen.

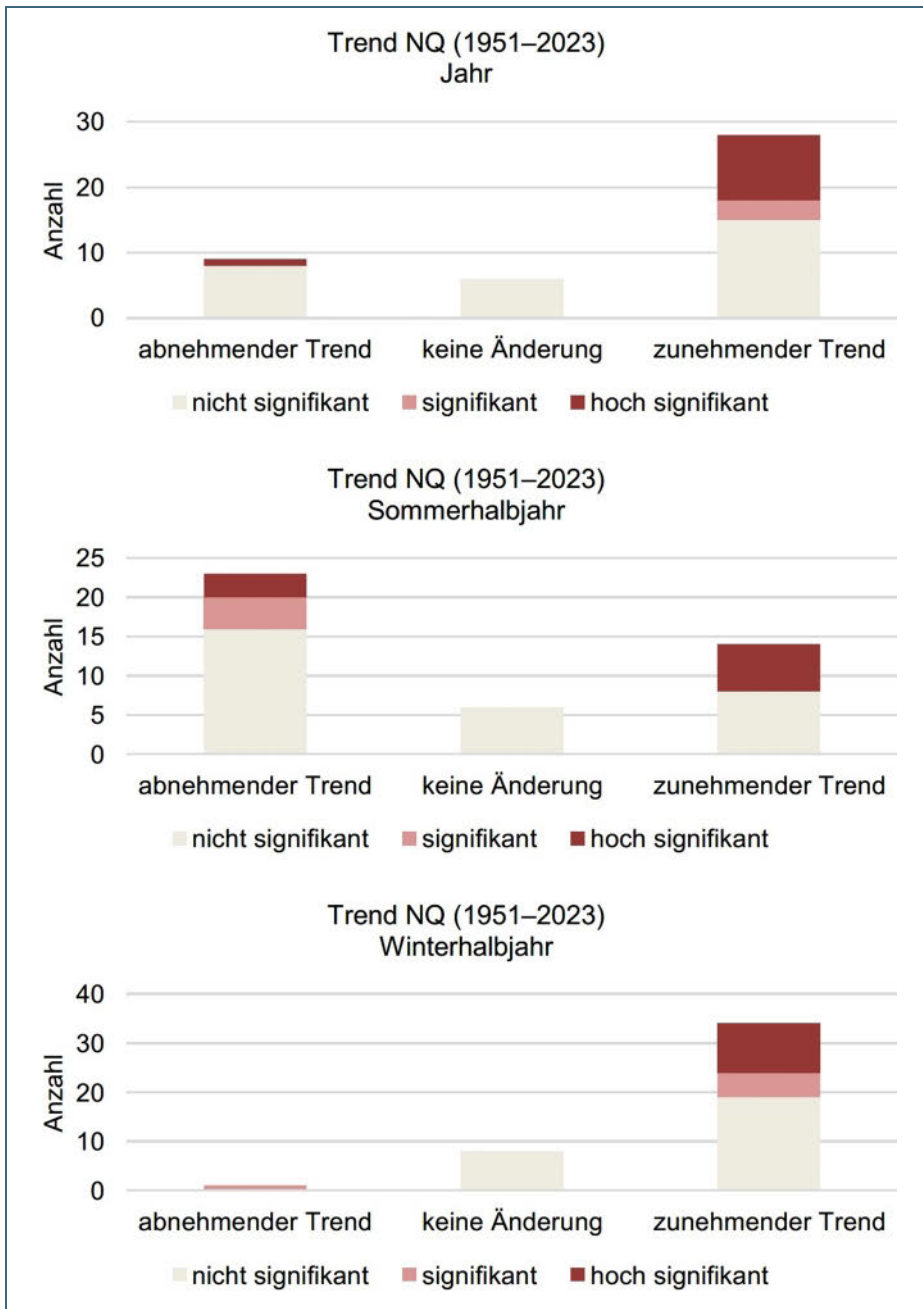


Abb. 33: Anzahl der Pegel mit zu- und abnehmenden Trends für die jährlichen und halbjährlichen NQs von 1951 bis 2023 für 43 Untersuchungspegel.

4.5.3 Beobachteter Hochwasserabfluss

In der Karte (Abb. 34) sind die Zu- oder Abnahmen sowie die Signifikanzen der 43 betrachteten Pegel der HQs für die beiden Halbjahre dargestellt. Man erkennt, dass Pegel mit zunehmendem Trend für beide Halbjahre überwiegen. Tendenziell ergibt sich für Südbayern ein homogeneres Bild zunehmender Höchstabflüsse während in Nordbayern teils entgegengesetzte Trends bei benachbarten Pegeln beobachtet werden können.

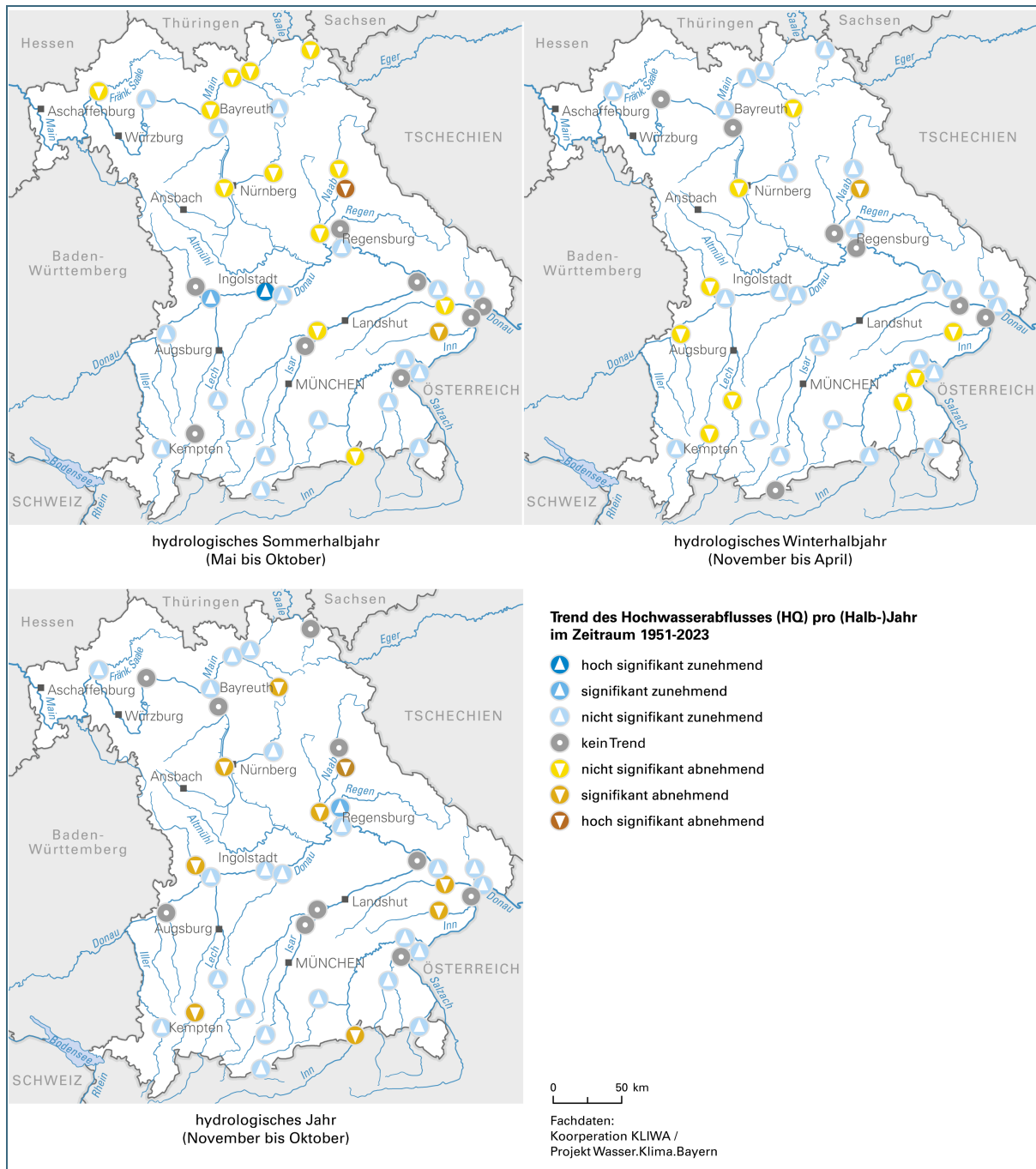


Abb. 34: Zu- und abnehmende Trends beim HQ von 1951 bis 2023 im hydrologischen Sommer- und Winterhalbjahr in Bayern.

Eine zusammenfassende Darstellung der gemessenen Veränderungen des jährlichen und halbjährlichen HQs der 43 Pegel zeigt Abb. 35. Betrachtet man die Änderungen für das hydrologische Jahr, so zeigt sich beim jährlichen HQ bei der überwiegenden Anzahl der untersuchten Pegel ein zunehmender Trend. Es ist jedoch festzuhalten, dass die Trends der betrachteten Pegel überwiegend nicht signifikant sind. In den Sommer- und Winterhalbjahren zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei der gesamtjährlichen Betrachtung. Der größere Teil der Pegel weist einen zunehmenden Trend im Winter- und Sommerhalbjahr auf. Dennoch zeigen sich auch bei einigen Pegeln abnehmende Trends. Nur sehr wenige Trends sind dabei allerdings signifikant. Dieses Ergebnis deckt sich auch mit den gemeinsam im Projekt KLIWA ermittelten Trends (KLIWA, 2022a).

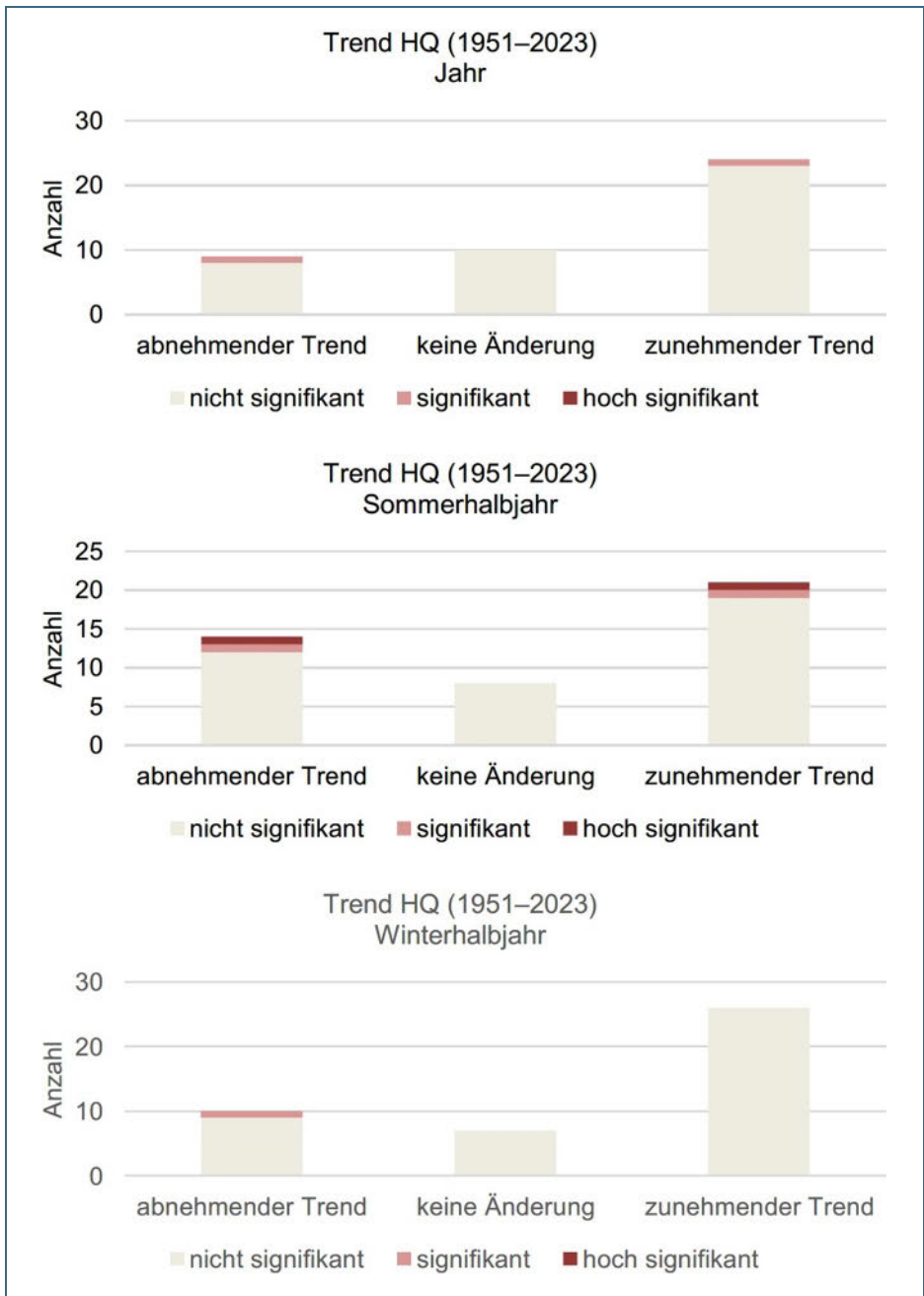


Abb. 35: Anzahl der Pegel mit zu- und abnehmenden Trends für die jährlichen und halbjährlichen HQs von 1951 bis 2023 für 43 Untersuchungspegel.

4.6 Entwicklung der Abflusskennwerte aus den Abflussprojektionen für die Zukunft

Im Folgenden werden anhand der Abflussprojektionen mögliche künftige Entwicklungen der Abflusskennwerte aus Kapitel 2.1.3 vorgestellt. Neben dem MQ werden die beiden Kennwerte MHQ und MNQ für die beiden Halbjahre Sommer und Winter dargestellt. Für den Niedrigwasserabfluss und den Hochwasserabfluss werden zusätzlich noch die Klimaänderungssignale verschiedener Jährlichkeiten gezeigt. Außerdem wird je ein Fallbeispiel für eine mögliche Verwendung der Abflussprojektionen vorgestellt.

Der Aufbau der jeweiligen Kapitel der behandelten Kennwerte folgt hierbei diesem Muster: Zunächst werden die Klimasignale anhand der Zukunftszeiträume nahe, mittlere und ferne Zukunft über die in Kapitel 2.6.2 vorgestellten grafischen Auswertungen einzelner Pegel vorgestellt. Hierzu werden die

drei Beispielpegel aus Kapitel 4.1 verwendet. Mit diesen soll zunächst ein räumlich differenzierter Überblick gegeben werden, welche Unterschiede beziehungsweise Gemeinsamkeiten die Klimasignale in Nord- und Südbayern haben. Der Pegel Hofkirchen an der Donau (oberhalb der Innmündung in Passau) repräsentiert dabei mit seinem nivo-pluvialen Regime den Übergangsbereich zwischen dem pluvialen Regime Kleinheubachs am Main und dem nivalen Regime von Passau-Ingling am Inn.

Anschließend werden die Ergebnisse in jedem Kennwertkapitel für alle Auswahlpegel in einem Kartenteil dargestellt. Basis für diese Aufbereitung bilden die minimalen und maximalen Klimasignale aller 60 Pegel für die drei Zukunftszeiträume. Diese sind zudem mit den konkreten prozentualen Veränderungen an den einzelnen Pegeln zusammen mit dem Median der Klimasignale im Anhang D dargestellt. Die Aufbereitung dieser Daten für eine leichtere Interpretation wird mithilfe der im Folgenden vorgestellten Methodik durchgeführt. Sie stellt eine Erweiterung der im IKSR-Bericht „Klimawandelbedingte Abflussszenarien für das Rheineinzugsgebiet“ (IKSR, 2024) vorgestellten Methodik einer integrierten Übersicht dar.

Der Bereich zwischen Maxima und Minima der Klimaänderungssignale gibt die Bandbreite an möglichen Änderungen an. Diese wird nachfolgend in einer vereinfachten Betrachtung als Interpretationshilfe für die Beschreibung der dargestellten Veränderungen an einem Pegel im Bezug zur Nulllinie (keine Veränderung) verwendet. Die Anzahl der Klimaprojektionen, bzw. deren Verteilung innerhalb der Bandbreite wird dabei nicht weiter berücksichtigt. Wie bereits beschrieben, gibt der Median allerdings einen kleinen Hinweis darauf, 50 % der Klimaprojektionen liegen darunter, 50 % darüber. Je größer die Bandbreite ist, desto größer ist die Unsicherheit bezüglich der Quantität der zukünftigen Entwicklung des Abflusses. Verteilt sich die Bandbreite an einem Pegel gleichermaßen über als auch unter der Nulllinie, kann der Kennwert für diesen Zeitraum als indifferent interpretiert werden. Liegt die Bandbreite mehrheitlich (hier mindestens zu zwei Dritteln) ober- oder unterhalb der Nulllinie wird das Klimasignal als Zunahme beziehungsweise Abnahme angesprochen. Liegt sie dagegen zu mehr als 90 % über der Nulllinie wird das Klimasignal als deutliche Zunahme des Kennwertes interpretiert, liegt sie darunter als deutliche Abnahme. Für die allgemeine Interpretation der Änderungssignale aller 60 Pegel wird zudem in einem weiteren Schritt die Bandbreite des Maximums und des Minimums getrennt für Südbayern und Nordbayern gemittelt. Hierbei bildet die Donau die Grenze. Alle Donauegel werden hierbei noch Südbayern zugerechnet. Bei dieser gewählten Art der Darstellung ist zu beachten, dass mit der Interpretation der Hauptveränderung der Bandbreite durchaus auch einzelne Projektionen mit gegenteiligen Veränderungen auftreten können.

4.6.1 Abflussprojektionen für den mittleren Abfluss

Kernaussagen MQ Änderungssignal bis 2100:

- Der MQ im Sommerhalbjahr wird in Südbayern voraussichtlich abnehmen. In Nordbayern zeigen die Abflussprojektionen keinen klaren Trend.
- Der MQ wird im Winterhalbjahr in Südbayern voraussichtlich zunehmen. In Nordbayern zeigen die Abflussprojektionen keinen klaren Trend.

Abb. 36 und Abb. 38 zeigen den Verlauf der Klimaänderungssignale in Prozent für den MQ der drei Beispielpegel von Nord nach Süd Kleinheubach (Main), Hofkirchen (Donau) und Passau-Ingling (Inn) für das Sommer- und Winterhalbjahr. Als Basisjahr für die Einteilung der Halbjahre wird das hydrologische Jahr verwendet. Dargestellt sind die Maxima, Minima und der Median der Klimaänderungssignale für sämtliche zukünftigen 30-jährigen Zeiträume bezogen auf den Referenzzeitraum (1971–2000). Negative Signale werden als Abnahmen und positive Signale als Zunahmen des Kennwertes

interpretiert. Die genaue Methodik zur Berechnung dieser Änderungssignale ist in Kapitel 2.6.3.2 beschrieben. Die Auswertungen der Änderungssignale der Jahreswerte finden sich in Anhang C.

Bei den Klimaänderungssignalen der drei Pegel für das RCP2.6–Szenario fallen zunächst die hohen Abnahmen zwischen der mittleren und fernen Zukunft auf. Diese sind auf eine einzelne Klimaprojektion zurückzuführen. Würde man diese Projektion von der Auswertung ausschließen würde sich die Bandbreite meist innerhalb der Bandbreiten des RCP8.5–Szenarios bewegen. Dies ist im Anhang B dargestellt.

Hydrologisches Sommerhalbjahr

Die Bandbreite der Klimaänderungssignale der zwei nördlichen Pegel zeigen für den MQ des Sommerhalbjahres für die nahe Zukunft gleichermaßen Zu- und Abnahmen (Abb. 36), also indifferente Änderungen. Diese liegen zwischen +32 % und -22 % und unterscheiden sich für das RCP2.6 und RCP8.5 nur wenig. Beim Pegel Passau-Ingling legt der visuelle Eindruck nahe, dass dieser eine Abnahme zeigt (+9 % und -15 %). Die Bandbreite liegt aber gemäß Interpretationsvorgaben nicht mehrheitlich (> zwei Drittel) im negativen Bereich. Im Detail also zeigen sich auch bei diesem Pegel indifferente Änderungen, die Bandbreite im abnehmenden Bereich ist dabei allerdings deutlich größer.

In der mittleren Zukunft werden die Bandbreiten für die beiden nördlichen Pegel etwas schmaler als in der nahen Zukunft. Diese liegen nun zwischen +16 % und -18 % für beide Szenarien, zeigen also weiter ein indifferentes Änderungssignal. Eine Ausnahme bildet das Klimasignal des RCP8.5–Szenarios für den Pegel Kleinheubach, welcher nun eine Zunahme des MQ zeigt, da die Bandbreite mehrheitlich über der Nulllinie liegt. Das Klimasignal für RCP2.6 würde sich unter Auslassung der MIROC-Abflussprojektion ähnlich verhalten. Der südliche Pegel Passau-Ingling hingegen weist nun eine Abnahme von -20 % für RCP8.5 und -13 % für RCP2.6 auf. Die projizierten Zunahmen liegen lediglich bei +2 % bzw. +5 %.

In der fernen Zukunft differenzieren sich beide Szenarien etwas deutlicher. Dies zeigt sich vor allem beim südlichen Pegel Passau-Ingling, welcher bei RCP8.5 eine deutliche Abnahme von bis zu -30 % zeigt. Für das RCP2.6 zeigt die Bandbreite zwar eine Abnahme, die aber mit +6 % und -16 % nicht deutlich ausfällt. Auch der Übergangspiegel Hofkirchen zeigt nun für RCP8.5 eine Abnahme von bis zu -27 %. Das RCP2.6 weist hier ein indifferentes Änderungssignal auf. Die Bandbreite für den Pegel Kleinheubach erscheint zwar für RCP8.5 abnehmend, liegt aber dennoch nur zu 60 % im negativen Bereich und zeigt somit ein indifferentes Signal mit Zu- und Abnahmen. Beim RCP2.6 ist dies auch visuell deutlich zu erkennen.

Bei der Betrachtung des Medians zeigt sich, dass der MQ für alle drei Pegel bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts für das Sommerhalbjahr nur kleinere Änderungen von +4 % bis -8 % aufweist. Erst für die ferne Zukunft erkennt man eine deutliche Abnahme bei RCP8.5 für die beiden südlichen Pegel Hofkirchen und Passau-Ingling (-10 % und -12 %), während er für RCP2.6 im Vergleich zu RCP8.5 relativ konstant (zwischen 0 und +1 %) bleibt. Das der Median des RCP2.6–Szenarios beim Pegel Kleinheubach unter dem des RCP8.5 liegt kann man auch auf die oben genannte MIROC-Klimaprojektion zurückführen. Bei Auslassung dieser Projektion ergäbe sich ein ähnliches Bild wie bei den anderen Pegeln und der RCP2.6 Median würde über dem des RCP8.5 liegen.

Wendet man die Interpretation der Bandbreiten auf alle Auswahlpegel an, ergibt sich das in Abb. 37 dargestellte Bild. Für Südbayern erkennt man bei fast allen Pegeln ein ähnliches Bild wie schon bei den Einzelauswertungen. In der nahen Zukunft zeigt sich ein indifferentes Bild mit Zu- und Abnahmen an einzelnen Pegeln. Für die mittlere Zukunft nehmen die Abnahmen zu und verstärken sich zudem besonders bei RCP8.5. In der fernen Zukunft setzt sich diese Tendenz differenzierter fort. Eine Verstärkung der Abnahmen setzt sich für das RCP2.6 nur minimal fort, während bei RCP8.5 die meisten Pegel klare Abnahmen mit im Mittel -30 % zeigen.

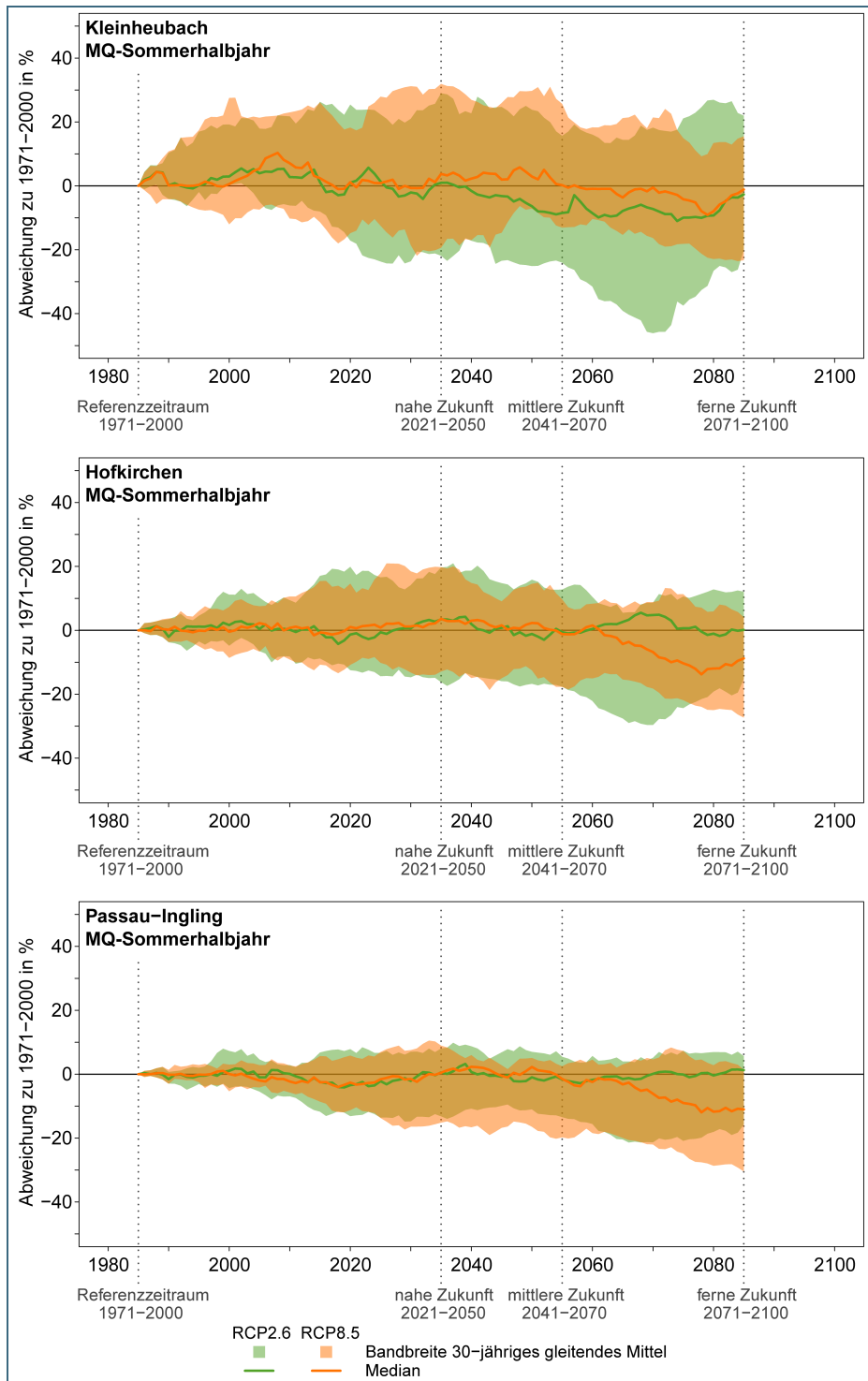


Abb. 36: Änderungssignal des saisonalen MQ (Sommerhalbjahr) für die Pegel Passau-Ingling (unten), Hofkirchen (Mitte) und Kleinheubach (oben). Dargestellt ist das 30-jährige gleitende Mittel des Abflusssignals bezogen auf den Referenzzeitraum 1971–2000 für die Szenarien RCP2.6 und RCP8.5.

Ein undeutlicheres Bild ist in Nordbayern zu beobachten. Neben einigen Pegeln im Nordosten Bayerns, welche in der mittleren Zukunft für RCP2.6 und in der fernen Zukunft für RCP8.5 Abnahmen zeigen, weisen einige Pegel nordwestlich der Donau vor allem beim RCP8.5 in der nahen und mittleren Zukunft auch Zunahmen auf. Insgesamt ergeben sich für alle drei Zeiträume im Mittel für Nordbayern keine eindeutigen, also indifferente Veränderungen.

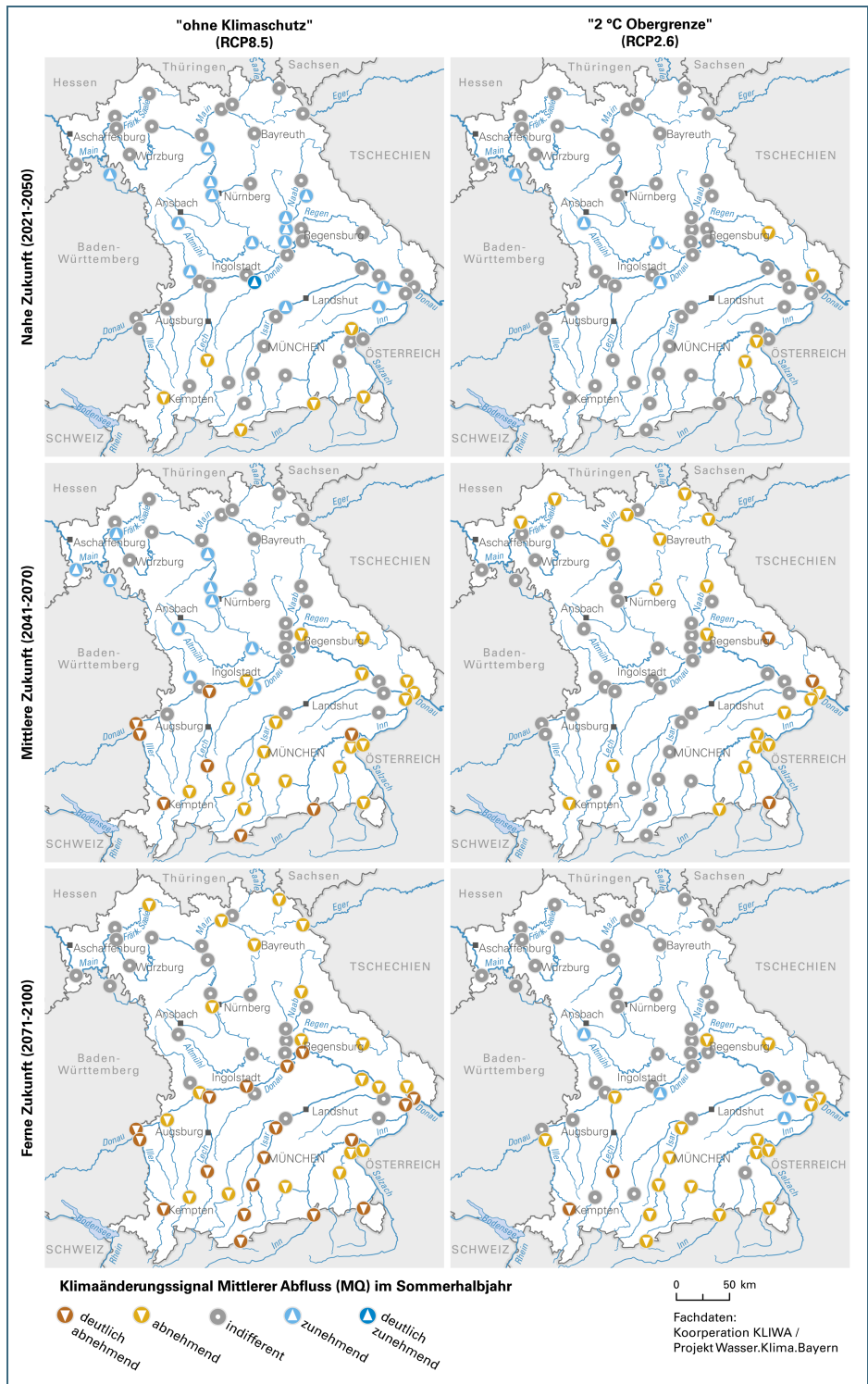


Abb. 37: Zu- und Abnahmen der Bandbreite der Klimaänderungssignale für den MQ des Sommerhalbjahres für alle 60 Auswertepegel.

In Tab. 5 sind die aus Minimum und Maximum ermittelten mittleren Bandbreiten der Änderungssignale für Süd- und Nordbayern für die verschiedenen Szenarien und Betrachtungszeiträume aufgeführt. Die prozentualen Änderungssignale für die einzelnen Pegel für Maximum, Median und Minimum sind Anhang D zu entnehmen.

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass die Abflussprojektionen für die Südbayerischen Pegel überwiegend Abnahmen zeigen. Diese sind beim RCP8.5 stärker ausgeprägt, jedoch zeigen sie sich auch beim RCP2.6 Szenario in abgeschwächter Form. Für Nordbayern lässt sich für den MQ des Sommerhalbjahres kein klarer Trend für die Zukunft erkennen.

Tab. 5: Mittlere Bandbreite der Änderungssignale für Süd- und Nordbayern: MQ hydrologisches Sommerhalbjahr

Mittlere Bandbreite in %	nahe Zukunft		mittlere Zukunft		ferne Zukunft	
	Süd-BY	Nord-BY	Süd-BY	Nord-BY	Süd-BY	Nord-BY
RCP2.6	-15 bis +15	-23 bis +28	-16 bis +10	-24 bis +15	-16 bis +10	-24 bis +22
RCP8.5	-14 bis +15	-17 bis +32	-19 bis +7	-17 bis +27	-30 bis +5	-26 bis +17

Hydrologisches Winterhalbjahr

Die Bandbreiten der Klimaänderungssignale für den MQ des Winterhalbjahres (Abb. 38) verhalten sich für die beiden südlichen Pegel Hofkirchen und Passau-Ingling überwiegend gegenteilig zum MQ des Sommerhalbjahres. Jedoch zeigt letzterer schon in der nahen Zukunft klare Zunahmen zwischen 0 % und +23 % für beide Szenarien. Der Pegel Hofkirchen weist für diesen Zeitraum ebenfalls mehrheitlich Zunahmen (-12 % und +24 %) auf. Der Pegel Kleinheubach weist ähnlich indifferente Klimasignale wie schon im Sommerhalbjahr auf. In der nahen Zukunft liegen die Zu- und Abnahmen zwischen +/-22 % für beide Szenarien.

Die Bandbreite für den Pegel Kleinheubach ändert sich auch in der mittleren Zukunft wenig. Diese verringert sich lediglich leicht und zeigt ein indifferentes Signal bei RCP8.5 zwischen +/-14 %. Das RCP2.6 weist hier zwar mehrheitlich Abnahmen auf, jedoch ist dies hauptsächlich auf die MIROC-Klimaprojektion zurückzuführen. Der Pegel Hofkirchen weist für diesen Zukunftszeitraum bei RCP8.5 eine ähnliche Bandbreite mit einer Zunahme wie schon in der nahen Zukunft auf, (-9 % und +24 %). Die Bandbreite von RCP2.6 zeigt hier lediglich ein indifferentes Signal zwischen -13 % und +11 %. Beim Pegel Passau-Ingling verstärkt sich beim RCP8.5 die schon in der nahen Zukunft angelegte deutliche Zunahme auf +1 % und +30 %, für RCP2.6 reduziert sie sich hingegen auf -1 % und +16 %.

Auch in der fernen Zukunft weist die Bandbreite des Klimasignals für den Pegel Kleinheubach nach wie vor ein indifferentes Signal mit Zu- und Abnahmen auf. Diese liegen bei +/-24 % wobei die Bandbreite für RCP8.5 schmaler ist und einen geringeren negativen Anteil aufweist. Eine weitergehende Interpretation ist damit schwierig. Für den Pegel Hofkirchen weist nun auch das RCP2.6 eine Zunahme auf, welche aber nur knapp mehrheitlich im positiven Bereich liegt. Dieses ist beim RCP8.5 Szenario deutlicher und zeigt jetzt auch eine klare Zunahme. Die Bandbreite liegt hierbei zwischen -3 % und +27 %. Für den Pegel Passau-Ingling bewegt sich die Bandbreite des RCP8.5 wieder im klar zunehmenden Bereich mit einer minimalen Zunahme von +14 % und maximal +44 %. Auch das RCP2.6 zeigt eine klare Zunahme, jedoch erreichen die maximalen Zunahmen nur +27 %.

Der Median der Änderungssignale für alle Zukunftszeiträume schwankt für den Pegel Kleinheubach für beide Szenarien zwischen -4 % und +6 %. Es ist somit kein Trend erkennbar. Für die beiden südlichen Pegel erkennt man jedoch einen deutlichen zunehmenden Trend bei RCP8.5. Für die Pegel Hofkirchen und Passau-Ingling steigt dieser von +6 % bzw. +10 % in der nahen Zukunft auf +13 % bzw. +29 % in der fernen Zukunft an. Für das RCP2.6-Szenario der beiden Pegel findet eine Zunahme nur im Bereich der nahen Zukunft statt und bewegt sich danach relativ konstant zwischen -4 % und +3 %. Aus dem Verlauf des Medians kann man also schließen, dass die Mehrheit der Projektionen einen zunehmenden Trend für diesen Kennwert zeigen.

Wendet man die Interpretation der Bandbreiten auf alle Auswahlpegel an, ergibt sich das in Abb. 39 dargestellte Bild. Für Südbayern erkennt man bei fast allen Pegel ein ähnliches Bild wie schon bei den Einzelauswertungen. Schon in der nahen Zukunft sind fast nur Zunahmen dargestellt, da die Bandbreite mehrheitlich im positiven Bereich liegt. Für die mittlere Zukunft liegen ebenfalls Zunahmen vor. In der fernen Zukunft verstärken sich die Zunahmen für das RCP2.6, bei RCP8.5 weisen nun die meisten Pegel sogar deutliche Zunahmen auf.

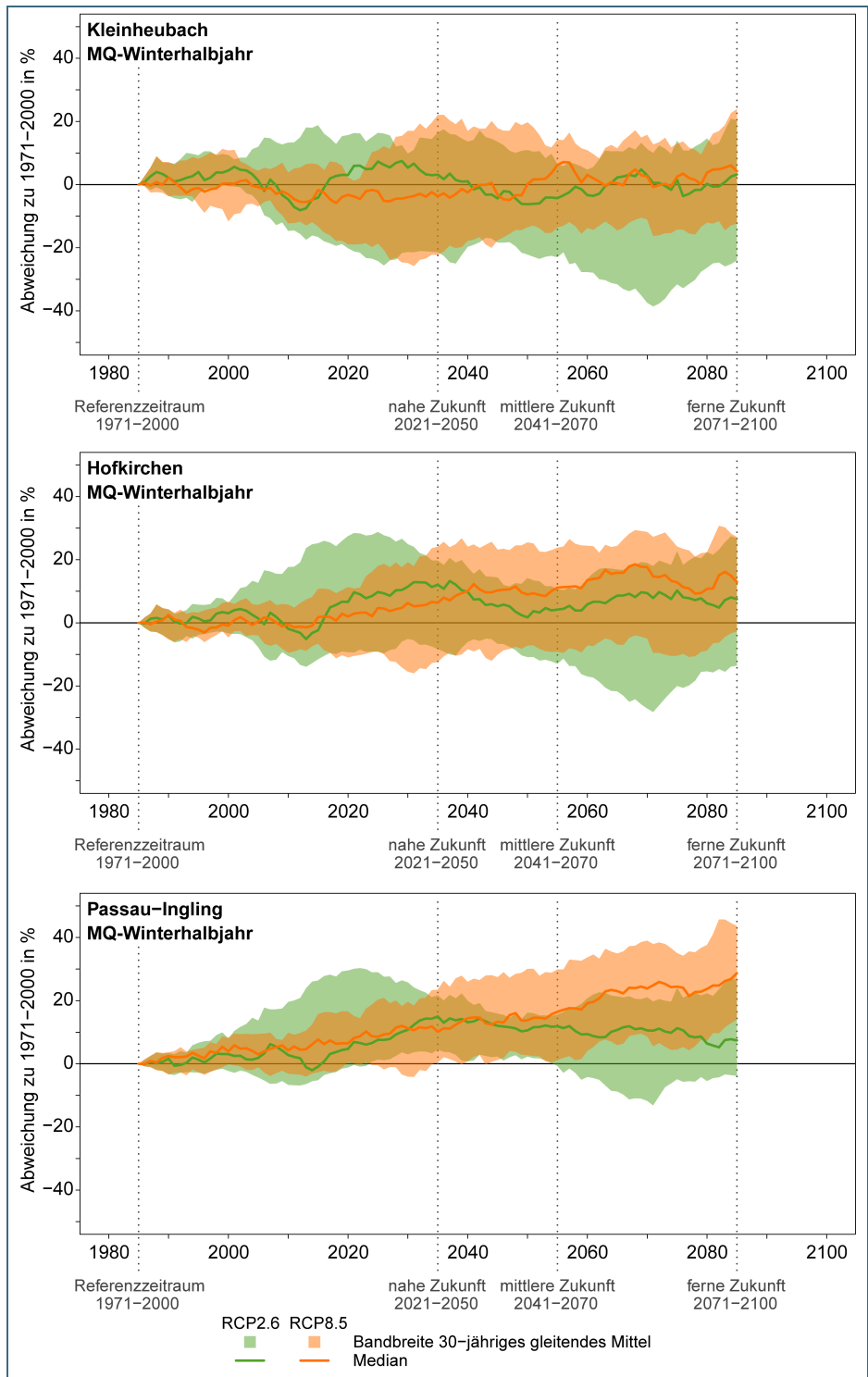


Abb. 38: Änderungssignal des saisonalen MQ (Winterhalbjahr) für die Pegel Passau-Ingling (unten), Hofkirchen (Mitte) und Kleinheubach (oben). Dargestellt ist das 30-jährige gleitende Mittel des Abflusssignals bezogen auf den Referenzzeitraum 1971–2000 für die Abflussprojektionen für die Szenarien RCP2.6 und RCP8.5.

Wie auch schon beim Sommerhalbjahr ist in Nordbayern ein uneinheitlicheres Bild zu beobachten. Für das RCP2.6 lassen sich in der mittleren Zukunft sogar abnehmende Bandbreiten beobachten, in der fernen Zukunft zeigt sich wieder ein indifferentes Bild. Das RCP8.5 zeigt zwar, bis auf einen Pegel, keine Abnahmen. Jedoch weisen auch nur sehr wenige Pegel in der mittleren Zukunft und einige Pegel in der fernen Zukunft Zunahmen auf.

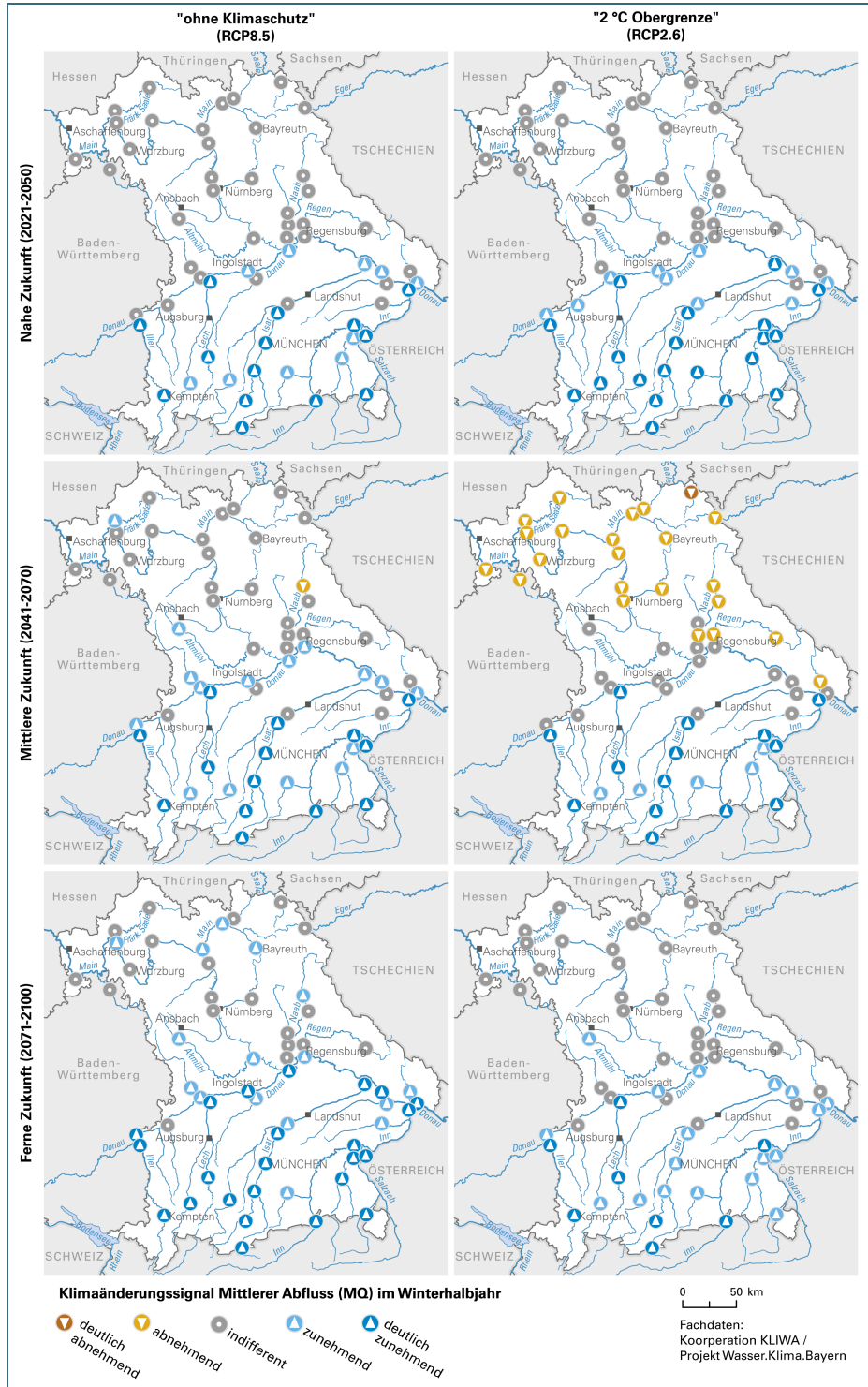


Abb. 39: Zu- und Abnahmen der Bandbreite der Klimaänderungssignale für den MQ des Winterhalbjahres für alle 60 Auswertepiegel.

In Tab. 6 sind die aus Minimum und Maximum ermittelten mittleren Bandbreite der Änderungssignale für Süd- und Nordbayern für die verschiedenen Szenarien und Betrachtungszeiträume aufgeführt. Die prozentualen Änderungssignale für die einzelnen Pegel für Maximum, Median und Minimum sind Anhang D zu entnehmen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Abflussprojektionen für die Südbayerischen Pegel im Winterhalbjahr klare Zunahmen zeigen. Diese sind beim RCP8.5 stärker ausgeprägt, jedoch zeigen sie sich auch für RCP2.6 in abgeschwächter Deutlichkeit. Für Nordbayern lässt sich für den MQ des Winterhalbjahres kein klarer Trend erkennen.

Tab. 6: Mittlere Bandbreite der Änderungssignale für Süd- und Nordbayern: MQ hydrologisches Winterhalbjahr

Mittlere Bandbreite in %	nahe Zukunft		mittlere Zukunft		ferne Zukunft	
	Süd-BY	Nord-BY	Süd-BY	Nord-BY	Süd-BY	Nord-BY
RCP2.6	-1 bis +24	-19 bis +17	-6 bis +14	-21 bis +8	-8 bis +28	-23 bis +22
RCP8.5	-6 bis +24	-20 bis +23	-4 bis +28	-16 bis +17	+4 bis +36	-15 bis +25

4.6.2 Abflussprojektionen für den Niedrigwasserabfluss

4.6.2.1 Zukünftige Entwicklung der Niedrigwasserkennwerte

Kernaussagen MNQ Änderungssignal bis 2100:

- Im Sommerhalbjahr nimmt der MNQ für Gesamtbayern voraussichtlich ab.
- Im Winterhalbjahr nimmt der MNQ in Südbayern voraussichtlich eher zu und in Nordbayern eher ab. Im Übergangsbereich ist kein klarer Trend erkennbar.

Abb. 40 und Abb. 42 zeigen den Verlauf der Klimaänderungssignale in Prozent für den MNQ der drei Beispielpiegel von Nord nach Süd Kleinheubach (Main), Hofkirchen (Donau) und Passau-Ingling (Inn) für das Sommer- und Winterhalbjahr. Als Basisjahr für die Einteilung der Halbjahre wird im Gegensatz zum mittleren Abfluss das Wasserhaushaltsjahr vom 01. April bis 31. März verwendet. Dargestellt sind die Maxima, Minima und der Median der Klimaänderungssignale für alle zukünftigen 30-jährigen Zeiträume bezogen auf den Referenzzeitraum (1971–2000), nicht nur der vorwiegend verwendeten Zukunftszeiträume nahe, mittlere und ferne Zukunft. Negative Signale werden als Abnahmen und positive Signale als Zunahmen des Kennwertes interpretiert. Die Methodik zur Berechnung dieser Änderungssignale ist in Kapitel 2.6.3.2 beschrieben. Die Auswertungen der Änderungssignale der Jahreswerte finden sich in Anhang C.

Hydrologisches Sommerhalbjahr

Die Bandbreite der Klimaänderungssignale der zwei nördlichen Pegel zeigen für den MNQ des Sommerhalbjahres für die nahe Zukunft gemäß der Interpretationsvorgaben ein indifferentes Bild mit Zu- und Abnahmen für beide Szenarien (Abb. 40). Diese liegen am Pegel Kleinheubach zwischen -24 % und +20 % und am Pegel Hofkirchen zwischen -18 % und +17 %. Auch der Pegel Passau-Ingling weist indifferente Änderungen für RCP2.6 zwischen -15 % und +8 % auf. Bei RCP8.5 jedoch ist die Bandbreite knapp abnehmend mit einer Bandbreite von -18 % und +8 %.

Ab der mittleren Zukunft weisen die Bandbreiten der Klimaänderungssignale aller drei Pegel für den MNQ des Sommerhalbjahres hauptsächlich Abnahmen auf. Diese liegen für beide Szenarien zwischen -25 % und +10 % für den Pegel Kleinheubach, zwischen -22 % und +5 % für den Pegel Hofkirchen und zwischen -22 % und +5 % für den Pegel Passau-Ingling. Auffallend ist, dass die Bandbreiten bei RCP2.6 für den Pegel Kleinheubach größer und für den Pegel Passau-Ingling kleiner als bei RCP8.5 ist. Dies liegt vor allem an der MIROC-Projektion, welche zu vergleichsweise großen, minimalen Klimasignalen führt. Der im Anhang B dargestellte Vergleich zeigt, dass sich ohne diese Projektion die Bandbreiten für RCP2.6 und RCP8.5 nur wenig unterscheiden würden. Dies ist auch für den Pegel Hofkirchen der Fall.

In der fernen Zukunft differenzieren sich beide Szenarien bei den beiden südlichen Pegeln ein wenig. Dies zeigt sich für den Pegel Passau-Ingling und Hofkirchen mit einer deutlichen Abnahme für das

RCP8.5. Diese liegen zwischen -28 % und +1 %. Für das RCP2.6 ist abgeschwächt auch eine Abnahme zu erkennen, welche sich zwischen -24 % und +11 % bewegt. Auch der Pegel Kleinheubach zeigt eine Abnahme (85 % der Bandbreite liegt im negativen Bereich) in der fernen Zukunft zwischen -22 % und +4 % für das RCP8.5. Dass das RCP2.6 höhere Minimalwerte zeigt ist, wie schon in der mittleren Zukunft, auf eine einzelne Projektion zurückzuführen.

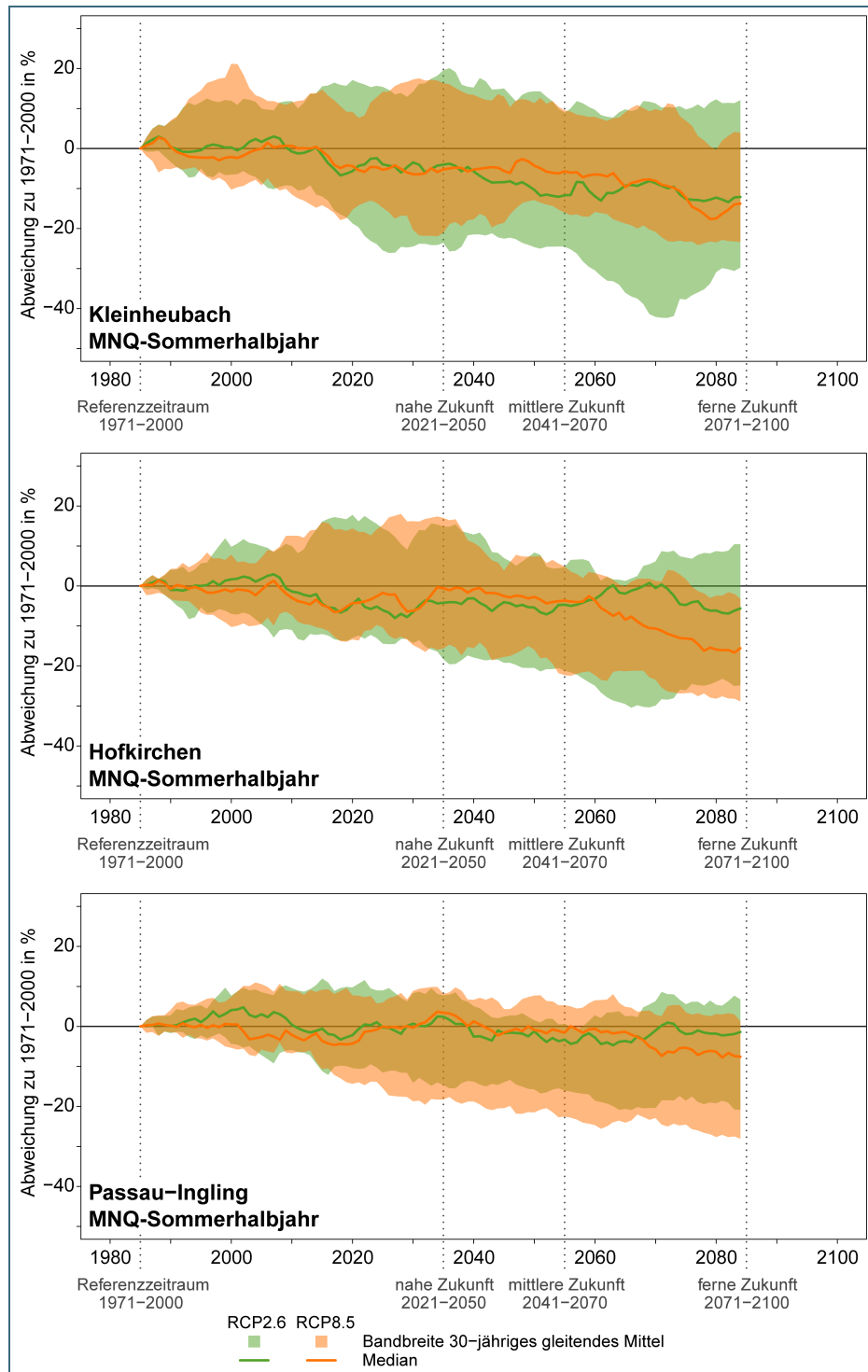


Abb. 40: Änderungssignal des saisonalen MNQ (Sommerhalbjahr) für die Pegel Passau-Ingling (unten), Hofkirchen (Mitte) und Kleinheubach (oben). Dargestellt ist das 30-jährige gleitende Mittel des Abflusssignals bezogen auf den Referenzzeitraum 1971-2000 für die Abflussprojektionen.

Bei Betrachtung des Medians des Klimaänderungssignals für das Sommerhalbjahr ist gut zu erkennen, dass dieser beim Pegel Kleinheubach für beide Szenarien bis zu Abnahmen für die ferne Zukunft von -12 % für RCP2.6 und -14 % für RCP8.5 stetig abnimmt. Bei den beiden anderen Pegeln zeigt der

MNQ zumindest bis in die mittlere Zukunft kaum eine Änderung (-5 % für +3 %). Erst für die ferne Zukunft erkennt man auch hier deutliche (-16 % für Hofkirchen) bzw. leichte (-8 % für Passau-Ingling) Abnahmen für RCP8.5 im Gegensatz zu RCP2.6 (-4 % bzw. 0 %).

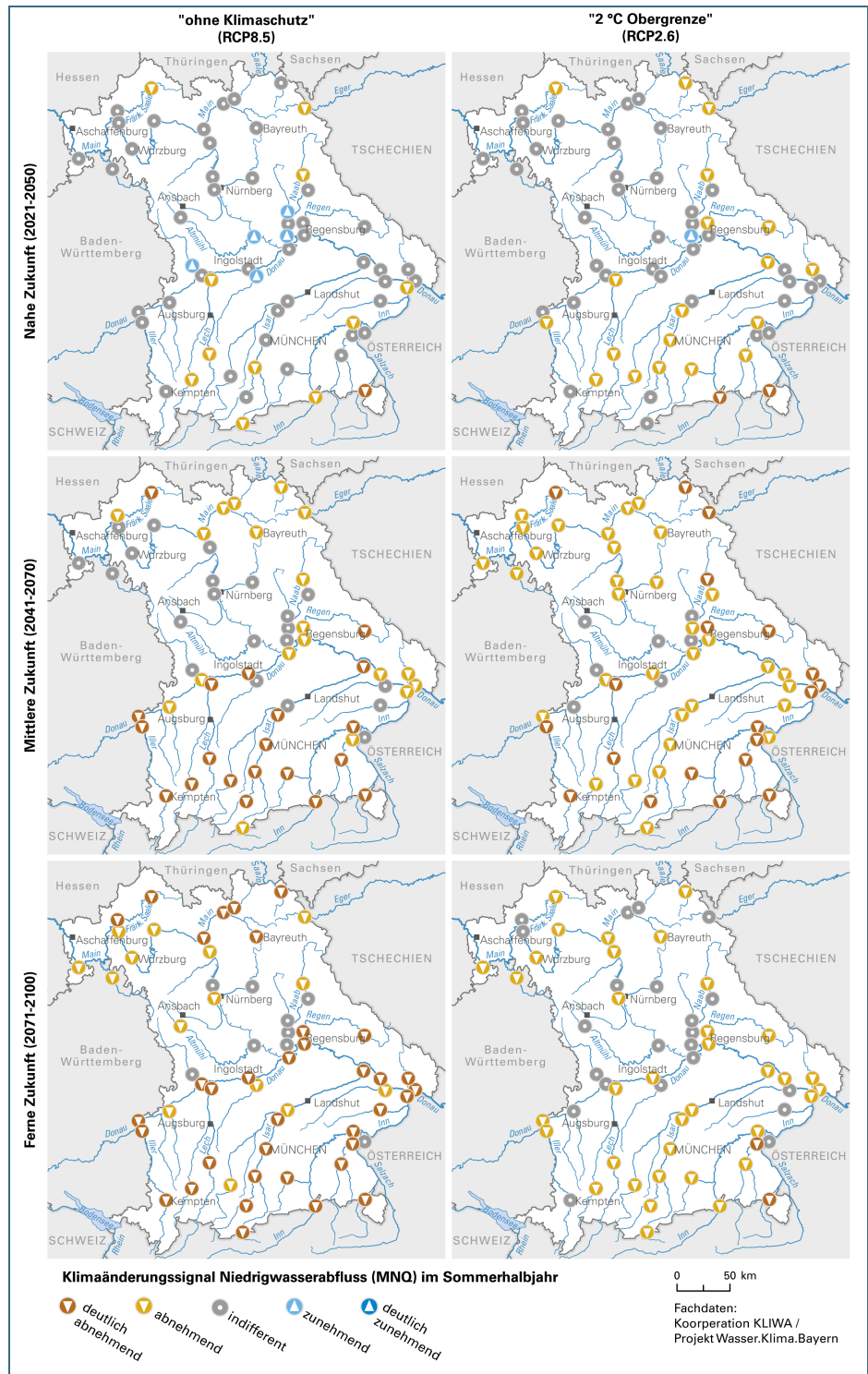


Abb. 41: Zu- und Abnahmen der Bandbreite der Klimaänderungssignale für den MNQ des Sommerhalbjahres für alle 60 Auswertepegel.

Wendet man die Interpretation der Bandbreiten auf alle Auswertepegel an, ergibt sich das in Abb. 41 dargestellte Bild. Für Südbayern erkennt man bei fast allen Pegeln ein ähnliches Bild analog der Einzelauswertungen. In der nahen Zukunft sind dies vorwiegend indifferente Signale mit einzelnen Abnahmen. Für die mittlere Zukunft zeigen sich schon überwiegend deutliche Abnahmen, die bei RCP8.5 häufiger als bei RCP2.6 auftreten. In der fernen Zukunft verstärkt sich dies weiter für das

RCP8.5 mit deutlichen Abnahmen an den meisten Pegeln, während bei RCP2.6 zwar Abnahmen auftreten, allerdings weniger deutliche Abnahmen als in der mittleren Zukunft.

Ein ähnliches Bild ist in Nordbayern zu beobachten, jedoch in abgeschwächter Form. Zeigen in der nahen Zukunft die meisten Pegel ein indifferentes Änderungssignal, weist vor allem RCP2.6 in der mittleren Zukunft überwiegend abnehmende Pegel auf. Dies schwächt sich jedoch in der fernen Zukunft wieder ab, was auf die einzelne MIROC-Abflussprojektion zurückgeführt werden kann. Die Zahl der Pegel mit abnehmender Bandbreite für RCP8.5 hingegen nimmt bis in die ferne Zukunft weiter zu. Vor allem im Norden zeigen viele Pegel jetzt deutliche Abnahmen.

In Tab. 7 sind die aus Minimum und Maximum ermittelten mittleren Bandbreiten der Änderungssignale für Süd- und Nordbayern für die verschiedenen Szenarien und Betrachtungszeiträume aufgeführt. Die prozentualen Änderungssignale für die einzelnen Pegel für Maximum, Median und Minimum sind Anhang D zu entnehmen. Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass die Abflussprojektionen für fast alle Pegel in Bayern klare Abnahmen zeigen. Diese sind beim RCP8.5 stärker ausgeprägt, jedoch zeigen sie sich auch bei RCP2.6 in abgeschwächter Deutlichkeit. Für Nordbayern ist dies weniger deutlich als in Südbayern. Dennoch ist auch hier ein überwiegend abnehmender Trend erkennbar.

Tab. 7: Mittlere Bandbreite der Änderungssignale für Süd- und Nordbayern: MNQ Sommerhalbjahr.

Mittlere Bandbreite in %	nahe Zukunft		mittlere Zukunft		ferne Zukunft	
	Süd-BY	Nord-BY	Süd-BY	Nord-BY	Süd-BY	Nord-BY
RCP2.6	-17 bis +10	-22 bis +18	-19 bis +3	-23 bis +8	-21 bis +8	-26 bis +14
RCP8.5	-16 bis +11	-18 bis +17	-24 bis +2	-18 bis +10	-30 bis -2	-23 bis +6

Hydrologisches Winterhalbjahr

Die Bandbreiten der Klimaänderungssignale für den MNQ des Winterhalbjahres (Abb. 42) für die beiden nördlichen Pegel Kleinheubach und Hofkirchen zeigen gemäß Interpretationshilfe ein indifferentes Signal mit Zu- und Abnahmen für die nahe Zukunft. Diese sind für beide Szenarien relativ ähnlich und bewegen sich für Kleinheubach zwischen -27 % und +15 % und für Hofkirchen zwischen -18 % und +19%. Die Bandbreiten des südlichen Pegels Passau-Ingling beider Szenarien zeigen dahingegen deutliche Zunahmen. Hier ist die Bandbreite RCP2.6 schmaler als die von RCP8.5 und weist deutliche Zunahmen zwischen +1 % und +11 % auf. Die Bandbreite bei RCP8.5 liegt zwischen -1 % und +15 %.

Für die mittlere Zukunft zeigen die Klimasignale der beiden nördlichen Pegel meist abnehmende Bandbreiten. Vor allem Kleinheubach weist hier für das RCP2.6 ein deutlich abnehmendes und für das RCP8.5 ein abnehmendes Klimasignal auf. Dieses liegt zwischen -30 % und +9 %. Lediglich die Bandbreite des RCP8.5 für Hofkirchen weist ein indifferentes Signal mit Zu- als auch Abnahmen von -21 % und +13 % auf. Beim Pegel Passau-Ingling verstärkt sich das Klimasignal für RCP8.5 gegenüber der nahen Zukunft weiter und zeigt deutliche Zunahmen zwischen -4 % und +16 %. Die Bandbreite von RCP2.6 Szenarios bleibt relativ konstant und zeigt ein indifferentes Signal zwischen -5 % und +7 %.

In der fernen Zukunft weisen die Bandbreiten der Klimasignale aller drei Pegel in etwa dieselben Klimasignale wie in der mittleren Zukunft auf. Bei den beiden nördlichen Pegel führt die MIROC-Projektion bei RCP2.6 zu Abnahmen von -38 % für den Pegel Kleinheubach und -24 % für Hofkirchen. Bei RCP8.5 schwächen sich die Klimasignale wieder ab und zeigen nun erneut ein indifferentes Signal für diese beiden Pegel. Die Bandbreiten liegen zwischen -27 % und +15 % für den Pegel Kleinheubach und -16 % und +20 % für den Pegel Hofkirchen. Am Pegel Passau-Ingling treten bei RCP2.6 Zunahmen zwischen -5 % und +12 % und deutliche Zunahmen beim RCP8.5 zwischen +5 % und +23 % auf.

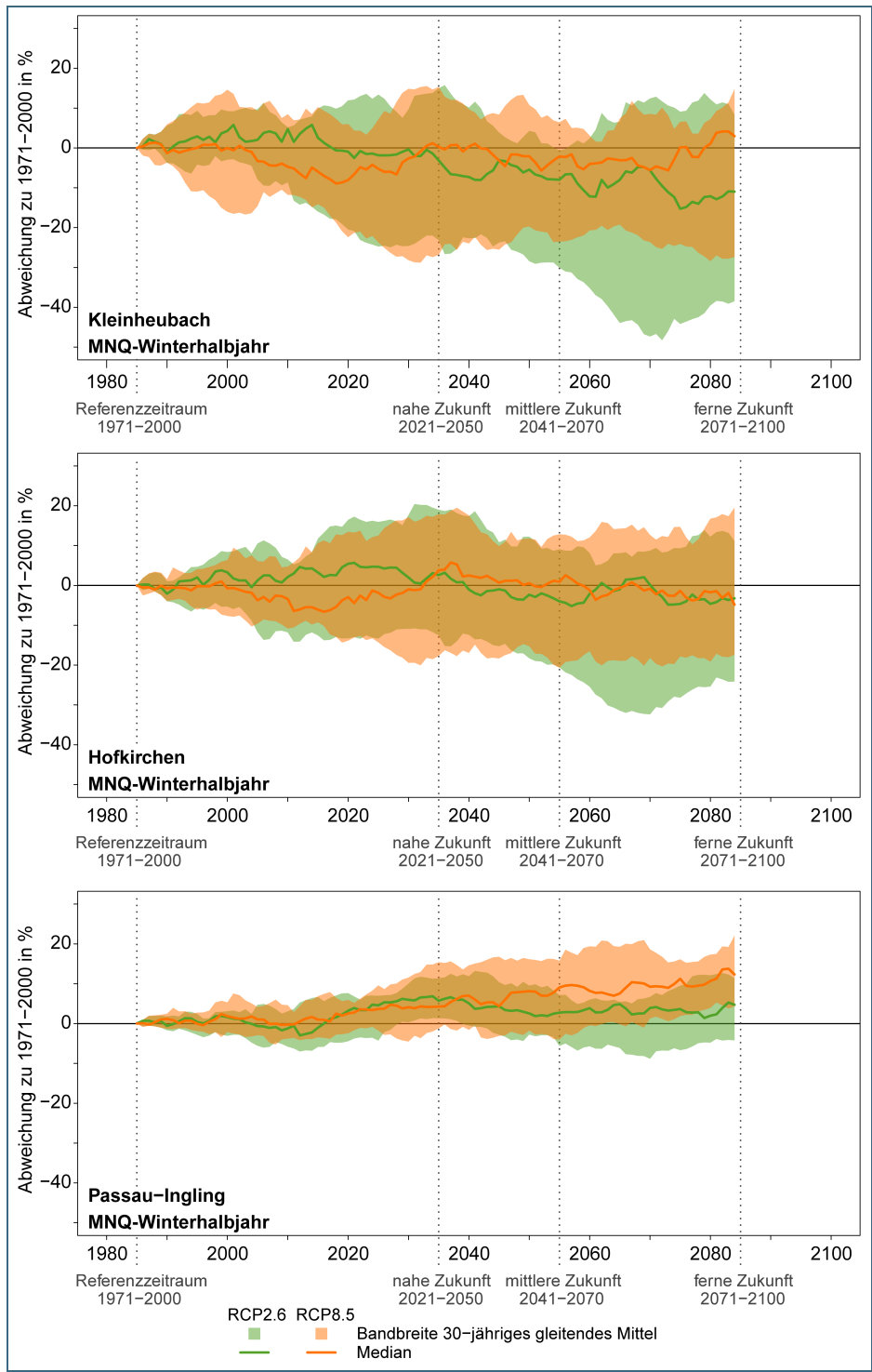


Abb. 42: Änderungssignal des saisonalen MNQ (Winterhalbjahr) für die Pegel Passau-Ingling (unten), Hofkirchen (Mitte) und Kleinheubach (oben). Dargestellt ist das 30-jährige gleitende Mittel des Abflusssignals bezogen auf den Referenzzeitraum 1971–2000 für die Abflussprojektionen.

Einen eindeutigen Trend beim Klimasignal für den MNQ des Winterhalbjahres zeigt nur der Median für RCP8.5 beim Pegel Passau-Ingling. Dieser zeigt für die ferne Zukunft eine Zunahme von +12 %. Der Verlauf der Mediane der anderen Pegel bzw. von RCP2.6 zeigen kaum deutliche Veränderungen. Die Signale bewegen sich zwischen -10 % und +9 %. Die erkennbare konstante Abnahme bei RCP2.6 (im Gegensatz zum RCP8.5-Szenario) beim Pegel Kleinheubach ist auf die einzelne MIROC-Klimaprojektion zurückzuführen.

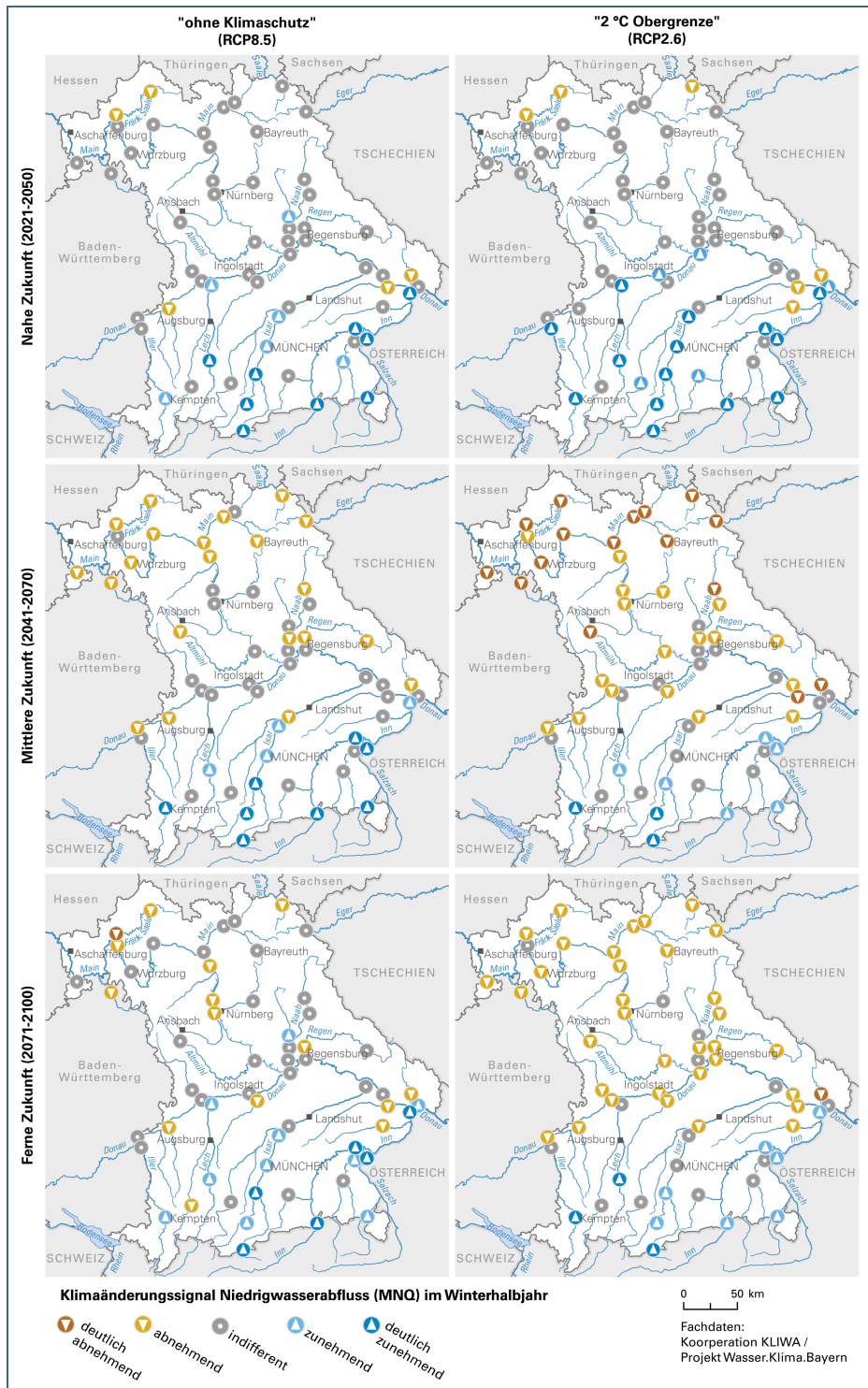


Abb. 43: Zu- und Abnahmen der Bandbreite der Klimaänderungssignale für den MNQ des Winterhalbjahres für alle 60 Auswertepiegel.

Wendet man die Interpretation der Bandbreiten auf alle Auswahlpegel an, ergibt sich das in Abb. 43 dargestellte Bild. Für Südbayern erkennt man eine Mischung des Pegels Hofkirchen und Passau-Ingling. In der nahen Zukunft zeigen sich für beide Szenarien bei Pegeln in Alpennähe sogar deutliche Zunahmen, während die weiter nördlich Richtung Donau gelegenen Pegel eher ein indifferentes Signal aufweisen. Insgesamt ergibt sich bei beiden Szenarien daraus ein indifferentes Signal. Für die mittlere Zukunft nehmen die Zunahmen ab. Es kommen vereinzelt Abnahmen hinzu, diese sind bei RCP2.6 etwas häufiger. Auch hier ergibt sich im Mittel für beide Szenarien ein indifferentes Bild für Südbayern. In der fernen Zukunft ändert sich gegenüber der mittleren Zukunft jeweils wenig, zusätzliche Abnahmen treten bei weiterhin im Mittel indifferenten Signalen auf. In Tab. 8 sind die aus Minimum und Maximum

ermittelten mittleren Bandbreite der Änderungssignale für Süd- und Nordbayern für die verschiedenen Szenarien und Betrachtungszeiträume aufgeführt. Die prozentualen Änderungssignale für die einzelnen Pegel für Maximum, Median und Minimum sind dem Anhang D zu entnehmen.

Für Nordbayern sind in der nahen Zukunft fast nur indifferente Signale bei beiden Szenarien zu erkennen, mit einzelnen Abnahmen im Norden. In der mittleren Zukunft zeigen sich dagegen fast nur Abnahmen bzw. deutliche Abnahmen bei RCP2.6 (was auf die MIROC-Klimaprojektion zurückzuführen ist), während diese bei RCP8.5 schwächer ausfallen.

Dies ist auch in den mittleren Bandbreiten in Tab. 8 zu erkennen, mit klarer Abnahme bei RCP2.6 und einer Abnahme bei RCP8.5. Für die ferne Zukunft verstärken sich in Nordbayern die Signale bei beiden Szenarien nicht, vielmehr treten bei RCP2.6 keine deutlichen Abnahmen mehr auf, auch die Abnahmen bei RCP8.5 gehen zurück. Die mittlere Bandbreite zeigt für das RCP2.6 demzufolge nur noch Abnahmen, für RCP8.5 sogar ein indifferentes Signal.

Tab. 8: Mittlere Bandbreite der Änderungssignale für Süd- und Nordbayern: MNQ Winterhalbjahr.

Mittlere Bandbreite in %	nahe Zukunft		mittlere Zukunft		ferne Zukunft	
	Süd-BY	Nord-BY	Süd-BY	Nord-BY	Süd-BY	Nord-BY
RCP2.6	-6 bis +14	-21 bis +16	-11 bis +9	-27 bis +3	-13 bis +12	-32 bis +11
RCP8.5	-11 bis +17	-23 bis +18	-13 bis +17	-23 bis +11	-11 bis +20	-25 bis +14

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Abflussprojektionen für die südbayerischen Pegel in der Nähe der Alpen klare Zunahmen zeigen. Diese sind beim RCP8.5 stärker ausgeprägt, jedoch zeigen sie sich auch beim RCP2.6-Szenario, allerdings in abgeschwächter Deutlichkeit. Im Übergangsbereich in Höhe der Donau lässt sich kein Trend beobachten. Abnahmen sind zwar beobachtbar, jedoch nicht stark ausgeprägt. Für Nordbayern lässt sich für den MNQ des Winterhalbjahres ein abnehmender Trend erkennen, der je nach Zeitraum unterschiedlich stark ausgeprägt ist.

Veränderung des Abflussregimes: monatlicher Niedrigwasserabfluss

In den folgenden Analysen werden die Ergebnisse der Abflussprojektionen für den monatlichen mittleren Niedrigwasserabfluss (MNQ(m)) vorgestellt. Die Methodik, die bereits für den MQ beschrieben wurde (Kapitel 4.4), wird angewandt, um die Veränderungen des MNQ(m) zu untersuchen. Dabei werden im Gegensatz zu den vorherigen Darstellungen für die Sommer- und Winterhalbjahre, die auf relativen Änderungssignalen basierten, die Absolutwerte des MNQ(m) für die drei definierten Zukunftszeiträume dargestellt. Diese Darstellung umfasst zudem die Bandbreite des Abflussprojektionsensembles und ermöglicht eine differenzierte Betrachtung der möglichen Abflussverhältnisse über das Jahr hinweg. Ein wesentlicher Vorteil dieser Analyse ist, dass sie die Änderungen innerhalb des Jahres deutlich sichtbar macht. Zusätzlich wird der Kennwert für den Referenzzeitraum, der auf historischen Messdaten basiert, zur Verfügung gestellt. Diese umfassende Analyse trägt nicht nur zur Bewertung der aktuellen hydrologischen Bedingungen bei, sondern ermöglicht auch eine fundierte Einschätzung zukünftiger Wasserverfügbarkeiten und potenzieller Herausforderungen im Wasserhaushalt.

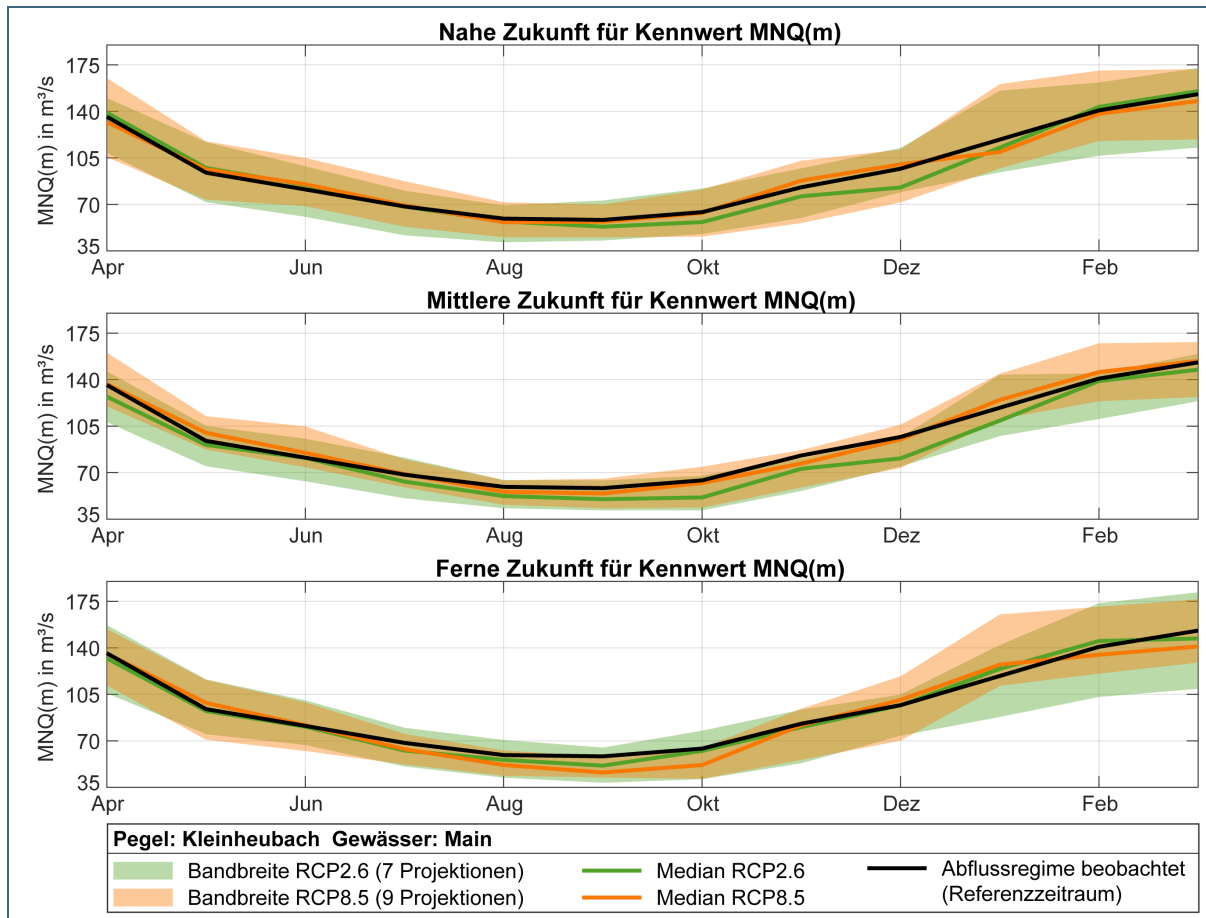


Abb. 44: Monatlicher mittlerer Niedrigwasserabfluss (MNQ(m)) für das Abflussprojektionsensemble des Pegels Kleinheubach für die drei Zukunftszeiträume nahe (2021–2050), mittlere (2041–2070) und ferne (2071–2100) Zukunft. Die schwarze Linie basiert auf den Beobachtungsdaten des Referenzzeitraums 1971–2000.

Am Pegel Kleinheubach (Abb. 44) zeigen die Abflussprojektionen im Median für die nahe Zukunft bis zur fernen Zukunft für die die Frühjahrsmonate nur geringe Veränderungen. Dies zeigt sich daran, dass sie weitgehend mit den dargestellten Referenzwerten für 1971–2000 übereinstimmen. In den meisten Sommer-, Herbst- und Wintermonaten (Juli bis Dezember) liegt der Median von RCP2.6 für die nahe und mittlere Zukunft zum einen unter den Referenzwerten sowie den Medianwerten von RCP8.5. Das bedeutet, dass in beiden Zeiträumen unter RCP2.6 mit geringeren Abflüssen in diesen Monaten zu rechnen ist. Dies kehrt sich jedoch in der fernen Zukunft um. Die Bandbreite beider Szenarien für die nahe Zukunft umschließt die Referenzwerte relativ gleichmäßig. Bis zum Ende des Jahrhunderts sind jedoch signifikante Veränderungen in den Sommer- und Herbstmonaten zu beobachten. In dieser Zeit verschiebt sich die Bandbreite sowohl für RCP2.6 als auch für RCP8.5 weiter nach unten. Für die Monate August bis Oktober in der fernen Zukunft liegen die Werte von RCP8.5 sogar vollständig unter den Referenzwerten. Die Bandbreiten und der Median für die Winter und Frühjahrsmonate zeigen wie schon in der nahen Zukunft keine signifikanten Änderungen im Niedrigwasserbereich. Zusammenfassend verschärft sich der Jahresgang des MNQ(m) am Pegel Kleinheubach leicht, mit weiteren Abnahmen im Spätsommer.

Am Pegel Hofkirchen (Abb. 45) ist schon in der nahen Zukunft in den Wintermonaten (Dezember bis Januar) ein höherer Wert des MNQ(m) der Abflussprojektionen im Vergleich zu den Referenzwerten des Kennwertes erkennbar. Der Median ist zwar bis auf einzelne Monate noch deckungsgleich mit den Referenzwerten, die Bandbreiten der beiden Szenarien liegen aber hauptsächlich über den Referenzwerten der Beobachtungen. Dies wird, je weiter man in die Zukunft blickt, deutlicher und in der

fernen Zukunft befindet sich sowohl der Median der beiden Szenarien als auch die gesamte Bandbreite bei RCP8.5 eindeutig über den Referenzwerten für 1971–2000. Die Bandbreite von RCP2.6 hingegen verteilt sich gleichmäßig über und unter dem Verlauf der Referenzwerte.

Auch in den Sommermonaten sind die Mediane in der nahen Zukunft deckungsgleich mit den Referenzwerten, was eher auf keine klaren Änderung schließen lässt. Ebenso liegt die Bandbreite beider Szenarien relativ gleichmäßig über und unter den Referenzwerten. Dies ändert sich in der mittleren und fernen Zukunft deutlich. Bei der Bandbreite von RCP2.6 lässt sich lediglich in der mittleren Zukunft eine abnehmende Tendenz zu niedrigeren Abflüssen erkennen. Median und Bandbreite von RCP8.5 aber sind in der mittleren und fernen Zukunft in den Sommermonaten deutlich unter den Referenzwerten. Zusammenfassend kann man sagen, dass sich die Unterschiede zwischen Sommer (geringste Abflüsse) und im Winter (höchste Abflüsse) weiter verstärken. Für das RCP8.5-Szenario erweitert sich das insofern, dass Abnahmen von MNQ(m) am Ende des Jahrhunderts von Mai bis Oktober auftreten können.

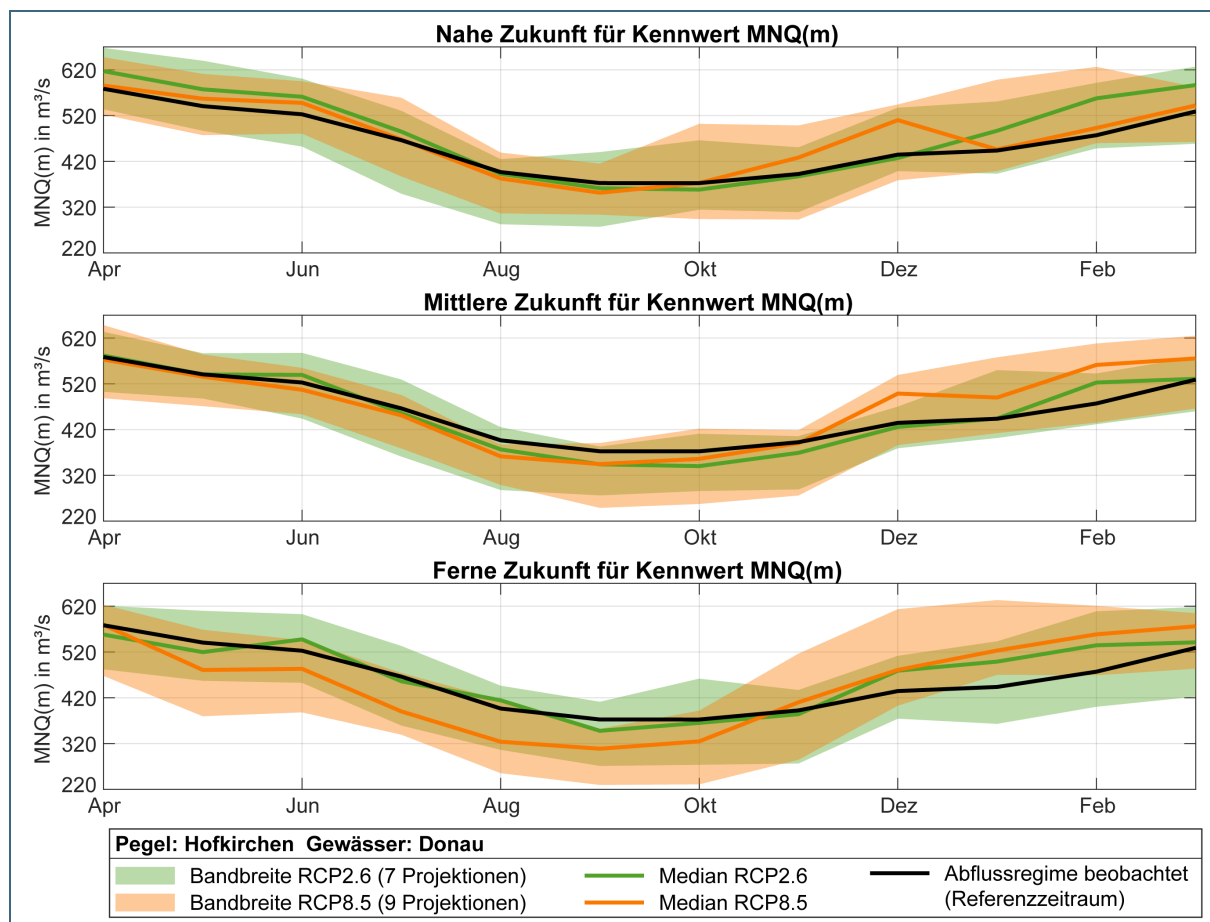


Abb. 45: Monatlicher mittlerer Niedrigwasserabfluss (MNQ(m)) für das Abflussprojektionsensemble des Pegels Hofkirchen für die drei Zukunftszeiträume nahe (2021–2050), mittlere (2041–2070) und ferne (2071–2100) Zukunft. Die schwarze Linie basiert auf den Beobachtungsdaten des Referenzzeitraums 1971–2000.

Am Pegel Passau-Ingling liegen die Mediane und Bandbreiten für den MNQ(m) in den Wintermonaten fast durchweg über den Referenzwerten. Dieses Verhalten verstärkt sich im Laufe der Zeit. In der fernen Zukunft liegen sie deutlich darüber, zudem erkennt man auch eine deutliche Differenzierung beider Szenarios. RCP8.5 zeigt dabei größere Zunahmen als RCP2.6.

Für die Sommer- und Herbstmonate Juni bis Oktober ist bereits in der nahen Zukunft eine Abnahme angelegt. Hier unterscheiden sich auch die beiden Szenarien eher wenig. In der mittleren Zukunft dif-

ferenzieren sich beide Szenarien stärker. In der fernen Zukunft zeigt RCP8.5 eine sehr deutliche Abnahme. Zudem liegt sogar die gesamte Bandbreite für RCP8.5 unter den Referenzwerten. Bei RCP2.6 liegen die Referenzwerte noch innerhalb des oberen Bereichs der Bandbreite. Auch der Median ist im Vergleich zum RCP8.5 nur knapp unter den Referenzwerten. Zusammenfassend wird sich der Abfluss in den Zeiten mit den niedrigsten Abflüssen im Jahresverlauf nicht weiter verringern, vielmehr nimmt der MNQ(m) in den Sommermonaten ab. Dort ist der MNQ(m) im Jahresverlauf aktuell am höchsten, damit kann man von einer gewissen Angleichung der Abflüsse über das Jahre sprechen.

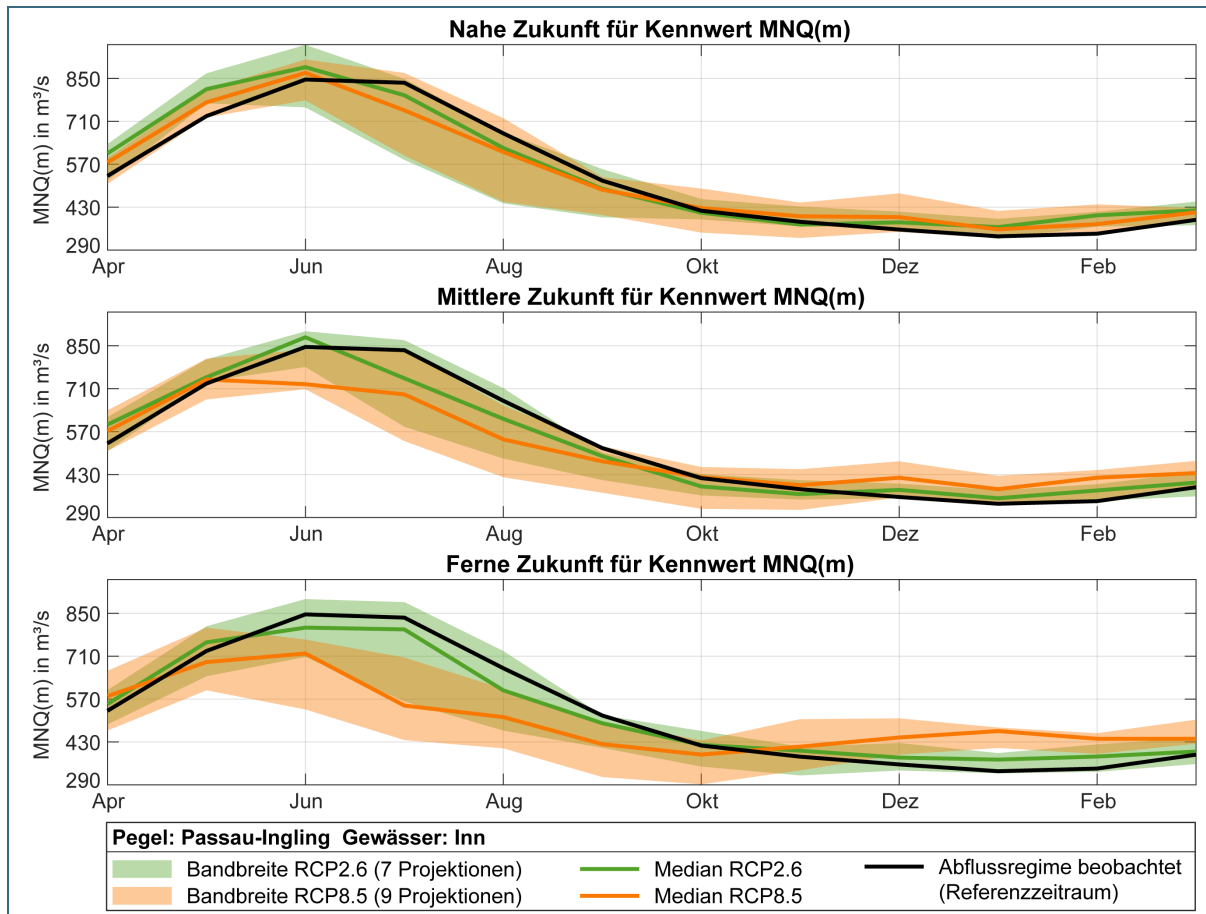


Abb. 46: Monatlicher mittlerer Niedrigwasserabfluss (MNQ(m)) für das Abflussprojektionsensemble des Pegels Passau-Ingling für die drei Zukunftszeiträume nahe (2021–2050), mittlere (2041–2070) und ferne (2071–2100) Zukunft. Die schwarze Linie basiert auf den Beobachtungsdaten des Referenzzeitraums 1971–2000.

4.6.2.2 Zukünftige Entwicklung von Niedrigwasserjährlichkeiten

Kernaussagen Niedrigwasserjährlichkeiten:

Die Bandbreite der Niedrigwasserjährlichkeiten ist groß, lokal bzw. regional können in ganz Bayern Abnahmen mit teilweise über -45 % auftreten.

Ein weiterer Indikator zur Abschätzung der zukünftigen Entwicklung der Niedrigwassersituation sind Jährlichkeiten von Abflusskennwerten, also Situationen eines bestimmten Abflusses, die im Mittel statistisch nach einer bestimmten Anzahl von Jahren wiederkehren. Betrachtet werden dabei der NQ_5 und der NQ_{50} , also Niedrigwasserereignisse, die statistisch alle 5 bzw. alle 50 Jahre vorkommen. Im

folgenden Kapitel werden diese anhand der drei Beispielpegel Kleinheubach, Hofkirchen und Passau-Ingling vorgestellt.

Am pluvial geprägten Pegel Kleinheubach zeigt sich in der Boxplotauswertung für den NQ_5 (Abb. 47), dass die Mediane des Klimaänderungssignals für die ferne Zukunft bei einer Abnahme von etwa -10 % liegen, bei RCP8.5 etwas niedriger sind als bei RCP2.6. Dies bedeutet, dass der Niedrigwasserabfluss, der alle 5 Jahre auftritt, sich zukünftig um diesen Wert verringert. Am nivo-pluvial geprägten Pegel Hofkirchen ergibt sich ein ähnliches Bild. Jedoch liegen die beiden Mediane weiter auseinander, für RCP2.6 liegt er bei etwa -5 % und für RCP8.5 bei etwa -15 %. Im Gegensatz dazu unterscheidet sich der nival geprägte Pegel Passau-Ingling deutlich: Hier liegen beide Mediane im positiven Bereich, um etwa +5 %. Dies bedeutet, dass an diesem Pegel der entsprechende Niedrigwasserabfluss, der alle 5 Jahre auftritt, um etwa 5 % höher liegt.

Die Änderungen an den drei Beispielpegeln für den NQ_{50} werden ebenfalls in Abb. 47 dargestellt. Am Pegel Kleinheubach sind mit Abnahmen zwischen -5 und -10 % nur geringe Unterschiede zum NQ_5 für die ferne Zukunft erkennbar. Am Pegel Hofkirchen dagegen treten die Unterschiede deutlicher hervor. Hier haben sich die Mediane hin zu keinen Änderungen um 0 % nach oben verschoben. Der Pegel Passau-Ingling zeigt hingegen ein gemischtes Bild. Während der Median von RCP2.6 Zunahmen um knapp 10 % aufweist, verringert er sich bei RCP8.5 deutlich und hat sich mit -3 % in den negativen Bereich verschoben.

Bei den Auswertungen der Niedrigwasserjährlichkeiten ergeben sich allerdings große Bandbreiten an möglichen Signalen für NQ_5 und NQ_{50} (vgl. Abb. 47). Für die beiden nördlich gelegenen Pegel ist die Bandbreite bei RCP2.6 größer als bei RCP8.5. Dies liegt hauptsächlich an den viel geringeren maximalen Signalen der beiden Pegel für RCP8.5. Die minimalen Änderungssignale sind bis auf den Pegel Hofkirchen für den NQ_{50} vergleichbar für beide Szenarien. Deutlich geringere Unterschiede in der Lage der Bandbreite lassen sich beim Pegel Passau-Ingling beobachten. Es ist anzunehmen, dass der positive Trend am Pegel Passau-Ingling durch das alpin geprägte nivale Regime hervorgerufen wird. So liegt hier das Abflussminimum normalerweise in den Wintermonaten. Durch den zunehmenden Regenfal anstelle des Schneefalls wird der winterliche Abfluss erhöht.

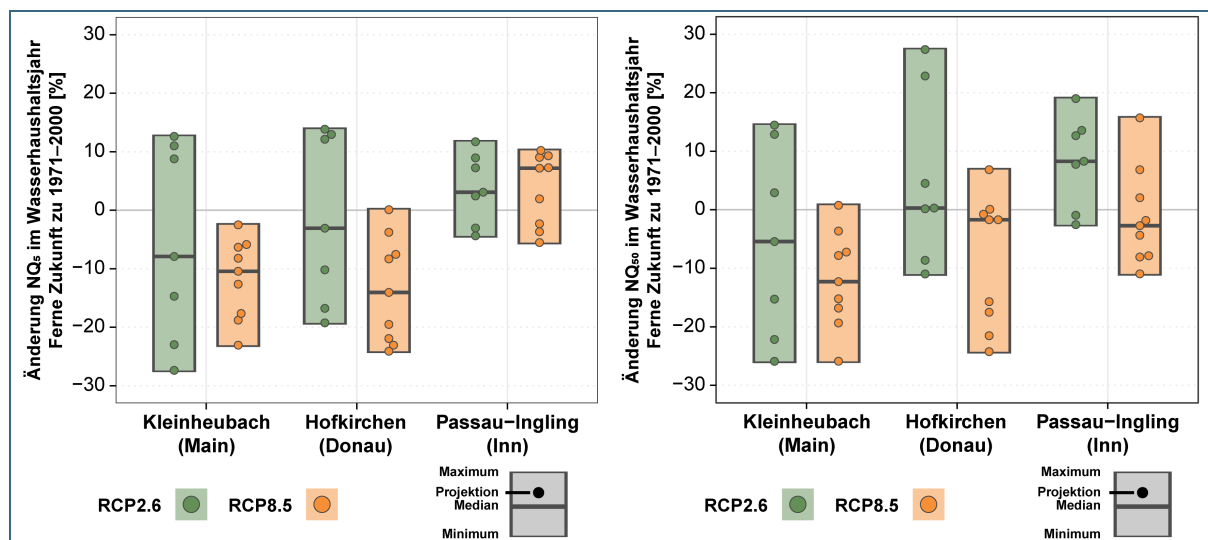


Abb. 47: Boxplotdarstellung der Änderung der Jährlichkeiten (NQ_5 und NQ_{50}) an den Pegeln Kleinheubach, Hofkirchen und Passau-Ingling für die ferne Zukunft (2071–2100) zu 1971–2000.

In Abb. 48 und Abb. 50 sind jeweils die maximalen Änderungssignale für die beiden Jährlichkeiten dargestellt. Die maximalen Signale zeigen größtenteils Zunahmen und vor allem in Nordbayern auch

keine klaren Signale zwischen -15 und +15 %. Generell gehen die ermittelten maximalen Zunahmen aber für die meisten Pegel bis zum Ende des Jahrhunderts in beiden Szenarien zurück. Dies ist beim RCP8.5 deutlicher erkennbar. Für RCP2.6 mit den im Vergleich größeren maximalen Zunahmen ergibt sich ein etwas ausgeglicheneres Bild bei dem auch in der fernen Zukunft über die Hälfte der Pegel noch ein maximales Signal von über +15 % zeigen.

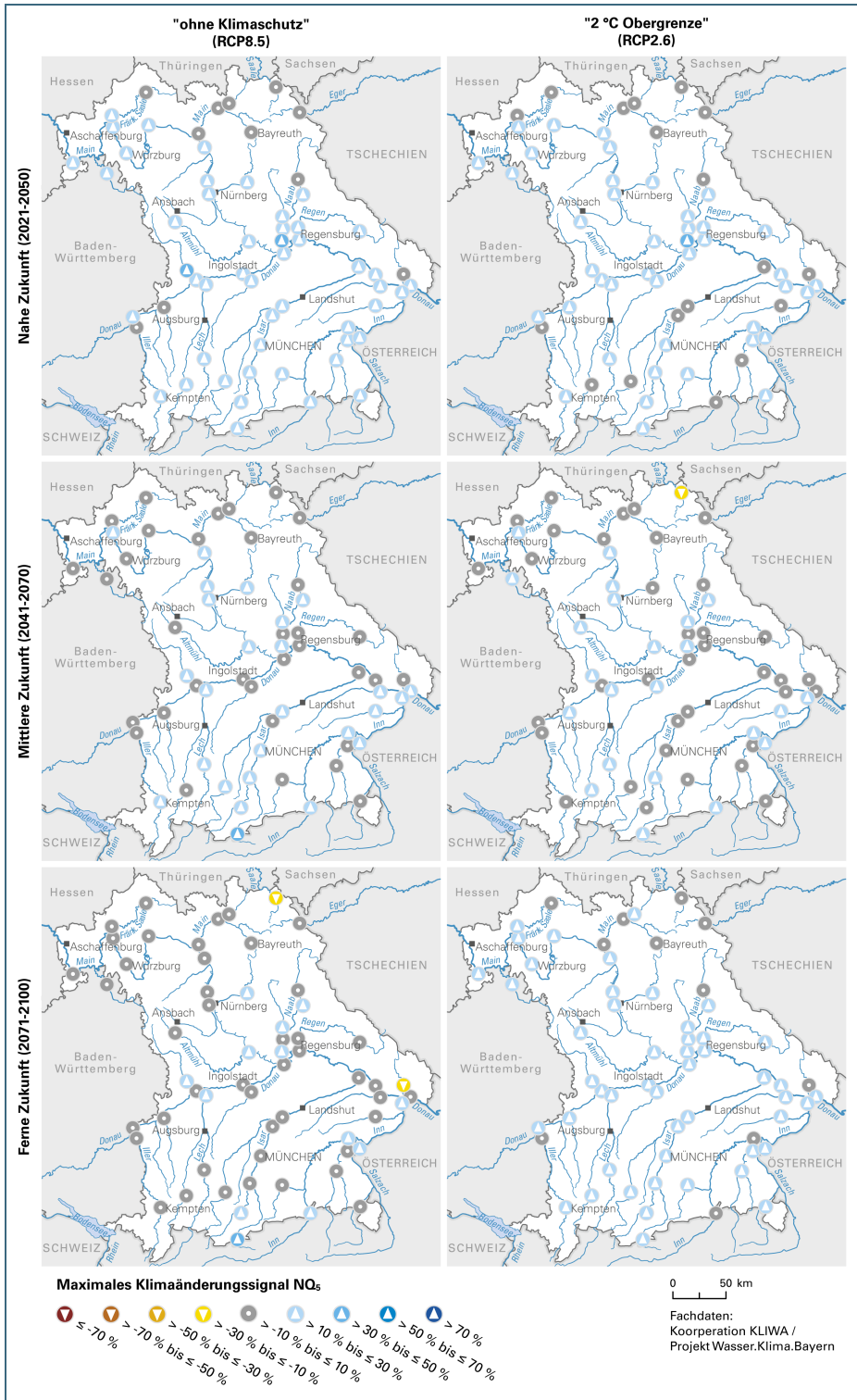


Abb. 48: Maximale Änderungssignale des NQ₅ für die Auswertepiegel.

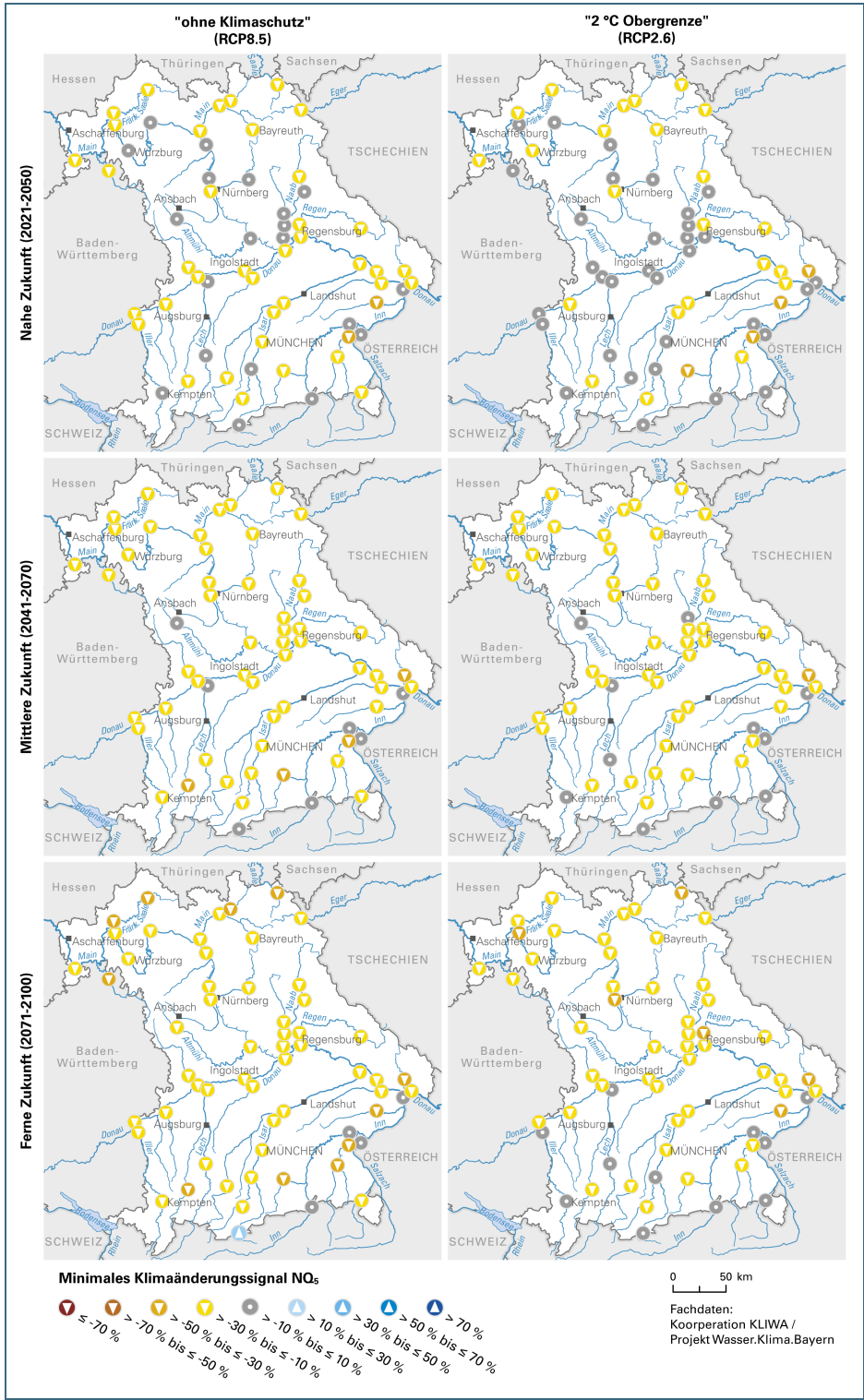


Abb. 49: Minimale Änderungssignale des NQ₅ für die Auswertepegel.

Bei den minimalen Signalen (Abb. 49 und Abb. 51) zeigen sich entweder keine klaren Signale oder Abnahmen. Bis zum Ende des Jahrhunderts verstärken sich die negativen Änderungssignale beim RCP8.5 stärker als bei RCP2.6 für die beiden Kennwerte der Niedrigwasserjährlichkeiten und erreichen für einige Pegel Abnahmen von -45 %. In der fernen Zukunft sind mit einzelnen Ausnahmen bei RCP8.5 überall Abnahmen bei den minimalen Signalen, also eine Verschärfung der Niedrigwassersituationen, zu erkennen. Die Kartendarstellung der Medianwerte finden sich in Anhang E.

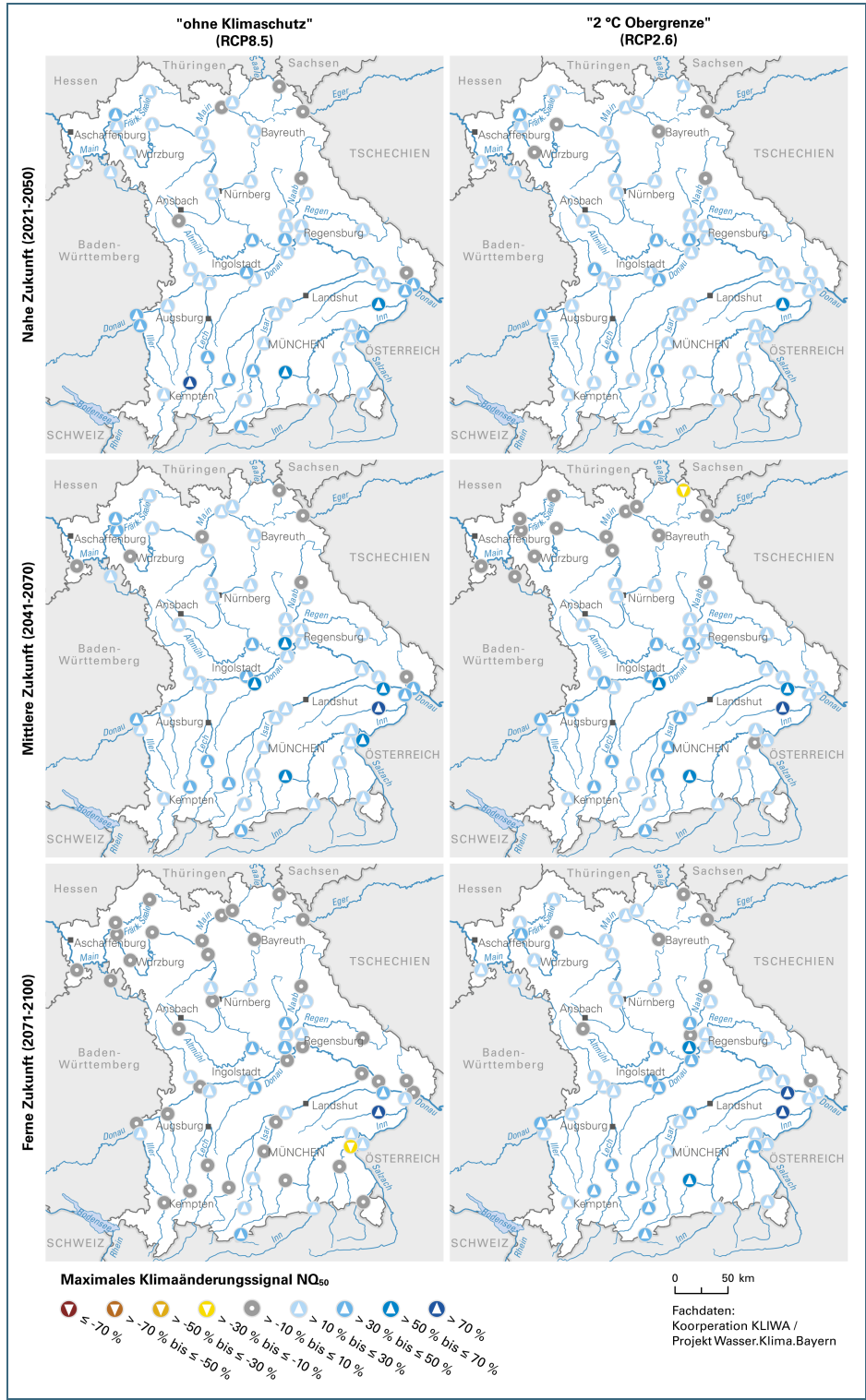


Abb. 50: Maximale Änderungssignale des NQ₅₀ für die Auswertepegel.

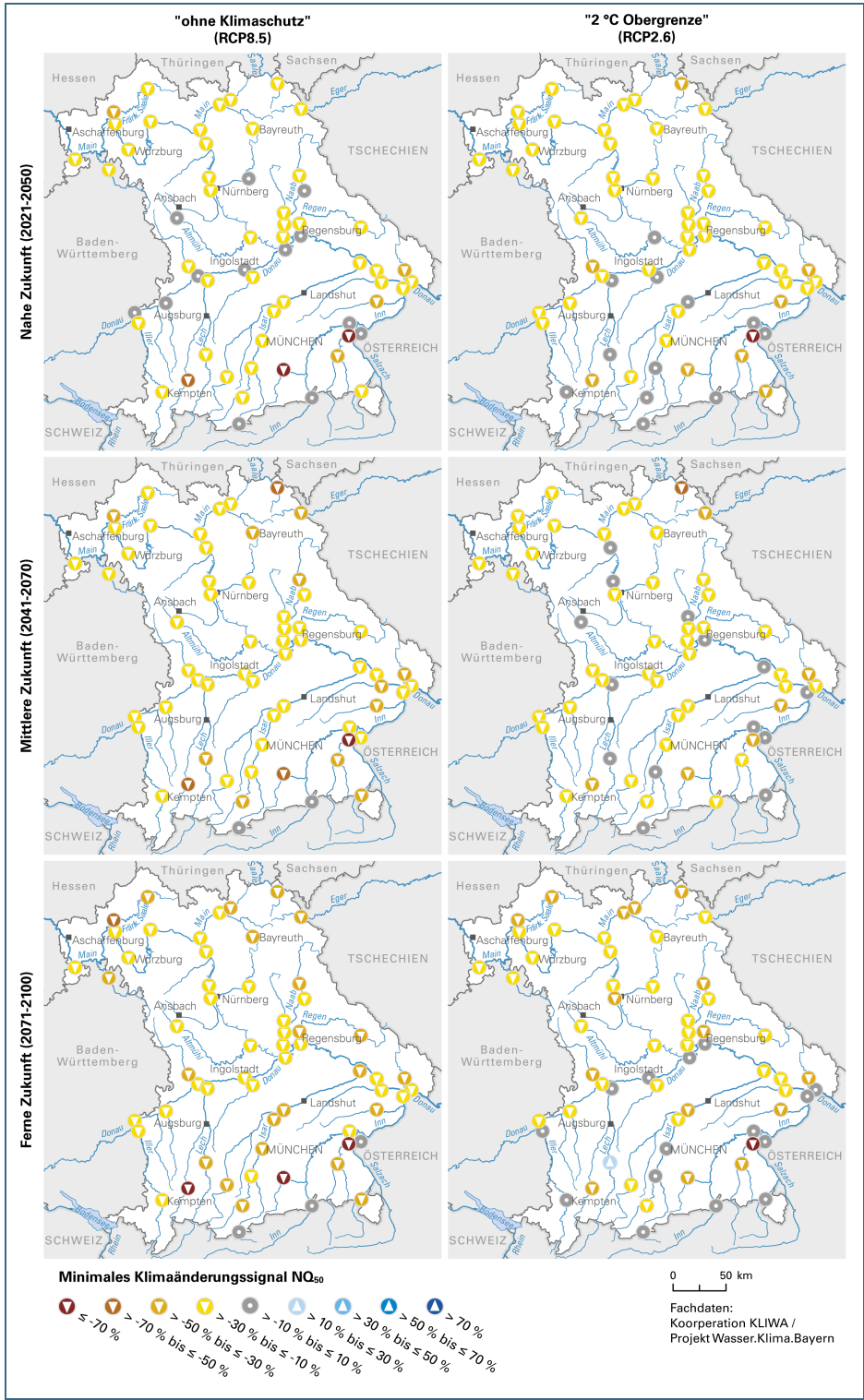


Abb. 51: Minimale Änderungssignale des NQ₅₀ für die Auswertepergel.

4.6.2.3 Fallbeispiel: Main-Donau Überleitung

Die für Bayern charakteristische Niederschlagsverteilung zeigt im Referenzzeitraum einen jährlichen Niederschlag von etwa 2.000 mm/Jahr in den Alpen, welcher nach Nordwestbayern hin bis auf rund 700 mm/Jahr stark abnimmt. Aufgrund dieser Unterschiede sind die Flüsse im Norden Bayerns stärker von Niedrigwassersituationen betroffen als die südbayerischen Gewässer.

Deshalb wurde in den 90er-Jahren das fränkische Überleitungssystem erbaut (Abb. 52), um während Niedrigwasserperioden einen bestimmten Mindestabfluss in der Regnitz für den Norden Bayerns gewährleisten zu können. So ist am Pegel Hüttendorf an der Regnitz im Winter ein Mindestabfluss vorgesehen. Um dieses Ziel zu erreichen, werden jährlich rund 150 Millionen m³ Wasser aus Südbayern in den Norden übergeleitet. Wichtige Bestandteile dieses Systems sind dabei die Speicher Brombach-, Roth- und Altmühlsee. Der Großteil des notwendigen Wassers (125 Millionen m³) wird aus der Donau entnommen und mithilfe mehrerer Pumpen über den Main-Donau-Kanal (MDK) zunächst in den Rothsee-Speicher gepumpt. Ein geringerer Anteil (25 Millionen m³) wird über den Altmühlsee in den Brombachsee geleitet. Der Rothsee übernimmt hier die Hauptlast zum Erreichen des Aufhöhungsziels. Dabei gibt es eine Obergrenze für die Wasserentnahme: So muss nach der Entnahme in der Donau am Pegel Kelheim-Winzer ein Mindestabfluss gewährleistet bleiben. Seit seiner Einführung konnte sich das System bisher gut bewähren und die Bemessung der Überleitung war die meiste Zeit ausreichend. Jedoch kam das System während der letzten Trockenjahre, wie z. B. 2018, kurzfristig an seine Grenzen und es konnte zeitweise keine Entnahme aus der Donau erfolgen.

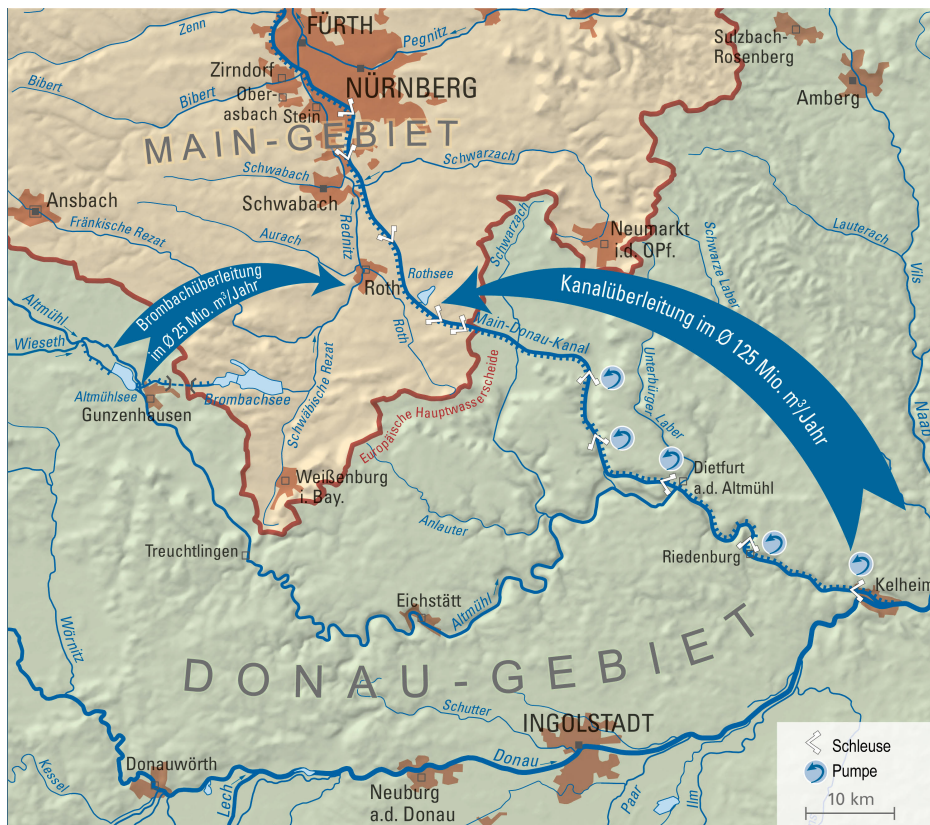


Abb. 52: Das fränkische Überleitungssystem (StMUV 2018).

Wie oben erwähnt, ist eine wesentliche Beschränkung des Überleitungssystems der Pegel Kelheim-Winzer. Nur wenn die Donau hier genügend Wasser führt, kann das System verwendet werden, um in Niedrigwasserphasen Wasser überzuleiten. Um ein Anwendungsbeispiel für die Abflussprojektionen zu geben, soll deshalb das Klimaänderungssignal für den Abflusskennwert sumD für den Pegel Kelheim-Winzer dargestellt werden. Dieser Abflusskennwert gibt normalerweise die durchschnittliche Anzahl an Tagen pro Jahr an, an denen der Abfluss unter dem MNQ liegt. Der Grenzwert am Pegel Kelheim-Winzer, ab dem nicht mehr übergeleitet werden darf, beträgt jedoch 147 m³, weswegen für die Berechnung des Kennwertes sumD dieser Wert verwendet wird. Nimmt sumD also zu, kann davon ausgegangen werden, dass auch die Zeiten, in denen nicht übergeleitet werden kann, zunehmen werden. Abb. 53 zeigt, dass sich die Unterschreitungstage erheblich erhöhen werden, legt man das RCP8.5-Szenario zugrunde. Diese Dauer kann sich in der fernen Zukunft bei Betrachtung des Maximalwertes um mehr als 250 % erhöhen (Median bis zu +50 %). Aber auch schon bei dem RCP2.6-

Szenario ist eine Zunahme der Tage unterhalb des Schwellwertes erkennbar. Inwiefern dies durch eine angepasste Steuerung des Überleitungssystems ausgeglichen werden kann oder ob es weiterer baulicher Maßnahmen bedarf, kann hier nicht weiter betrachtet werden. Zur Beantwortung dieser Frage sind zusätzliche Betrachtungen anderer wesentlicher Pegel des Überleitungssystems notwendig.

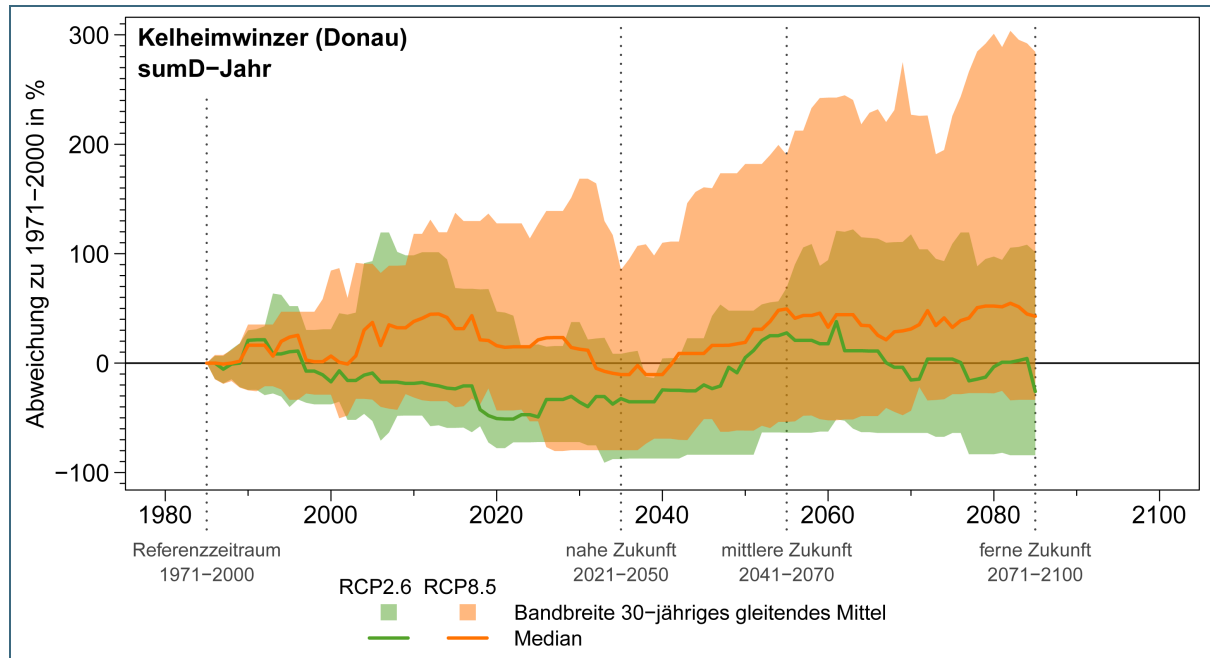


Abb. 53: Projizierte minimale, maximale und mittlere (Median) Änderungssignale für die Unterschreitungstage (sumD) des Abflusses ($Q \leq 147 \text{ m}^3/\text{s}$) am Pegel Kelheimwinzer. Dargestellt für die Szenarien RCP2.6 und RCP8.5. Der modellierte Referenzwert (1971 bis 2000) beträgt 6,3 Unterschreitungstage/Jahr.

4.6.3 Abflussprojektionen für den Hochwasserabfluss

4.6.3.1 Zukünftige Entwicklung der Hochwasserkennwerte

Kernaussagen MHQ Änderungssignal bis 2100:

- Der MHQ im Sommerhalbjahr wird in Gesamtbayern voraussichtlich zunehmen. Dies ist weitgehend unabhängig vom angenommenen Szenario.
- Der MHQ wird im Winterhalbjahr in Südbayern voraussichtlich zunehmen. In Nordbayern zeigen die Abflussprojektionen keinen klaren Trend.

Abb. 54 und Abb. 56 zeigen den Verlauf der Klimaänderungssignale in Prozent für den MHQ der drei Beispielpegel von Nord nach Süd Kleinheubach (Main), Hofkirchen (Donau) und Passau-Ingling (Inn) für das Sommer- und Winterhalbjahr. Als Basisjahr für die Einteilung der Halbjahre wird das hydrologische Jahr verwendet. Dargestellt sind die Maxima, Minima und der Median der Klimaänderungssignale für alle zukünftigen 30-jährigen Zeiträume bezogen auf den Referenzzeitraum (1971–2000), nicht nur der vorwiegend verwendeten Zukunftszeiträumen nahe, mittlere und ferne Zukunft. Negative Signale werden als Abnahmen und positive Signale als Zunahmen des Kennwertes interpretiert. Die Methodik zur Berechnung dieser Änderungssignale ist in Kapitel 2.6.3.2 beschrieben. Die Auswertungen der Änderungssignale der Jahreswerte finden sich in Anhang C.

Bei den Klimaänderungssignale der drei Pegel für RCP2.6 fallen zunächst die hohen Abnahmen zwischen der mittleren und fernen Zukunft auf. Diese sind auf eine einzelne Klimaprojektion zurückzuführen.

Würde man diese Projektion von der Auswertung ausschließen, würde sich die Bandbreite meist innerhalb der Bandbreiten des RCP8.5 Szenarios bewegen. Dies ist im Anhang B dargestellt.

Hydrologisches Sommerhalbjahr

Die Bandbreiten der Klimaänderungssignale der drei Pegel zeigen für die nahe Zukunft für den MHQ des Sommerhalbjahres hauptsächlich Zunahmen (Abb. 54). Diese liegen für den Pegel Kleinheubach bei -5 % bis +42 % (RCP2.6) und bei -11 % bis +55 % (RCP8.5). Für den Pegel Hofkirchen sind die Bandbreiten etwas schmaler und reichen von -6 % bis +31 % (RCP2.6) und von +1 % bis +55 % (RCP8.5). Beim Pegel Passau-Ingling zeigt nur die Bandbreite von RCP8.5 Szenarios eine Zunahme und reicht von -12 % bis +28 %. Die Bandbreite von RCP2.6 Szenarios zeigt sowohl Zu- als auch Abnahmen zwischen -12 % und 16 % und damit ein indifferentes Signal.

Für die mittlere Zukunft ergeben sich meist keine großen Veränderungen gegenüber der nahen Zukunft. Ausnahme ist das RCP2.6 in Kleinheubach, dass neben dem RCP2.6 in Passau-Ingling nun ein indifferentes Signal mit Zu- und Abnahmen zeigt. Diese liegen für den Pegel Kleinheubach bei Zu- und Abnahmen von -17 % bis +32 % und bei Passau-Ingling von -15 % bis +27 % (RCP2.6). Alle anderen zeigen weiterhin Zunahmen. Für Kleinheubach sind dies klare Zunahmen von -1 % bis +48 % (RCP8.5). Für den Pegel Hofkirchen zeigen die Bandbreiten Zunahmen und reichen von -3 % bis +32 % (RCP2.6) und von -1 % bis +24 % (RCP8.5). Beim Pegel Passau-Ingling zeigt nur die Bandbreite des RCP8.5 Szenarios eine Zunahme von -11 % bis +33 %.

In der fernen Zukunft zeigt lediglich die Bandbreite von RCP2.6 für den Pegel Passau-Ingling ein indifferentes Klimasignal mit Zu- und Abnahmen (12 % bis +13 %). Bei dem Rest zeigen sich Zunahmen. Diese liegen für den Pegel Kleinheubach bei Zunahmen von -12 % bis +52 % (RCP2.6) und von -9 % bis +52 % (RCP8.5). Für den Pegel Hofkirchen sind es +1 % bis +18 % (RCP2.6) und von -7 % bis +25 % (RCP8.5). Beim Pegel Passau-Ingling zeigt nur die Bandbreite von RCP8.5 eine Zunahme und reicht von -11 % bis +28 %.

Bei der Betrachtung des Medians zeigt sich, dass der MHQ für alle drei Pegel für RCP8.5 fast durchgehend im positiven Bereich liegt. Im Vergleich zum Median von RCP2.6 zeigt dieser auch meist ein größeres Klimasignal an. Besonders deutlich ist dies beim Pegel Kleinheubach mit einem Median von >20 % in der fernen Zukunft.

Wendet man die Interpretation der Bandbreiten auf alle Auswahlpegel an, ergibt sich das in Abb. 55 dargestellte Bild. Für Südbayern ergeben sich für fast alle Pegel zu allen drei Zukunftszeiträumen und somit auch im Mittel Zunahmen oder klare Zunahmen. Diese sind für die nahe Zukunft bei RCP8.5 am ausgeprägtesten und nehmen bis Ende des Jahrhunderts tendenziell ab. Es treten stattdessen auch vereinzelt Pegel mit einem indifferenten Signal mit Zu- und Abnahmen auf. Für RCP2.6 sind die Zunahmen nicht so deutlich, bleiben aber dafür bis Ende des Jahrhunderts größtenteils konstant.

Auch für Nordbayern sind hauptsächlich Zunahmen zu beobachten, die am deutlichsten in der nahen Zukunft sind. Die Ausnahme bilden einige Pegeln im Nordosten Bayerns, welche in der mittleren Zukunft für RCP2.6 sowohl Zu- als auch Abnahmen und somit ein indifferentes Signal zeigen. Das RCP8.5 hat in der nahen und in der mittleren Zukunft eine große Zahl an Pegeln mit klaren Zunahmen.

In Tab. 8 sind die aus Minimum und Maximum ermittelten mittleren Bandbreiten der Änderungssignale für Süd- und Nordbayern für die verschiedenen Szenarien und Betrachtungszeiträume aufgeführt. Die prozentualen Änderungssignale für die einzelnen Pegel für Maximum, Median und Minimum sind dem Anhang D zu entnehmen.

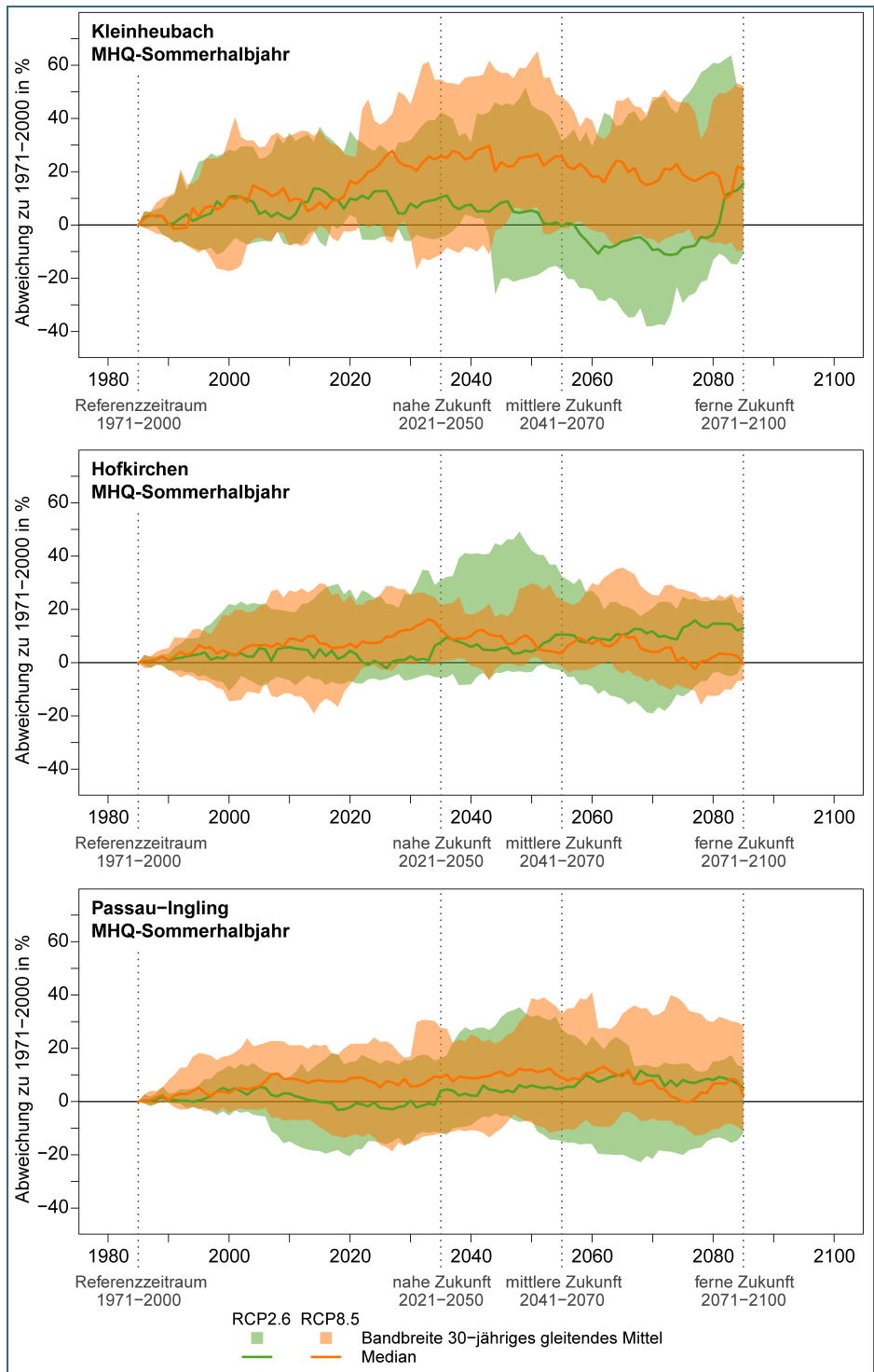


Abb. 54: Änderungssignal des saisonalen MHQ (Sommerhalbjahr) für die Pegel Passau-Ingling (unten), Hofkirchen (Mitte) und Kleinheubach (oben). Dargestellt ist das 30-jährige gleitende Mittel des Abflusssignals bezogen auf den Referenzzeitraum 1971–2000 für die Abflussprojektionen.

Tab. 8: Bandbreite der Änderungssignale für Süd- und Nordbayern: MHQ hydrologisches Sommerhalbjahr

Mittlere Bandbreite in %	nahe Zukunft		mittlere Zukunft		ferne Zukunft	
	Süd-BY	Nord-BY	Süd-BY	Nord-BY	Süd-BY	Nord-BY
RCP2.6	-10 bis +33	-12 bis +47	-8 bis +35	-17 bis +34	-6 bis +26	-18 bis +53
RCP8.5	-4 bis +34	-6 bis +66	-7 bis +31	-6 bis +67	-14 bis +37	-13 bis +59

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Abflussprojektionen für fast alle Pegel Zunahmen anzeigen. Für die Südbayerischen Pegel ist dies deutlicher als für Nordbayern. Diese Zunahmen sind beim RCP8.5 stärker ausgeprägt, jedoch zeigen sie sich auch bei RCP2.6 in schwächerer Form. Generell sind die Zunahmen bei RCP8.5 in der nahen Zukunft am ausgeprägtesten.

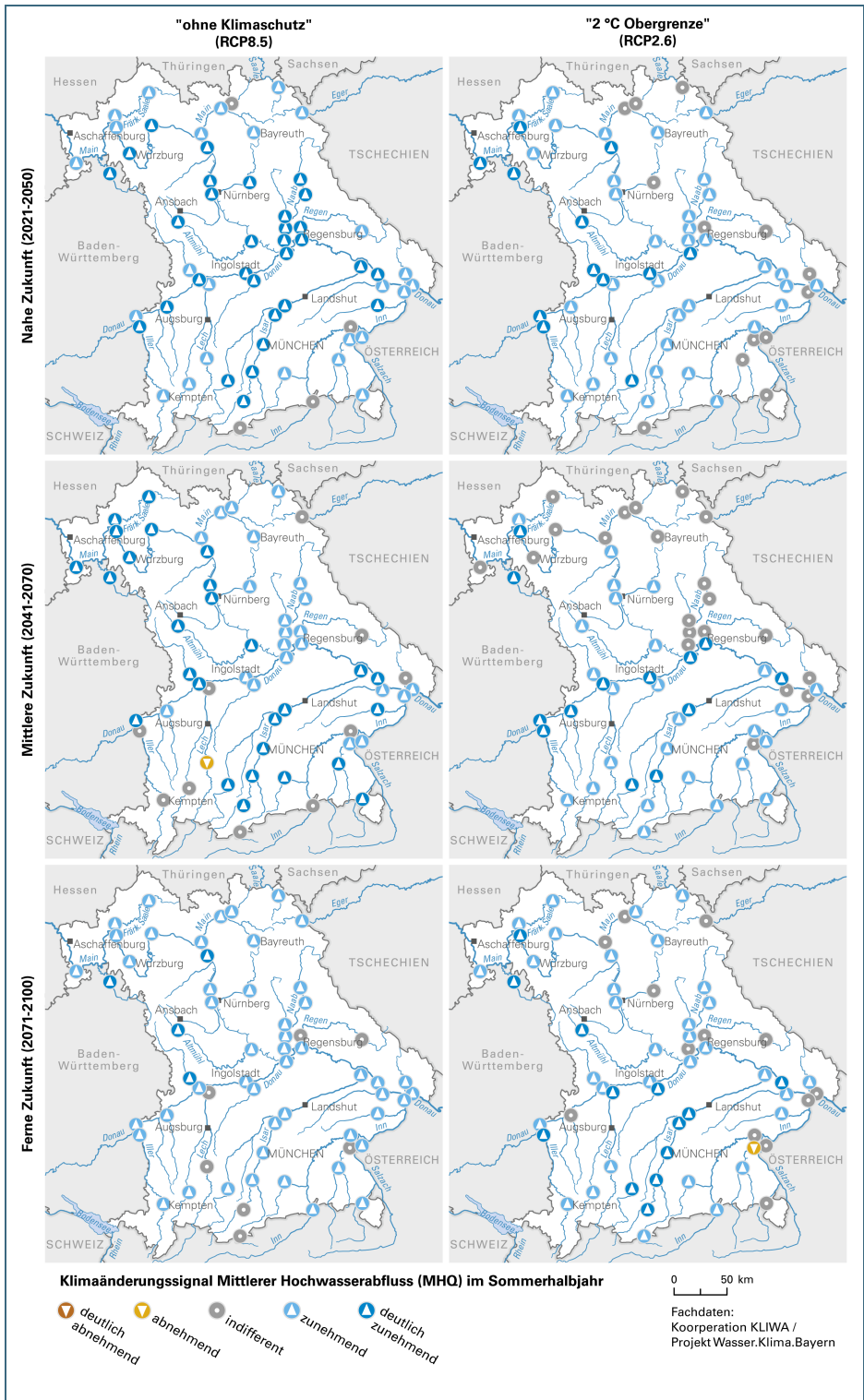


Abb. 55: Zu- und Abnahmen der Bandbreite der Klimaänderungssignale für den MHQ des Sommerhalbjahres für alle 60 Auswertepiegel.

Hydrologisches Winterhalbjahr

Die Bandbreiten der Klimaänderungssignale für die nahe Zukunft der zwei südlichen Pegel zeigen für den MHQ des Winterhalbjahres Zunahmen (Abb. 56) bzw. sogar deutliche Zunahmen beim Pegel

Passau-Ingling. Diese liegen für den Pegel Hofkirchen bei -4 % bis +30 % (RCP2.6) und bei -8 % bis +34 % (RCP8.5). Für den Pegel Passau-Ingling sind die Bandbreiten etwas schmäler und reichen von -1 % bis +20 % (RCP2.6) und von +1 % bis +24 % (RCP8.5). Für das RCP8.5 ist damit in Passau-Ingling die gesamte Bandbreite im positiven Bereich. Der Pegel Kleinheubach zeigt dagegen ein indifferentes Signal mit Zu- und Abnahmen von -25 % bis +18 % (RCP2.6) bzw. -28 % bis +28 % (RCP8.5).

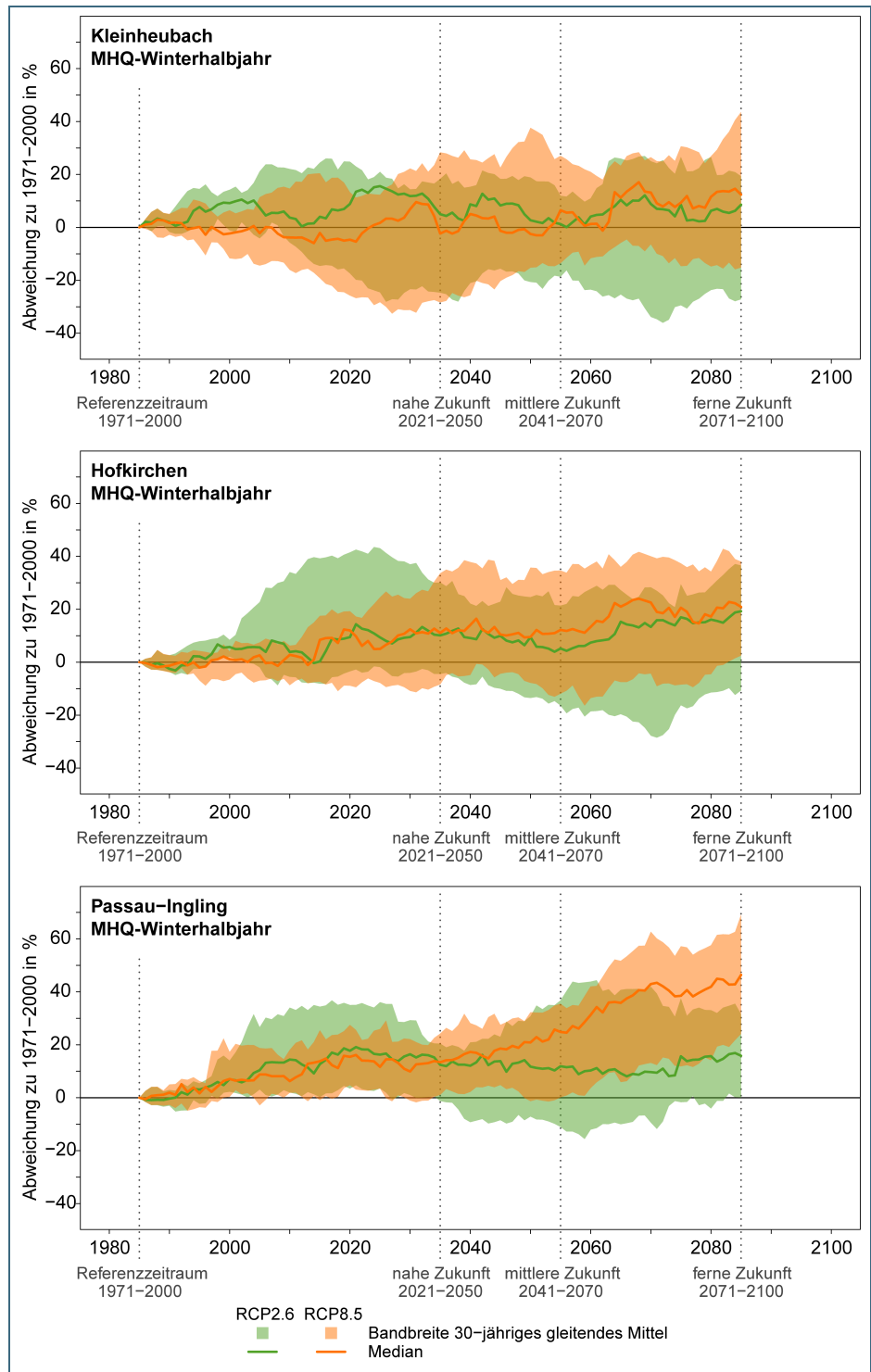


Abb. 56: Änderungssignal des saisonalen MHQ (Winterhalbjahr) für die Pegel Passau-Ingling (unten), Hofkirchen (Mitte) und Kleinheubach (oben). Dargestellt ist das 30-jährige gleitende Mittel des Abflusssignals bezogen auf den Referenzzeitraum 1971–2000 für die Abflussprojektionen.

Für die mittlere Zukunft zeigt nun auch die Bandbreite des Pegels Kleinheubach für RCP8.5 eine Zunahme. Sie reicht von -14 % bis +27 % während das RCP2.6 weiter ein indifferentes Signal (-19 % bis

+12 %) aufweist. Die Bandbreite für RCP8.5 ändert sich wenig gegenüber der nahen Zukunft am Pegel Hofkirchen und zeigt weiterhin gemäß der Interpretationshilfe eine Zunahme zwischen -12% bis +35 %. Die RCP2.6 Bandbreite am Pegel Hofkirchen (-16 % und +21 %) weist nun ein indifferentes Signal mit Zu- und Abnahmen auf. Beim Pegel Passau-Ingling zeigen sich für beide Szenarien Zunahmen mit -11 % bis +31 % (RCP2.6) bzw. rein positive, deutliche Zunahmen von 0% bis +35 % (RCP8.5).

In der fernen Zukunft sind stärkere Veränderungen beim Pegel Passau-Ingling bei RCP8.5 erkennbar. Hier steigt die Bandbreite auf rein positive, deutliche Zunahmen von +24 % bis +69 %. Zwar zeigt auch RCP2.6 Zunahmen, diese liegen aber mit -1 % bis +32 % deutlich unterhalb RCP8.5. Für die beiden nördlichen Pegel ist keine vergleichbare Differenzierung erkennbar, dennoch zeigen sich auch hier weiterhin Zunahmen: Für Hofkirchen -12 % bis +37 % (RCP2.6) und +3 % bis +38 % (RCP8.5) und für den Pegel Kleinheubach auf -27 % bis +19 % (RCP2.6) und -15 % bis +44 % (RCP8.5).

Bei der Betrachtung des Medians zeigt sich, dass der MHQ für alle drei Pegel für RCP8.5 fast durchgehend im positiven Bereich liegt. Meist liegen die Mediane der Szenarien nahe beieinander. Eine größere Diskrepanz erkennt man nur beim Pegel Passau-Ingling. Hier liegt der Median des Szenarios ohne Klimaschutz RCP8.5 mit >40 % weit oberhalb des RCP2.6 in der fernen Zukunft.

Wendet man die Interpretation der Bandbreiten auf alle Auswahlpegel an, ergibt sich das in Abb. 57 dargestellte Bild. Für Südbayern erkennt man bei fast allen Pegeln ein ähnliches Bild wie schon bei den Einzelauswertungen. Schon in der nahen Zukunft sind fast nur Zunahmen bzw. deutliche Zunahmen in beiden Szenarien dargestellt. Für die mittlere Zukunft zeigt sich ein ähnliches Bild, bei RCP2.6 sind diese allerdings gegenüber der nahen Zukunft etwas schwächer ausgeprägt. In der fernen Zukunft verstärken sich die Zunahmen für RCP2.6 wieder. Dies tritt ebenfalls bei RCP8.5 auf, die meisten Pegel weisen nun klare Zunahmen auf. Die mittlere Bandbreite ist dabei komplett im positiven Bereich. Die Unterschiede zwischen den beiden Szenarien sind nicht besonders deutlich, die größten Unterschiede treten in der fernen Zukunft mit deutlichen Zunahmen beim RCP8.5 auf.

Ein weniger eindeutiges Bild ist in Nordbayern zu beobachten. Für das RCP2.6 lassen sich in den verschiedenen Zukunftszeiträumen an einigen Pegeln auch abnehmende Bandbreiten beobachten, im Mittel ergibt sich ein indifferentes Signal. Die Unterschiede zwischen den Zeiträumen sind, abgesehen von lokalen Abnahmen, gering. Auch das RCP8.5 zeigt meist indifferente Signale. Die Anzahl der Pegel mit vereinzelt Zunahmen steigt dabei bis Ende des Jahrhunderts, besonders im Nordwesten.

In Tab. 9 sind die aus Minimum und Maximum ermittelten mittleren Bandbreite der Änderungssignale für Süd- und Nordbayern für die verschiedenen Szenarien und Betrachtungszeiträume aufgeführt. Die prozentualen Änderungssignale für die einzelnen Pegel für Maximum, Median und Minimum sind dem Anhang D zu entnehmen. Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass die Abflussprojektionen für die Südbayerischen Pegel klare Zunahmen zeigen. Diese sind beim RCP8.5 stärker ausgeprägt, jedoch zeigen sie sich auch bei RCP2.6. Für Nordbayern lässt sich für den MHQ des Winterhalbjahres kein klarer Trend erkennen.

Tab. 9: Mittlere Bandbreite der Änderungssignale für Süd- und Nordbayern: MHQ hydrologisches Winterhalbjahr

Mittlere Bandbreite in %	nahe Zukunft		mittlere Zukunft		ferne Zukunft	
	Süd-BY	Nord-BY	Süd-BY	Nord-BY	Süd-BY	Nord-BY
RCP2.6	-5 bis +32	-23 bis +21	-11 bis +32	-20 bis +15	-6 bis +39	-24 bis +25
RCP8.5	-7 bis +32	-27 bis +24	-7 bis +39	-19 bis +24	+10 bis +55	-19 bis +37

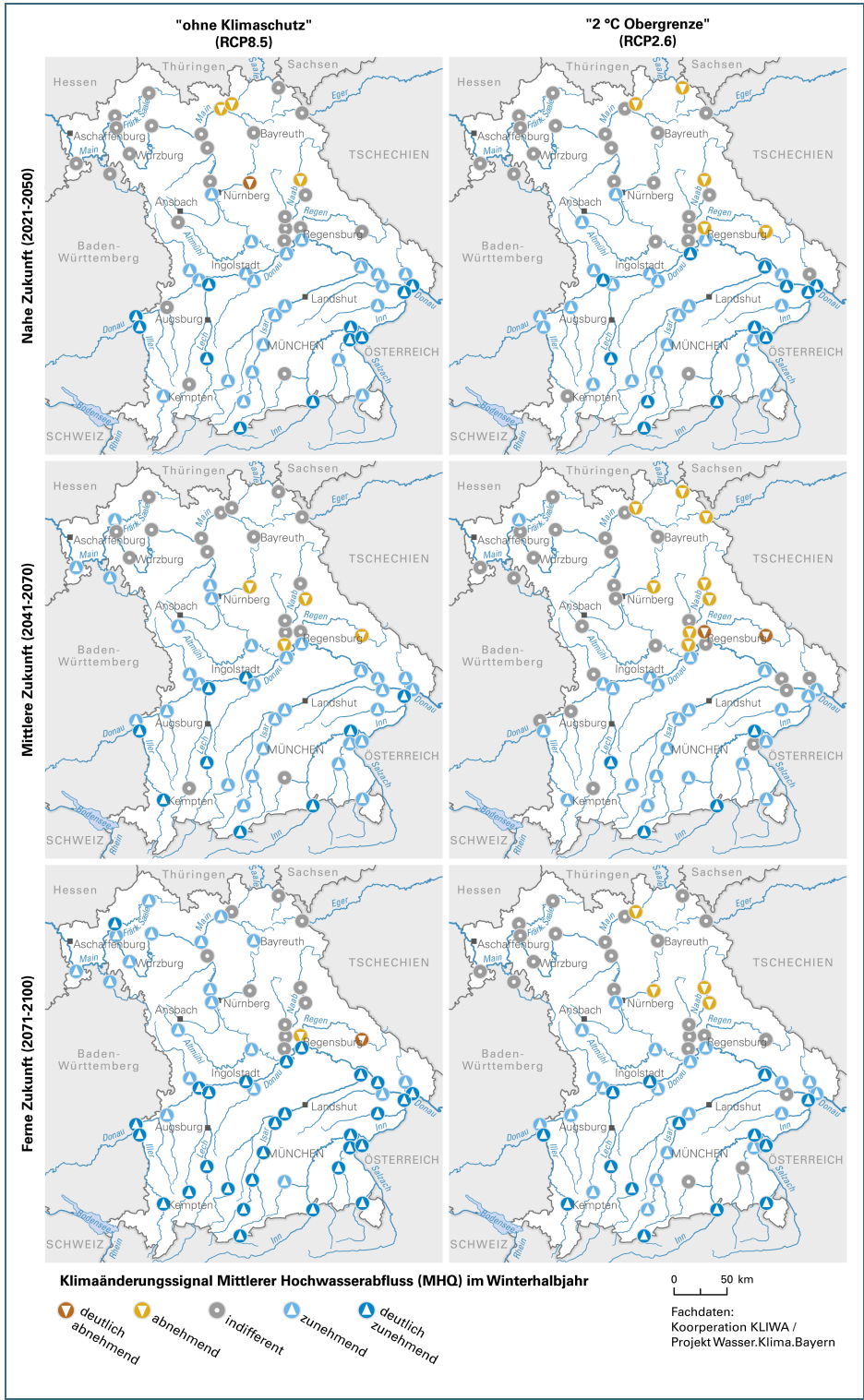


Abb. 57: Zu- und Abnahmen der Bandbreite der Klimaänderungssignale für den MHQ des Winterhalbjahres für alle 60 Auswertepegel.

Veränderung des Abflussregimes: monatlicher Hochwasserabfluss

In den nun folgenden Analysen werden die Ergebnisse der Abflussprojektionen für den monatlichen mittleren Hochwasserabfluss (MHQ(m)) vorgestellt. Die Methodik, die bereits für den MQ beschrieben wurde (Kapitel 2.6.3.3), wird hier angewandt, um die Veränderungen des MHQ(m) zu untersuchen. Dabei werden im Gegensatz zu den vorherigen Darstellungen für die Sommer- und Winterhalbjahre, die auf relativen Änderungssignalen basierten, die Absolutwerte des MHQ(m) für die drei definierten Zukunftszeiträume dargestellt. Diese Darstellung umfasst zudem die Bandbreite des Abflussprojektionsensembles und ermöglicht eine differenzierte Betrachtung der möglichen Abflussverhältnisse über

das Jahr hinweg. Ein wesentlicher Vorteil dieser Analyse ist, dass sie die Änderungen innerhalb des Jahres deutlich sichtbar macht. Zusätzlich wird der Kennwert für den Referenzzeitraum, der auf historischen Messdaten basiert, zur Verfügung gestellt. Diese umfassende Analyse trägt nicht nur zur Bewertung der aktuellen hydrologischen Bedingungen bei, sondern ermöglicht auch eine fundierte Einschätzung zukünftiger Wasserverfügbarkeiten und potenzieller Herausforderungen im Wasserhaushalt.

Der MHQ(m) für den Pegel Kleinheubach ist in Abb. 58 veranschaulicht. In den Winter- und Frühjahrsmonaten zeigt die Bandbreite für RCP8.5 in der nahen und mittleren Zukunft sowohl Werte über als auch unter den Referenzwerten. In der fernen Zukunft liegt die Bandbreite deutlicher über den Referenzwerten, wobei der Median von RCP8.5 ebenfalls signifikant darüber liegt, was in den vorangegangenen Zeiträumen eher nicht der Fall ist. Im Gegensatz dazu weist die Bandbreite von RCP2.6 in der fernen Zukunft immer noch eine ausgeglichene Verteilung auf, die sowohl über als auch unter den Referenzwerten liegt. Vielmehr ist für RCP2.6 vor allem in der nahen Zukunft eine Zunahme zu erkennen, die sich in den späteren Zeiträumen nicht so deutlich zeigt und vor allem in der mittleren Zukunft wieder deutlich geringer ausfällt.

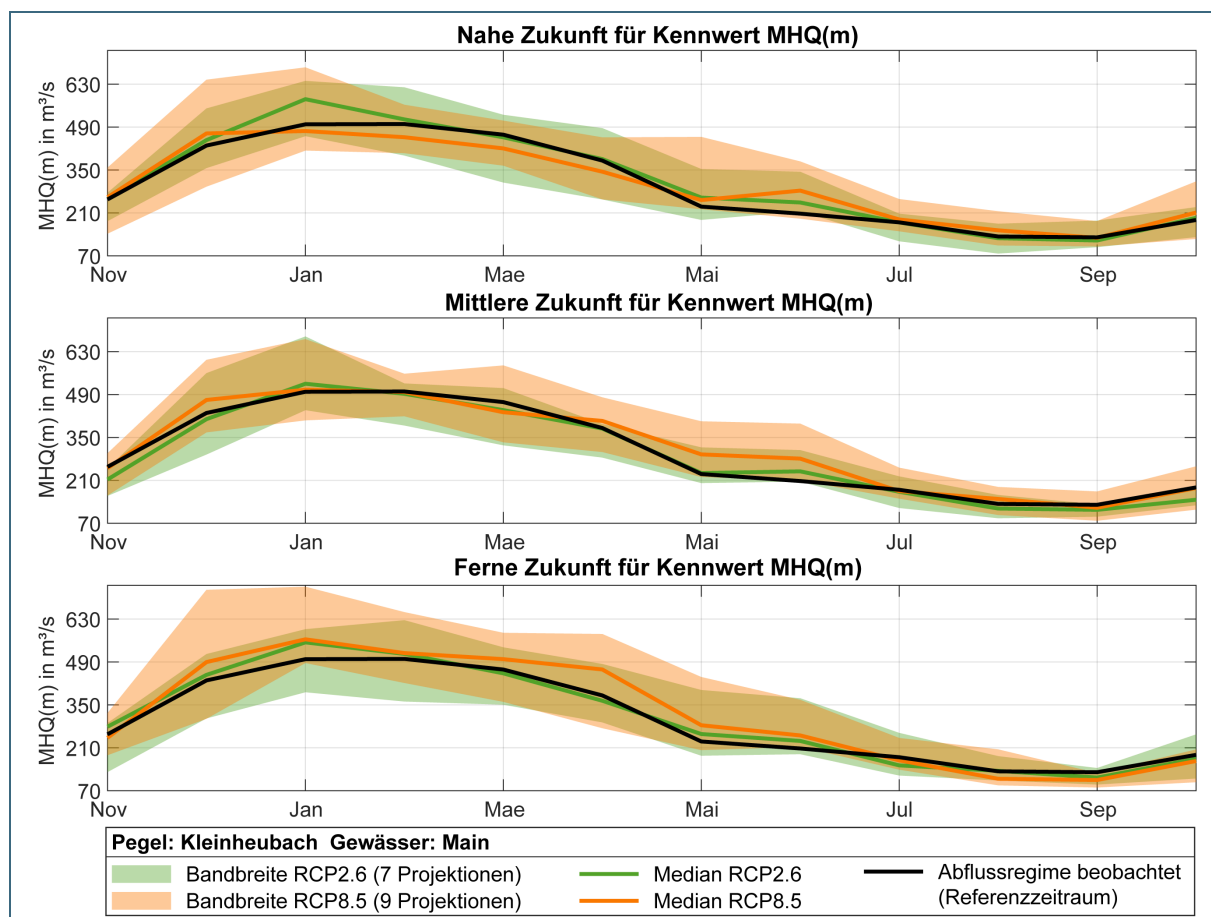


Abb. 58: Monatlicher mittlerer Hochwasserabfluss(MHQ(m)) für das Abflussprojektionsensemble des Pegels Kleinheubach für die drei Zukunftszeiträume nahe (2021–2050), mittlere (2041–2070) und ferne (2071–2100) Zukunft. Die schwarze Linie basiert auf den Beobachtungsdaten des Referenzzeitraums 1971–2000.

In den Sommermonaten, insbesondere ab Mai, überschreiten die Bandbreiten beider Szenarien deutlich die Referenzwerte. Hierbei ist die Bandbreite von RCP2.6 im Vergleich zu RCP8.5 schmaler. Auch die obere Begrenzung von RCP2.6 bleibt deutlich unter der von RCP8.5. Der Median von RCP8.5 liegt überwiegend klar über den Referenzwerten sowie über dem Median von RCP2.6. In den Herbstmonaten

hingegen sind nur geringe Veränderungen erkennbar. Zusammenfassend zeigt sich, dass die Hochwasserabflüsse vor allem in den Monaten zunehmen werden, die bereits die höchsten Hochwasserabflüsse im Maingebiet aufweisen.

Der MHQ(m) am Pegel Hofkirchen ist in Abb. 59 dargestellt. In allen Zeiträumen von der nahen bis zur fernen Zukunft liegen die Mediane beider Szenarien in den Winter-, Frühjahrs- und den ersten Sommermonaten überwiegend über den Referenzwerten. Sie übersteigen meist deutlich die Referenzwerte. Ab Juli bis in die Herbstmonate hingegen fallen die Mediane überwiegend darunter und zeigen somit abnehmende Hochwasserabflüsse in diesen Monaten. Die Bandbreiten der Szenarien zeigen in diesen Zeiträumen eine ähnliche Tendenz, wobei sie sowohl über als auch unter den Referenzwerten liegen. Die Bandbreite von RCP2.6 ist schmaler als die von RCP8.5. In den Winter-, Frühjahrs- und den ersten Sommermonaten erreichen die maximalen Werte von RCP8.5 häufig deutlich höhere Werte als die des RCP2.6. Ab Juli bis in die Herbstmonate hingegen liegen die Werte von RCP8.5 mehrheitlich unter den Referenzwerten. Besonders auffällig sind einige Monate in den Winter-, Frühjahrs- und Sommermonaten, in denen RCP8.5 außergewöhnlich hohe Werte anzeigt, verbunden mit einer hohen Variabilität der Bandbreite. Diese Spitzenwerte könnten auf spezifische klimatische Bedingungen oder Ereignisse hinweisen. Insgesamt zeigt sich bis auf die Spätsommer- bzw. Herbstmonate eine Zunahme des MHQ(m).

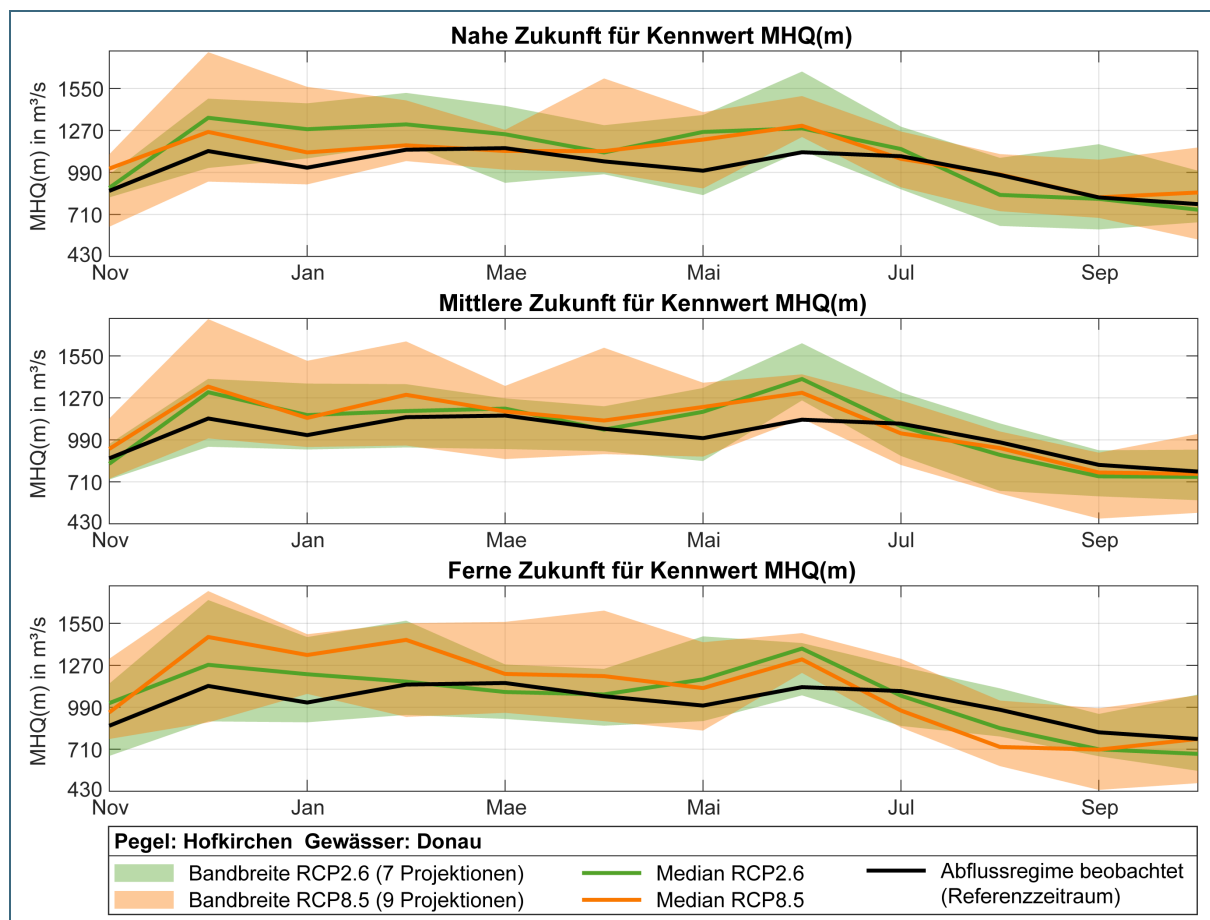


Abb. 59: Monatlicher mittlerer Hochwasserabfluss(MHQ(m)) für das Abflussprojektionsensemble des Pegels Hofkirchen für die drei Zukunftszeiträume nahe (2021–2050), mittlere (2041–2070) und ferne (2071–2100) Zukunft. Die schwarze Linie basiert auf den Beobachtungsdaten des Referenzzeitraums 1971–2000.

Der MHQ (m) am Pegel Passau-Ingling ist in Abb. 60 dargestellt. Die Bandbreiten der beiden Szenarien RCP8.5 und RCP2.6 liegen von den Herbst- bis zu den Frühjahrsmonaten deutlich über den Referenzwerten. Während in der nahen und mittleren Zukunft die Bandbreiten beider Szenarien noch vergleichbar sind, differenzieren sie sich in der fernen Zukunft erheblich. Hier zeigt die Bandbreite von

RCP8.5 überwiegt deutlich höhere Werte als die Referenzwerte, während RCP2.6-Szenario ein ähnliches Verhalten wie in der nahen Zukunft beibehält. In der nahen und mittleren Zukunft liegen die Mediane beider Szenarien zudem über den Referenzwerten und sind meist nahezu deckungsgleich. In der fernen Zukunft hingegen übersteigt der Median von RCP8.5 sowohl den Median von RCP2.6 als auch die Referenzwerte deutlich.

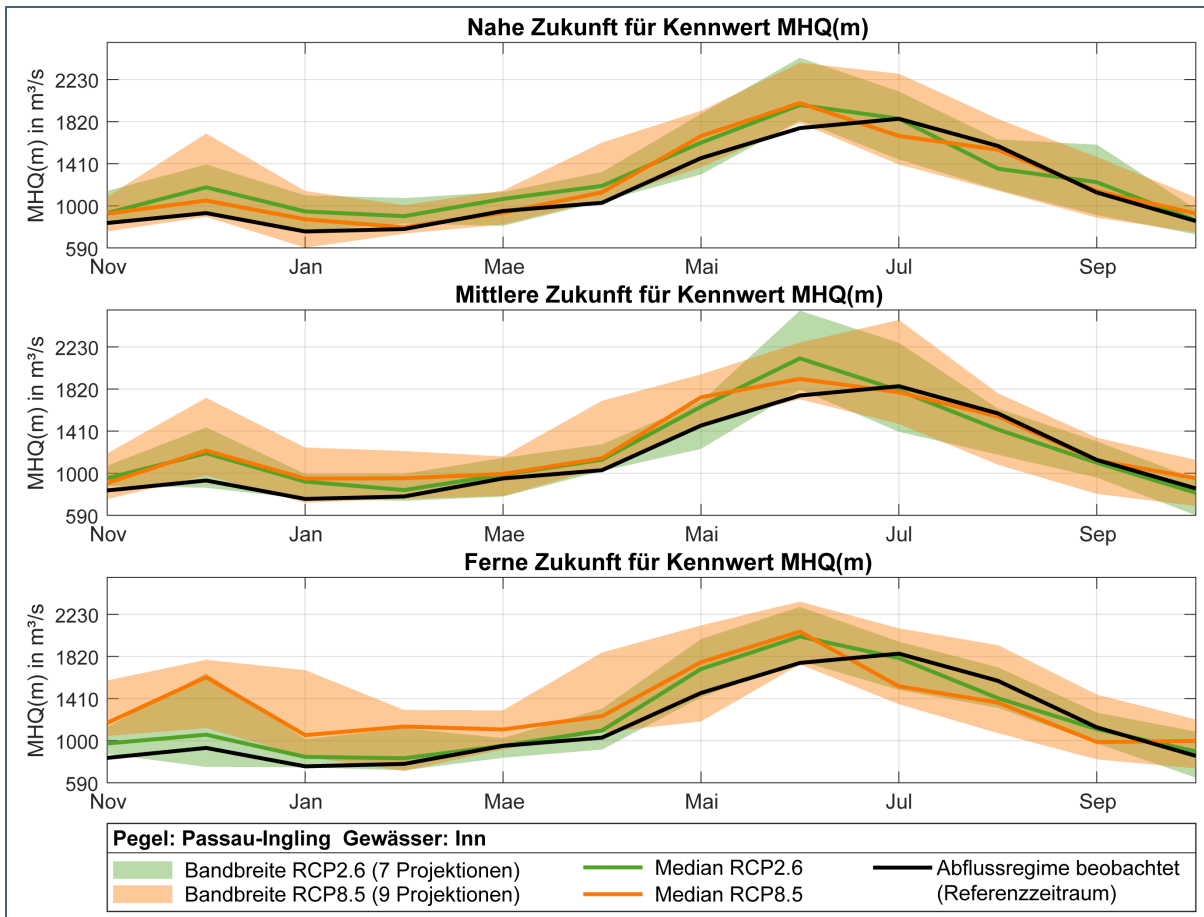


Abb. 60: Monatlicher mittlerer Hochwasserabfluss(MHQ(m)) für das Abflussprojektionsensemble des Pegels Passau-Ingling für die drei Zukunftszeiträume nahe (2021–2050), mittlere (2041–2070) und ferne (2071–2100) Zukunft. Die schwarze Linie basiert auf den Beobachtungsdaten des Referenzzeitraums 1971–2000.

In den Sommermonaten, insbesondere ab Juli, zeigen die Bandbreiten eine gleichmäßige Verteilung, die sowohl über als auch unter den Referenzwerten liegt. Auch die Mediane bewegen sich in der Nähe der Referenzwerte, mit der Ausnahme der fernen Zukunft, in der der Median von RCP8.5 deutlich unter den Referenzwerten liegt. Generell ist festzustellen, dass die Bandbreite von RCP2.6 deutlich schmäler ist als die von RCP8.5. Diese Unterschiede in den Szenarien könnten wichtige Hinweise auf zukünftige klimatische Entwicklungen und deren Auswirkungen auf die Region geben. Zusammenfassend ist mit erhöhten Hochwasserabflüssen zwischen Herbst und Frühjahr zu rechnen. In diesem Zeitraum sind aktuell die Hochwasserabflüsse niedriger als in den Sommermonaten. Besonders Anfang des Sommers kann allerdings auch eine weitere Zunahme bei bereits hohen Hochwasserabflüssen stattfinden.

4.6.3.2 Zukünftige Entwicklung von Hochwasserjährlichkeiten

Kernaussagen Hochwasserjährlichkeiten:

- Die Abflüsse der Hochwasserjährlichkeiten bis HQ_{50} werden tendenziell zunehmen.
- Auf Basis von Tageswerten und der verwendeten Methodik ist die Unsicherheit der Klimaänderungssignale allerdings groß bzw. nimmt mit der Jährlichkeit zu.

Für die Abschätzung der zukünftigen Entwicklung der Hochwassersituation sind die Jährlichkeiten ein wichtiger Kennwert. Die Änderungssignale werden im folgenden Kapitel anhand der drei Beispielpegel Kleinheubach, Hofkirchen und Passau-Ingling für die ferne Zukunft gezeigt (Abb. 61). Hier werden die Klimaänderungssignale von Hochwassern mit einer Jährlichkeit von 5 (HQ_5) und 50 (HQ_{50}) Jahren dargestellt.

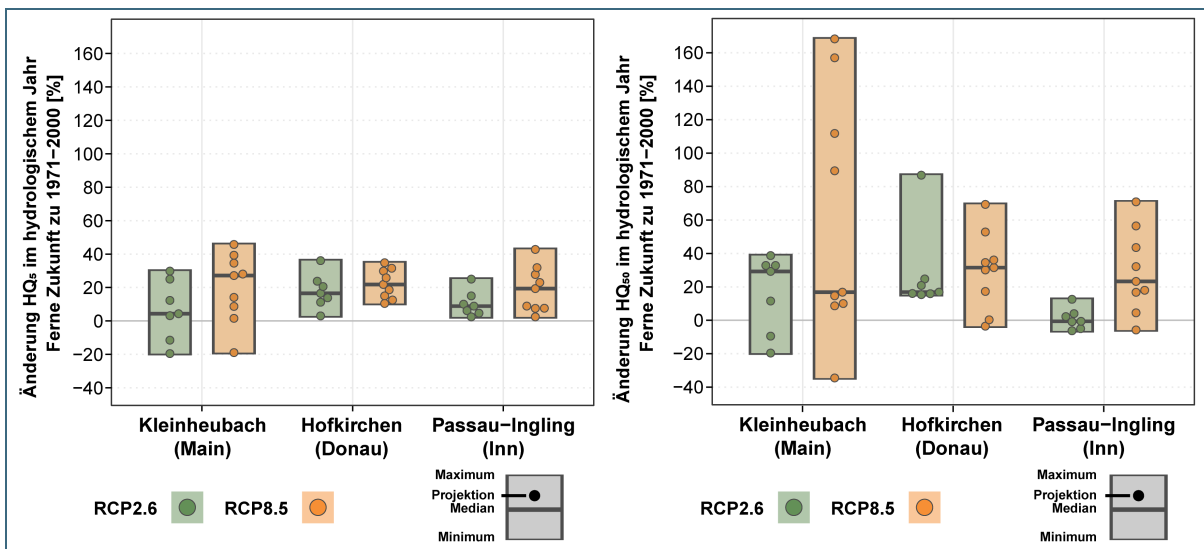


Abb. 61: Boxplotdarstellung der Änderung der Jährlichkeiten (HQ_5 und HQ_{50}) an den Pegeln Kleinheubach, Hofkirchen und Passau Ingling für die ferne Zukunft (2071–2100) zu 1971–2000.

Für die Jährlichkeit HQ_5 liegen die Mediane des Signals am pluvialen Pegel Kleinheubach am Main für beide Szenarien im positiven Bereich, jedoch ist mit etwa +30 % der Median von RCP8.5 deutlich höher als von RCP2.6. Insgesamt gesehen erstreckt sich die Bandbreite sowohl über den positiven sowie den negativen Bereich und fällt generell im Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) etwas größer aus. Am nivo-pluvialen Pegel Hofkirchen dagegen befinden sich beide Spannweiten im positiven Bereich und fallen deutlich geringer aus. Die Mediane liegen beide bei etwa +20 %. Insgesamt ist hier nur ein geringer Unterschied zwischen den Szenarien feststellbar. Auch am nivalen Pegel Passau-Ingling ergibt sich ein ähnliches Muster. Die Bandbreiten liegen beide oberhalb der Nulllinie und der Median fällt bei RCP8.5 etwas höher als bei RCP2.6 aus. Dies kann darauf hinweisen, dass in Zukunft die geringen Jährlichkeiten an den nivalen und nivo-pluvialen Pegeln zunehmen könnten.

Bei der Betrachtung des HQ_{50} fallen, vor allem die im Vergleich zu HQ_5 , stark vergrößerte Ensemble-Bandbreiten auf. So ist am Pegel Kleinheubach bei RCP8.5 eine große Bandbreite erkennbar, die bis etwa +160 % reicht und damit eine hohe Unsicherheit ausdrückt. Dies ist durch die Verteilung der 9 Abflussprojektionen, erkennbar an den Punkten, bedingt. Im Gegensatz dazu zeigt sich bei RCP2.6 nur eine Zunahme des Maximalwertes um etwa 40 %. Betrachtet man jedoch die Mediane, so fällt dieser bei RCP8.5 geringer aus. Dagegen sind am Pegel Hofkirchen geringere, aber auch gleichförmigere Veränderungen festzustellen. Auch hier fallen die Bandbreiten in beiden Szenarien größer als bei HQ_5 aus und bewegen sich zwischen etwa zwischen 0 und +90 %. Besonders eklatant ist dies bei

RCP2.6, bei der die Abflussprojektion mit dem größten Änderungssignal einen Großteil der Bandbreite bedingt. Alle anderen acht Abflussprojektionen liegen nahe beieinander. Die Mediane dagegen lassen nur eine geringe Änderung im Vergleich zu HQ₅ erkennen und liegen um die +20 bis +30 %. Ein gemischtes Bild zeigt sich am Pegel Passau-Ingling. Hier ist bei RCP2.6 kaum eine Änderung bei der Größe der Bandbreite erkennbar. Hingegen zeigt sich bei RCP8.5 eine deutliche Zunahme, mit einem Maximalwert von etwa +70 %.

Betrachtet man die Mediane, so stellt man fest, dass sie im Vergleich zu HQ₅ etwas weiter auseinander liegen. Insgesamt ist zu bemerken, dass die Variabilität bei HQ₅₀ im Vergleich zu HQ₅ sehr groß ist, sich die Tendenzen der Entwicklung jedoch ähnlich verhalten.

In Abb. 62 und Abb. 64 sind jeweils die maximalen Änderungssignale für die beiden Jährlichkeiten dargestellt. Die maximalen Signale ändern sich für die verschiedenen Zeiträume wenig. Auch ist ein Unterschied zwischen den beiden Szenarien nicht eindeutig erkennbar.

Bei den minimalen Signalen (Abb. 63 und Abb. 65) zeigt sich zwar ein ähnliches Bild, dass sich die Änderungssignale über die Zeit wenig ändern, jedoch ist auffallend, dass sich hier die Signale abgesehen von lokalen Ausnahmen hauptsächlich zwischen +/-15 % bewegen. In Nordbayern erkennt man auch größere Abnahmen, welche aber im Vergleich zu den maximalen Signalen eher gering ausfallen. Die Medianwerte finden sich in Anhang F.

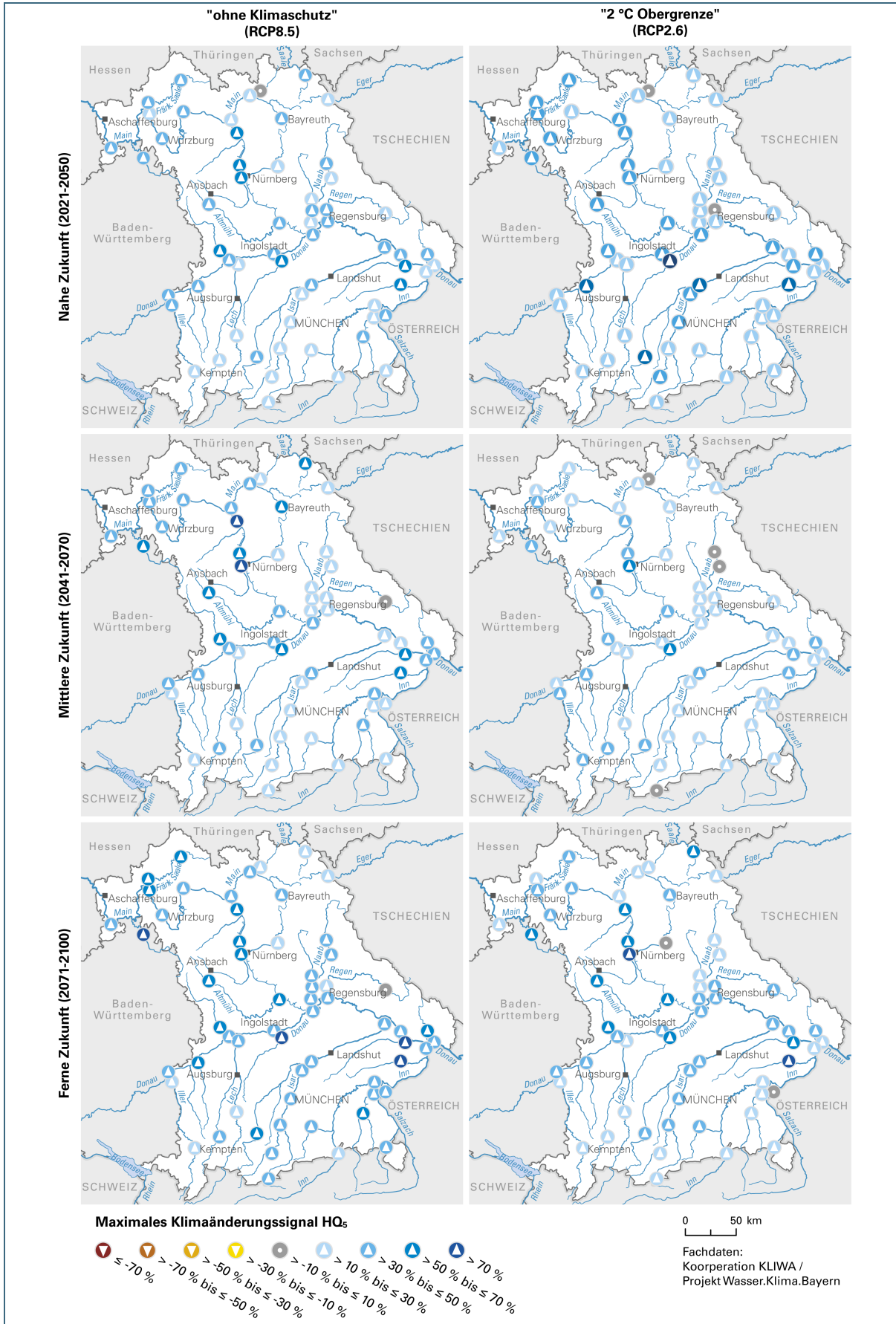


Abb. 62: Maximale Änderungssignale des HQ₅ für die Auswertepegel.

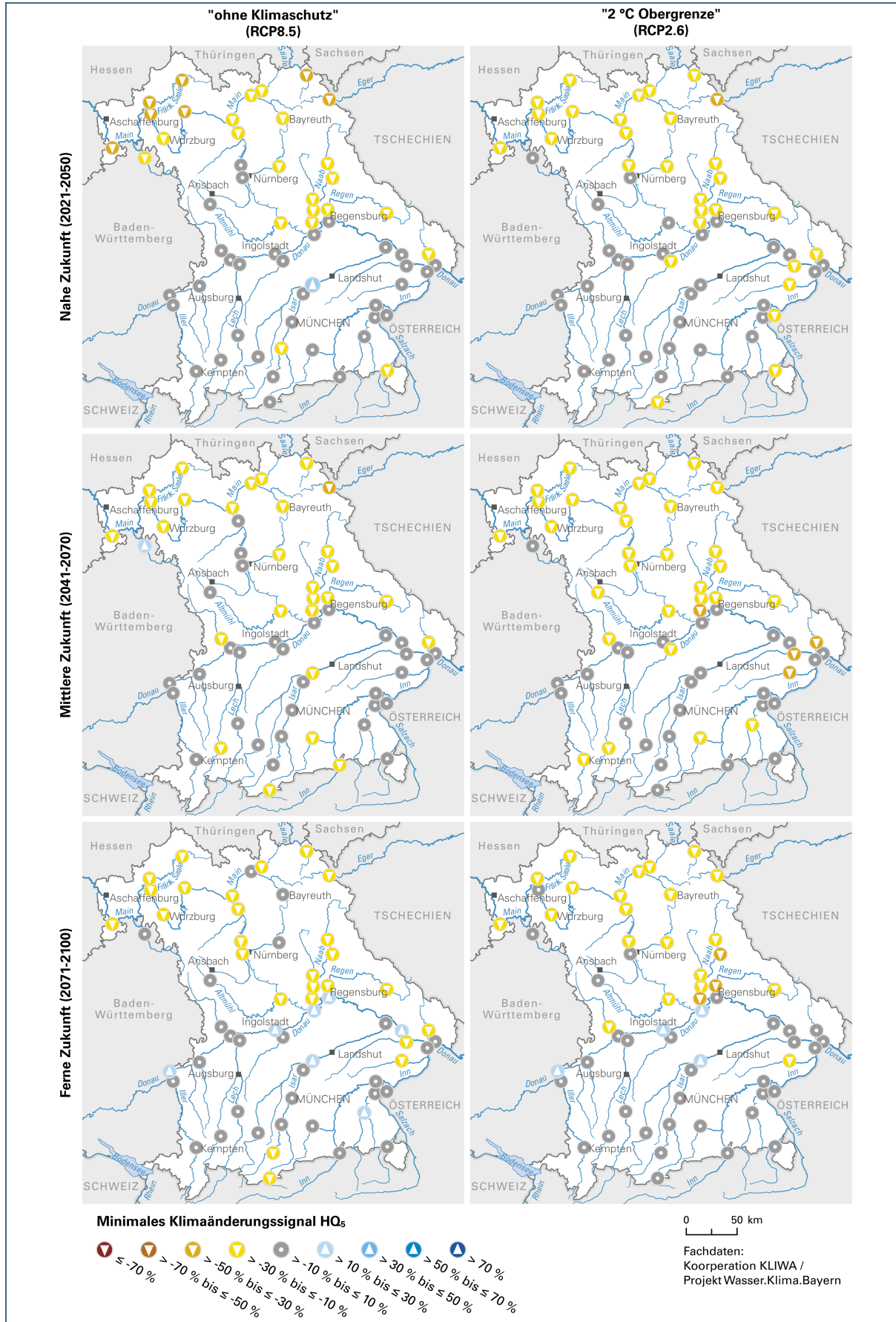


Abb. 63: Minimale Änderungssignale des HQ₅ für die Auswertepiegel.

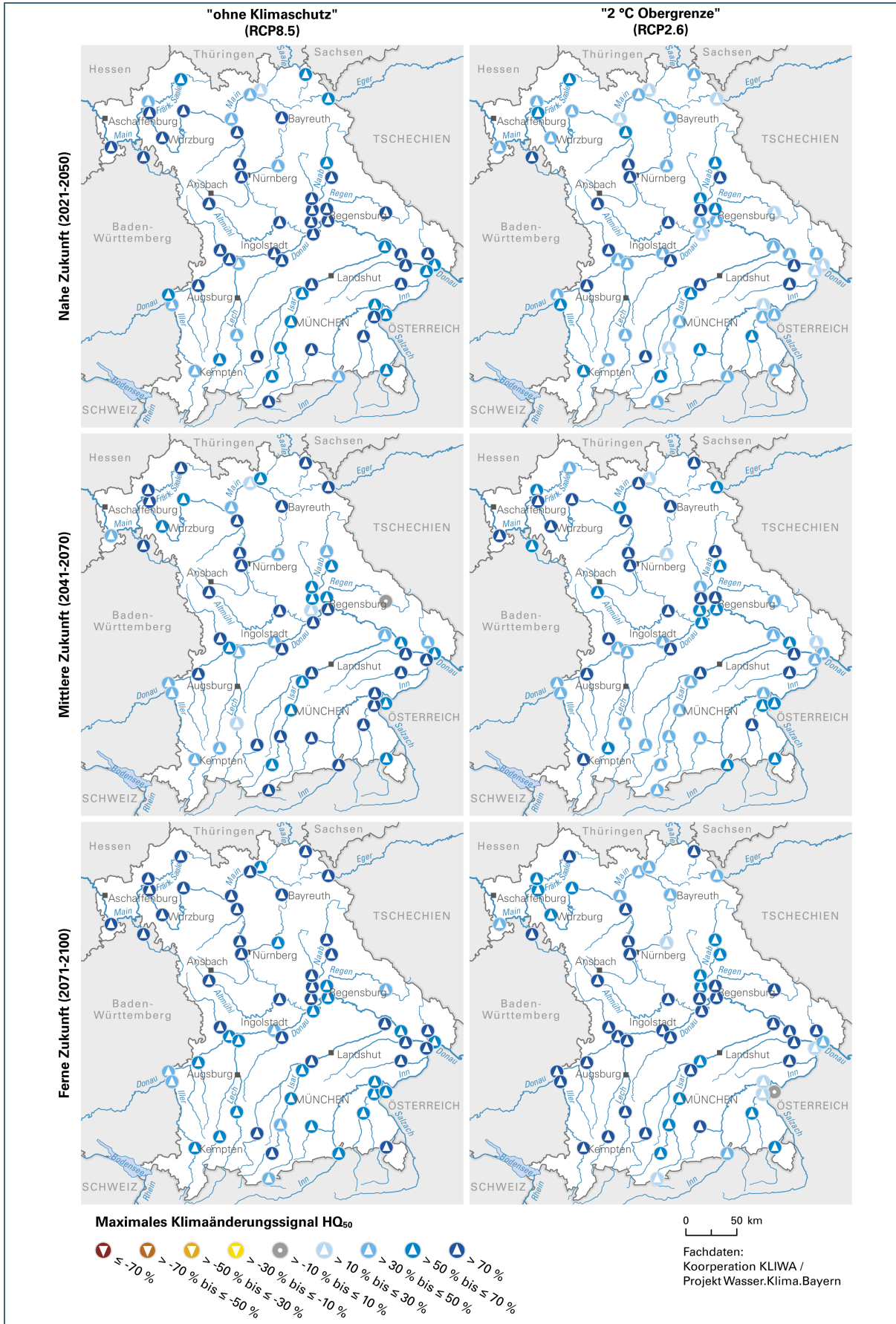


Abb. 64: Maximale Änderungssignale des HQ₅₀ für die Auswertepiegel.

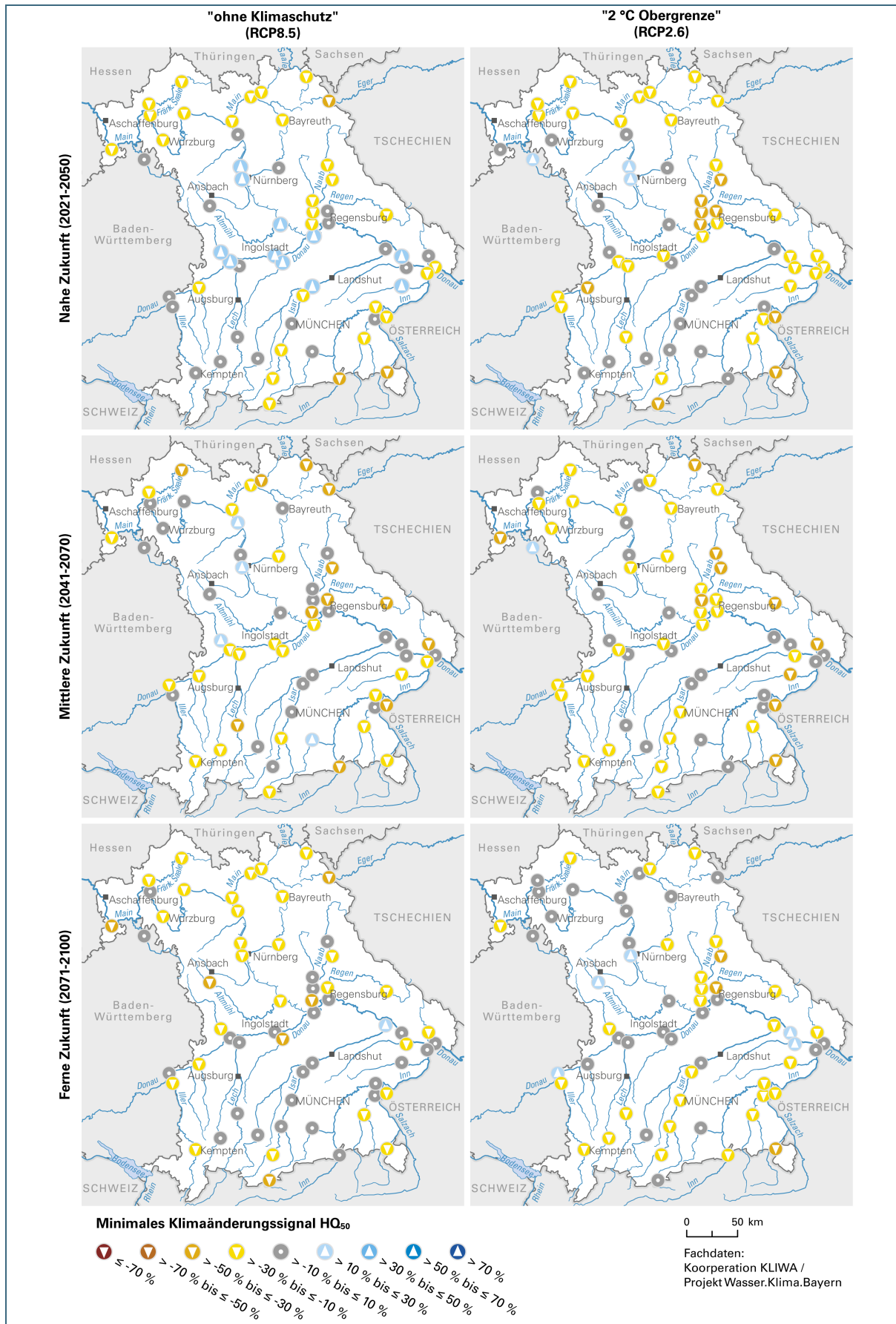


Abb. 65: Minimale Änderungssignale des HQ₅₀ für die Auswertepiegel.

4.6.3.3 Fallbeispiel: Sylvensteinspeicher

Die bisherigen Auswertungen basieren auf Standardkennwerten und deren projizierter Entwicklung im Zuge des Klimawandels. Ergänzend können die Abflussprojektionen auch genutzt werden, um Aussagen für praktische wasserwirtschaftliche Aufgaben wie den Hochwasserschutz zu erarbeiten.

Eine beispielhafte Anwendung wird bei dem im Einzugsgebiet der Isar liegenden Sylvensteinspeicher vorgestellt. Der Sylvensteinspeicher (Abb. 66) dient sowohl der Niedrigwasseraufhöhung der Isar als auch dem Hochwasserschutz bis München. Mit seinem Hochwasserrückhalteraum hält er im Hochwasserfall einen Teil der Hochwasserwelle zurück, sodass die Abflussspitze unterhalb des Speichers weitestgehend schadlos abgeführt werden kann. Im Folgenden wird dargestellt, wie sich entsprechend den Abflussprojektionsergebnissen die Anzahl von Hochwasserereignissen ändern könnte.



Abb. 66:
Der Sylvensteinspeicher im südöstlichen Bayern.

Grundlage für die vorliegende Analyse sind die täglichen Zuflüsse in den Sylvensteinspeicher. Die Anwendung des Abflussprojektionsensembles wird anhand der mittleren Anzahl an Hochwasserereignissen pro Jahr dargestellt. Um die Projektionsanalyse auf eher selten auftretende Hochwasserereignisse zu beschränken, dient das 99. Perzentil des Sylvensteinzuflusses aus der Referenzperiode 1971 bis 2000 als Grenzwert, ab wann es sich um ein Hochwasser handelt. In Abb. 67 sieht man deutlich, dass die Anzahl an Hochwasserereignissen zunehmen wird. Ab der mittleren Zukunft wird dies unter Verwendung des RCP8.5-Szenarios im Vergleich zum RCP2.6-Szenario größer ausfallen.

Eine Zunahme von Hochwasserereignissen ist für die Hochwasserschutzfunktion des Sylvensteinspeichers nicht zwangsweise problematisch. Nur wenn die Abflussfülle einzelner Ereignisse die Kapazität des Hochwasserschutzraums des Speichers übersteigen würde, hätte dies entsprechende Folgen für die Unterlieger. Eine Abschätzung, ob die durchschnittliche maximale Abflussfülle in Zukunft zunehmen wird, wäre demnach eine weitere Möglichkeit, die Auswirkung des Klimawandels auf die Funktionalität des Sylvensteinspeichers zu untersuchen.

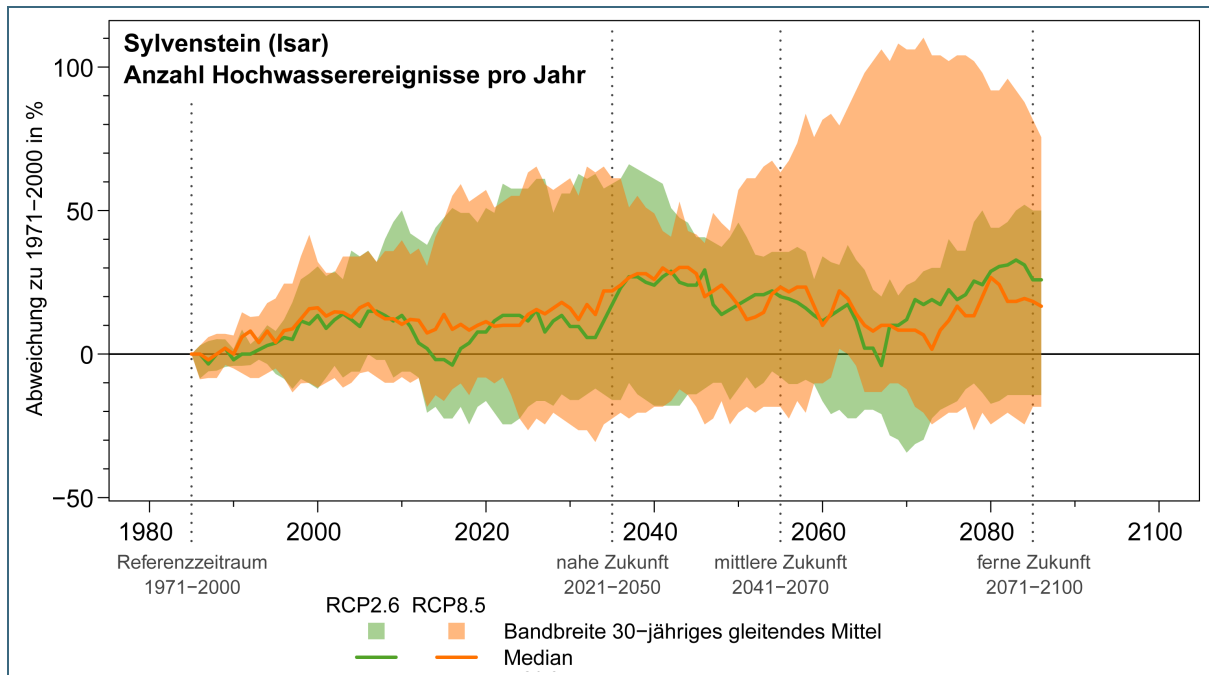


Abb. 67: Projizierte minimale, maximale und mittlere (Median) Änderungssignale für extreme Hochwasserereignisse/Jahr (Grenzwert: $Q > 99$. Perzentil). Dargestellt für die Szenarien RCP2.6 und RCP8.5. Aus dem modellierten (natürlichen) Zufluss zum Sylvensteinspeicher ergibt sich ein Referenzwert von 1,8 Ereignissen/Jahr.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

Der Klimawandel wird auf alle Bereiche unserer Gesellschaft Auswirkungen haben. Klimamodelle können dazu beitragen, die Auswirkungen auf einzelne Bereiche abzuschätzen, um nach dem Vorsorgeprinzip Anpassungsmaßnahmen zu etablieren. Das vorliegende UmweltSpezial gibt einen Überblick über die Auswirkungen des Klimawandels auf den Abfluss in den bayerischen Flüssen. Dabei wurden zwei Klimaszenarien des IPCC näher betrachtet und miteinander verglichen. Das UmweltSpezial präsentiert Abflussprojektionen bis zum Jahr 2100 für bayerische Flusseinzugsgebiete, um die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt zu untersuchen. Ziel ist es, regionale wasserwirtschaftliche Probleme zu identifizieren und Grundlagen für Anpassungsstrategien zu erarbeiten. Die Methodik zur Erstellung dieser Abflussprojektionen basiert auf einem hydrologischen Modell und verschiedenen Klimamodellen, welche verschiedene Emissionsszenarien berücksichtigen.

Aufbauend auf diesen Emissionsszenarien wird eine Modellkette genutzt. Diese baut auf globalen Klimamodellen auf, die das zukünftige Klima simulieren und hochaufgelöste Zeitreihen für meteorologische Variablen liefern. Für regionale Analysen z. B. für Europa, Deutschland und Bayern kommen regionale Klimamodelle (RCM) zum Einsatz, die den Vorteil einer höheren räumlichen Auflösung bieten. Um systematische Fehler in den Klimaprojektionen zu korrigieren, wird eine Bias-Adjustierung durchgeführt, die auf einem Referenzdatensatz basiert. Um Unsicherheiten in den Klimamodellen, die u. a. aus vereinfachten physikalischen Abbildungen und unzureichender Modellauflösung resultieren, zu adressieren, wird ein Ensemble von Klimaprojektionen verwendet, das die Bandbreite möglicher zukünftiger Klimaszenarien darstellt. Hierfür wird das Bayern-Ensemble verwendet; ein bayerisches Klimaprojektionsensemble bestehend aus einer Auswahl regionaler Klimaprojektionen, die durch ein Audit auf ihre Qualität geprüft wurden. Es umfasst neun Kombinationen von Klimaprojektionen für das RCP8.5-Szenario und neun Modelle für das RCP2.6-Szenario. Die RCP-Szenarien (Representative Concentration Pathways) beschreiben verschiedene mögliche Entwicklungen der Treibhausgaskonzentrationen und deren Auswirkungen auf das Klima. Für die Erstellung so genannter Abflussprojektionen werden zwei Szenarien verwendet: RCP2.6, das ein positives Klimaschutzszenario darstellt („2 °C Obergrenze“), und RCP8.5, das ein Szenario ohne Klimaschutz beschreibt. Diese Szenarien ermöglichen eine umfassende Analyse der potenziellen Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt in Bayern.

Für die Modellierung des zukünftigen Abflusses wird das Wasserhaushaltsmodell WaSiM verwendet, das die regionalen Klimadaten als Antrieb nutzt. Die daraus resultierenden modellierten Abflüsse bezeichnet man als Abflussprojektionen. Das Wasserhaushaltsmodell bildet den Wasserkreislauf sowohl über als auch unter der Erdoberfläche ab. Das Modell wird im Rahmen der Kooperation KLIWA und des Projekts „Wasser.Klima.Bayern“ (WKB) eingesetzt, um die bayerische Wasserwirtschaft bei klimawandelbedingten Herausforderungen zu unterstützen.

Zur quantitativen Beschreibung der Abflussprojektionen werden gewässerkundliche Kennwerte verwendet, darunter mittlerer Abfluss, Niedrigwasserabfluss, mittlerer Niedrigwasserabfluss, Hochwasserabfluss und mittlerer Hochwasserabfluss. So genannte Jährlichkeiten wie HQ₅₀ oder NQ₅₀ geben an, wie häufig bestimmte Abflusswerte statistisch erreicht werden. Die Ergebnisse werden in Bezug auf einen Referenzzeitraum (1971–2000) und dreier Zukunftszeiträume nahe, mittlere und ferne Zukunft (2021–2050, 2041–2070, 2071–2100) ausgewertet, wobei sowohl Trends, gleitende Mittel und Regimeänderungen betrachtet werden, als auch die Bandbreite resultierend aus der Verwendung der Klimaprojektionsensembles berücksichtigt wird.

Die wesentlichen Kernaussagen zur vergangenen und künftigen Entwicklung der Wasserbilanz und anderen hydrologischen Kennwerten in Bayern lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Auswertung beobachteter Abflussdaten zeigt, dass der mittlere Abfluss im Sommerhalbjahr seit 1951 größtenteils abgenommen hat, während er im Winterhalbjahr eher zugenommen hat. Die jährlichen Niedrigstabflüsse haben im Sommerhalbjahr signifikant abgenommen, während im Winterhalbjahr viele Pegel eine Zunahme oder keine Veränderung zeigen. Die jährlichen Höchstabflüsse haben in beiden Halbjahren zugenommen, jedoch sind diese Trends häufig nicht signifikant. Es ist zu beachten, dass diese Veränderungen teilweise durch wasserwirtschaftliche Maßnahmen beeinflusst sind und nicht ausschließlich auf den Klimawandel zurückzuführen sind.
- Die Wasserbilanz zeigt, dass die Verdunstung bis zum Ende des Jahrhunderts kontinuierlich zunehmen wird. Die Abflussprojektionen für den Basisabfluss weisen keinen eindeutigen Trend auf, jedoch ist eine Tendenz zur Abnahme beim Szenario „ohne Klimaschutz“ erkennbar. Zudem nimmt die Speicherung des Niederschlags in Form einer Schneedecke ab, was zu mehr direktem Abfluss in den Wintermonaten führt. In den Sommermonaten steigen die Höchstabflüsse des schnellen Abflusses.
- Bezüglich der Abflussregime in Bayern wird der nivale Anteil bis zum Ende des Jahrhunderts stark abnehmen. Vormalig nivo-pluviale Regime, insbesondere in der Donauregion, entwickeln sich zunehmend zu pluvialen Regimen. Änderungen der Regimetypen sind unter dem Szenario RCP8.5 „ohne Klimaschutz“ häufiger als unter RCP2.6 „mit Klimaschutz“.
- Für die Änderungssignale des Abflusses bis 2100 wird erwartet, dass der mittlere Abfluss im Sommerhalbjahr in Südbayern abnimmt, während in Nordbayern kein klarer Trend erkennbar ist. Im Winterhalbjahr wird eine Zunahme des mittleren Abflusses in Südbayern prognostiziert, während Nordbayern ebenfalls keinen klaren Trend zeigt.
- Der mittlere Niedrigstabfluss wird im Sommerhalbjahr für Gesamtbayern voraussichtlich abnehmen, während er im Winterhalbjahr in Südbayern eher zunehmen und in Nordbayern abnehmen könnte. Die Niedrigwasserjährlichkeiten zeigen große Bandbreiten, wobei lokal Abnahmen von über 45 % möglich sind.
- Der mittlere Hochwasserabfluss wird im Sommerhalbjahr in ganz Bayern voraussichtlich zunehmen, unabhängig vom betrachteten Szenario. Im Winterhalbjahr wird auch hier eine Zunahme in Südbayern erwartet, während in Nordbayern kein klarer Trend erkennbar ist. Die Hochwasserjährlichkeiten bis HQ_{50} zeigen eine Tendenz zur Zunahme, jedoch ist die Unsicherheit der Klimaänderungssignale groß und nimmt mit der Jährlichkeit zu.

Ausblick

Die Ergebnisse der durchgeführten Analysen zeigen, dass der Klimawandel einen wesentlichen Einfluss auf das Abflussverhalten bayerischer Flüsse haben wird. Bandbreiten und Unsicherheiten sind zwar vorhanden, jedoch ist in den meisten Fällen eine Tendenz zu erkennen. Zudem spiegeln die Ergebnisse den aktuellen Wissensstand zu der Abschätzung der zukünftigen Veränderungen auf Basis eines Klimaensembles wider. Ein Ziel war es, zu untersuchen, ob sich der Klimawandel auf den Abfluss zeitlich und regional unterschiedlich stark auswirkt und ob Schwerpunkte in Bayern identifiziert werden können. Mit den zwei betrachteten Szenarien wird klar, dass der Abfluss sich abhängig von den weiteren globalen Klimaschutzbemühungen verändern wird. Die Ergebnisse zeigen zudem, dass die negativen Auswirkungen ganz Bayern betreffen werden, auch wenn diese im regionalen Vergleich unterschiedlich stark ausgeprägt sein können. Für bestimmte Kennwerte wie für den Hochwasserab-

fluss kann zusätzlich festgestellt werden, dass klimabedingte Auswirkungen für beide Szenarien ähnlich stark ausfallen können. Das bedeutet, dass Anpassungsmaßnahmen unabhängig vom Erfolg der Klimaschutzbemühungen ergriffen werden müssen.

In Anbetracht der Herausforderungen, die der Klimawandel mit sich bringt, ist die Verwendung eines Modellsystems zur Projektion zukünftiger Abflüsse von entscheidender Bedeutung. Solche Systeme bieten eine Vielzahl von Vorteilen, die sowohl für die Wasserwirtschaft als auch für die ökologische Nachhaltigkeit von großer Relevanz sind. Dies sind beispielsweise:

- Mit Hilfe des Modells können potenzielle Verschärfungen von Niedrigwasser-/Hochwassersituationen identifiziert werden. Dies erlaubt es den zuständigen Behörden, rechtzeitig Maßnahmen zu ergreifen, um negative Auswirkungen auf die Wasserverfügbarkeit und die Umwelt zu minimieren.
- Durch die Simulation zukünftiger Abflüsse unterstützt ein solches Modellsystem die Planung und Optimierung von Bewässerungsstrategien. Durch die Sicherstellung eines Mindestabflusses können landwirtschaftliche Erträge gesichert und ökologische Gleichgewichte gewahrt werden.
- Ein Modellsystem ermöglicht es, verschiedene Managementszenarien durchzuspielen. Entscheidungsträger können so die Auswirkungen unterschiedlicher Maßnahmen analysieren und fundierte Entscheidungen treffen, die auf wissenschaftlichen Erkenntnissen basieren.
- Durch die Verwendung von Modellen zur Projektion zukünftiger Abflüsse können Wasserressourcen nachhaltiger geplant und verwaltet werden. Dies ist entscheidend für die langfristige Sicherstellung der Wasserverfügbarkeit in Zeiten des Klimawandels.
- Die Ergebnisse des Modellsystems liefern wertvolle Daten und Erkenntnisse, die als Grundlage für politische Entscheidungen und Strategien im Bereich Wasserwirtschaft und Klimaschutz dienen können.

Um die Veränderungen des Abflussgeschehens und die daraus resultierenden Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und für die Wasserwirtschaft zu untersuchen, wird seit 1999 im Rahmen der Kooperation KLIWA „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ am Bayerischen Landesamt für Umwelt für alle Einzugsgebiete der bayerischen Flusssysteme, auch unter Berücksichtigung der außerhalb Bayerns liegenden Anteile (hydrologisches Bayern) Wasserhaushaltsmodellierungen mit Klimaprojektionen durchgeführt. Hierfür wurden die damals noch aktuellen SRES-Szenarien, welche die Grundlagen für die Sachstandsberichte des IPCC von 2001 und 2007 bildeten, verwendet. Der Nachteil der SRES-Szenarien bestand darin, dass die zugrundeliegenden sozioökonomischen Annahmen nur schwer oder überhaupt nicht vorhersagbar sind.

Die vorliegenden Auswertungen zeigen die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt in Bayern mit den aktuellen RCP-Szenarien. Daher ist es sinnvoll, die Methodik zur Erstellung zukünftiger Abflussprojektionen weiterzuentwickeln. Ein vielversprechender Ansatz wäre die Integration der aktuellen Shared Socioeconomic Pathways (SSP)-Szenarien des aktuellen IPCC-Berichts (IPCC, 2023). Diese Szenarien bieten eine differenzierte Betrachtung möglicher sozioökonomischer Entwicklungen und deren Einfluss auf die Treibhausgasemissionen, was eine präzisere Modellierung der zukünftigen klimatischen Bedingungen ermöglicht.

Die SSP-Szenarien erlauben es, die Wechselwirkungen zwischen Klimawandel und gesellschaftlichen Entwicklungen besser zu verstehen und zu quantifizieren. Durch die Anwendung dieser Szenarien in Kombination mit dem bewährten Wasserhaushaltsmodell WaSiM oder eines neu aufgesetzten Modellsystems könnten fundiertere Abflussprojektionen erstellt werden, die nicht nur die klimatischen Veränderungen, sondern auch die potenziellen Anpassungsstrategien der Gesellschaft berücksichtigen. Dies würde die Grundlage für eine zukunftsorientierte Wasserwirtschaft in Bayern stärken und die

Identifikation regionaler wasserwirtschaftlicher Herausforderungen weiter verbessern. Ein solcher Ansatz könnte entscheidend dazu beitragen, die Resilienz der bayerischen Flusssysteme gegenüber den Herausforderungen des Klimawandels zu erhöhen. Aktuell stehen allerdings noch keine regionalisierten Klimaprojektionen für Europa zur Verfügung.

6 Literaturverzeichnis

- Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2020): Das Bayerische Klimaprojektionsensemble; Audit und Ensemblebildung. 55 S.; Augsburg.
Verfügbar unter https://www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu_klima_00169.htm
- Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2021): Klima-Faktenblätter. Infoblätter für Bayern und die 7 Klimaregionen, Augsburg.
Verfügbar unter https://www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu_klima_00171.htm
- Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2022a): Bayerns Klima im Wandel - Heute und in der Zukunft. Broschüren für Bayern und die 7 Klimaregionen, Augsburg.
Verfügbar unter https://www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu_klima_00173.htm
- Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2022b): Beobachtungsdaten, Klimaprojektionsensemble und Klimakennwerte für Bayern. 12 S., Augsburg.
Verfügbar unter https://www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu_klima_00170.htm
- Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2023): Wasserkreislauf und -bilanzen.
Von https://www.lfu.bayern.de/wasser/wasser_kreislauf_bilanzen abgerufen
- Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2024): Wege in die Klimazukunft - Szenarien und Optionen. 16 S., Augsburg.
Verfügbar unter https://www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu_klima_00216.htm
- Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz [Hrsg.] (2018): Wasser für Franken - Die Überleitung Donau-Main. 120 S., München.
Verfügbar unter https://www.bestellen.bayern.de/shoplink/stmuv_wasser_013.htm
- Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz [Hrsg.] (2021): Klima-Report Bayern 2021 - Klimawandel, Auswirkungen, Anpassungs- und Forschungsaktivitäten. 196 S., München.
Verfügbar unter https://www.bestellen.bayern.de/shoplink/stmuv_klima_012.htm
- Brasseur, G., Jacob, D., & Schuck-Zöller, S. [Hrsg.] (2016): Klimawandel in Deutschland, Springer Berlin-Heidelberg, DOI 10.1007/978-3-662-50397-3_1, 352 S.
- Bundesanstalt für Gewässerkunde (2023): DAS Basisdienst.
Von https://www.das-basisdienst.de/DAS-Basisdienst/DE/sub2_bfg/bfg_node.html abgerufen
- CLIMEX (2019): Klimawandel und Hydrologische Extremereignisse – Risiken und Perspektiven für die Wasserwirtschaft in Bayern (KlimEx).
Von https://www.lfu.bayern.de/wasser/klimawandel_wasserhaushalt/projekte/climex abgerufen
- Deutscher Wetterdienst (2025): Klimapressekonferenz des Deutschen Wetterdienstes. Von https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2025/20250401_pressemitteilung_klimapk.html?nn=821150 abgerufen
- Foley, A. M. (2010): Uncertainty in regional climate modelling: A review. in: Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 34(5), 647–670. <https://doi.org/10.1177/0309133310375654>.
- Gewässerkundlicher Dienst Bayern (2025): Daten von <https://www.gkd.bayern.de> am 31.07.2025 abgerufen

- Grimm, F. (1968): Zur Typisierung des mittleren Abflussganges (Abflussregime) in Europa. in: Freiburger Geographische Hefte, S. 51-64.
- Hendl, M. & Liedtke, H. [Hrsg.] (1997): Lehrbuch der Allgemeinen Physischen Geographie. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Perthes, Gotha 1997, ISBN 3-623-00839-7, S. 470–475.
- IKSR [Hrsg] (2024): Klimawandelbedingte Abflussszenarien für das Rheineinzugsgebiet. Koblenz: Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR), Fachbericht Nr. 297, 59 S.
- IPCC (2007): Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- IPCC (2014): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- IPCC (2023): Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- KLIWA (2006): KLIWA Heft 9: Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland – Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, 102 S., ISBN 3-88251-305-5, Karlsruhe 2006
- KLIWA (2022a): Monitoringbericht 2022: Klimawandel in Süddeutschland, Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen – Klimamonitoring im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA. 87. S.; veröffentlicht auf der Internetseite <https://www.kliwa.de>, 2022
- KLIWA (2022b): Zu viel | Zu wenig; Extreme meistern | Extremen begegnen. 28 S., veröffentlicht auf der Internetseite <https://www.kliwa.de>, 2022
- KLIWA (2023): Von Klimaveränderung und Wasserwirtschaft: <https://www.kliwa.de> abgerufen
- KLIWA (2024): KLIWA-Kurzbericht Zukünftige Entwicklung von Starkregen; Auswertung eines konvektionserlaubenden Ensembles; 20 S., veröffentlicht auf <https://www.kliwa.de> 2024
- LAWA (2020): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft – Bestandsaufnahme, Handlungsoptionen und strategische Handlungsfelder 2020 (Kurztitel: LAWA Klimawandel-Bericht 2020). Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA). 315 S.
- LfU siehe unter Bayerisches Landesamt für Umwelt
- Marke, T. (2008): Development and Application of a Model Interface to couple Land Surface Models with Regional Climate Models for Climate Change Risk Assessment in the Upper Danube Watershed.
- Muerth, M. J. (2012): On the need for bias correction in regional climate scenarios to assess climate change impacts on river runoff. Hydrol. Earth Syst. Sci., 17.
- QBIC³ (2012): Québec-Bavarian International Collaboration on Climate Change - Klimawandel und Flussgebietsmanagement. Von https://www.lfu.bayern.de/wasser/klimawandel_wasserhaushalt/projekte/qbic3_kliflum abgerufen

StMUV siehe unter Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz

van Vuuren, D.P., Edmonds, J.A., Kainuma, M. (2011): A special issue on the RCPs. *Climatic Change* 109, 1. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0157-y>

Velázquez, J. A., Schmid, J., Ricard, S., Muerth, M. J., Gauvin St-Denis, B., Minville, M., Chaumont, D., Caya, D., Ludwig, R., & Turcotte, R. (2013): An ensemble approach to assess hydrological models' contribution to uncertainties in the analysis of climate change impact on water resources, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 565–578, <https://doi.org/10.5194/hess-17-565-2013>, 2013.

WASIM (2023): The hydrological Model System WASIM. Von <http://www.wasim.ch> abgerufen

WMO [Hrsg.] (2025): *State of the Global Climate 2024*. World Meteorological Organization [Hrsg.], 42 S., 2025, ISBN 978-92-63-11368-9

Die zitierten Internetseiten wurden am 23.01.2023 abgerufen, sofern nicht anders vermerkt.

Anhang A: Liste der Untersuchungspegel und Ergebnisse des Kontrolllaufes

Die beiden Tabellen zeigen einfache Vergleiche zwischen beobachteten und modellierten Abflusswerten (unter Berücksichtigung anthropogener Eingriffe in das Abflussgeschehen). Gezeigt werden:

- die jährlichen MQs, MNQs und MHQs für den Referenzzeitraum 1971–2000
- die Abweichung (Delta) der beiden Werte (Beobachtet und Referenzlauf)
- und der Korrelationskoeffizient R der täglichen Zeitreihen

Nach Möglichkeit sollten die Abweichungen beim MQ nicht größer als 10 % betragen. Dennoch wurden einige Pegel in die Betrachtung aufgenommen, welche dieses Kriterium nicht erfüllen. Da aber diese Pegel für den kürzeren Zeitraum der Validierung nach einem visuellen Vergleich ausreichend gute Werte aufwiesen, wurden sie dennoch in die Betrachtung aufgenommen. Die Abweichungen zwischen Beobachtungsdaten und Referenzlauf bei diesen Pegeln lassen sich in drei Gruppen einteilen:

1. Systematische Abweichung (SYS)*
2. Über/Unterschätzung der Modellierung anthropogener Eingriffe (MAN)*
3. Über/Unterschätzung des Hochwasserabflusses (HOC)*

Bei den nachfolgenden Pegelbeschreibungen ist die Art der Abweichung mit den o.g. Kürzeln gekennzeichnet.

Tab. 10: Performanz-Kriterien für den MQ der modellierten Pegel und für den MNQ und MHQ der Auswahlpegel.

Pegelbeschreibung					MQ				MNQ			MHQ		
ID	Pegelname	Gewässer	WHM-Kurzbez.	Einzugsgebiet [km ²]	Beobachtet in [m ³ /s]	Referenzlauf [m ³ /s]	Korr. R der täglichen Werte	Delta in [%]	Beobachtet in [m ³ /s]	Referenzlauf [m ³ /s]	Delta in [%]	Beobachtet in [m ³ /s]	Referenzlauf [m ³ /s]	Delta in [%]
123	Achleiten	Donau	Do3	76.653	1.417,8	1.447,5	0,9	2	678,6	628,7	7	3.836,0	4.940,6	-29
456	Bayreuth (SYS)*	Roter Main	OMain	331	3,1	3,8	0,9	22	0,7	1,1	-65	34,9	29,8	15
2	Beilngries	Altmühl	Altmühl	2.251	17,0	15,6	0,9	-8	6,2	6,5	-4	85,5	88,0	-3
22	Biessenhofen	Wertach	Do1	451	12,4	11,6	0,8	-7	3,1	2,8	12	90,8	82,6	9
557	Birnbach (SYS)*	Rott	UInn	860	7,5	9,6	0,8	27	2,6	2,9	-11	89,1	92,8	-4
571	Burghausen	Salzach	UInn	6.655	250,0	241,3	0,9	-3	89,1	64,2	28	1.148,0	1.177,3	-3
562	Burgkirchen	Alz	UInn	2.164	11,1	10,6	0,7	-4	3,2	3,1	1	116,7	68,5	41
682	Deuerling (SYS)*	Schwarze Laber	sLaber	423	3,1	2,7	0,9	-15	1,8	1,7	5	11,4	8,2	28
253	Dietldorf (SYS)*	Vils	Naab	1.101	10,5	9,2	0,9	-13	6,8	5,9	12	41,5	39,1	6
25	Donauwörth	Donau	Do1	15.131	197,2	202,7	0,9	3	81,9	84,1	-3	771,4	734,2	5
536	Eschelbach	Inn	UInn	13.346	374,0	394,1	0,9	5	152,1	132,3	13	1.253,0	1.937,5	-55
547	Feldolling (MAN)*	Mangfall	UInn	756	8,2	12,1	0,8	46	3,2	4,2	-30	80,4	64,3	20
192	Freising (MAN)*	Isar	Isar	3.067	21,7	28,2	0,8	30	10,1	10,2	-2	262,4	344,6	-31
142	Grafenmühle (SYS)*	Vils	Do3	1.440	11,5	13,2	0,8	15	5,4	5,9	-7	103,0	100,2	3
675	Harburg	Wörnitz	Wörnitz	1.570	11,8	10,9	0,9	-7	2,3	3,2	-42	128,3	85,6	33
250	Heitzenhofen (HOC)*	Naab	Naab	5.432	50,4	44,9	1,0	-11	19,2	18,8	2	272,7	198,8	27
685	Hof	Sächsische Saale	sSaale	522	5,2	5,7	0,9	8	1,2	1,4	-18	40,5	43,5	-7
127	Hofkirchen	Donau	Do3	47.518	643,6	672,3	0,9	4	323,7	319,2	1	1.873,1	1.968,2	-5
162	Hohenberg	Eger	Eger	300	3,5	3,2	0,9	-10	0,8	1,0	-14	22,5	16,9	25
484	Hohenstadt	Pegnitz	Regnitz	475	5,2	5,4	0,7	4	3,6	3,3	8	22,4	23,6	-5
477	Hüttendorf (MAN)*	Regnitz	Regnitz	3.783	29,2	32,5	0,8	11	14,3	18,7	-31	153,0	171,7	-12
87	Ingolstadt Luitpoldstraße	Donau	Do2	20.252	319,5	333,0	0,9	4	142,4	138,2	3	1.071,4	1.154,9	-8
214	Inkofen	Amper	Isar	3.097	47,4	48,5	0,9	3	26,8	26,5	1	129,3	127,3	2
133	Kalteneck (HOC)*	Ilz	Do3	762	16,2	13,6	0,8	-16	5,2	4,0	22	124,2	109,1	12
91	Kelheimwinzer	Donau	Do2	26.361	356,6	391,7	0,9	10	151,3	169,5	-12	1.274,4	1.498,0	-18
443	Kemmern	Main	OMain	4.250	44,3	47,3	0,9	7	10,5	14,1	-34	341,4	311,1	9
181	Kempton	Iller	Iller	955	46,8	46,1	0,9	-2	10,2	10,9	-8	306,2	289,3	6
619	Kleinheubach	Main	UMain	24.219	160,5	176,5	1,0	10	52,2	75,5	-45	794,2	745,2	6
19	Landsberg	Lech	Do1	2.283	80,4	84,3	0,9	5	31,0	23,1	26	356,6	356,9	0
93	Manching Bahnbrücke (SYS)*	Paar	Do2	1.207	7,4	9,0	0,7	21	4,5	5,4	-20	25,4	40,0	-58
201	Mittenwald (SYS)*	Isar	Isar	402	12,5	15,7	0,9	26	4,4	5,7	-30	46,3	47,5	-2

Pegelbeschreibung					MQ				MNQ			MHQ		
ID	Pegelname	Gewässer	WHM-Kurzbez.	Einzugsgebiet [km²]	Beobachtet in [m³/s]	Referenzlauf [m³/s]	Korr. R der täglichen Werte	Delta in [%]	Beobachtet in [m³/s]	Referenzlauf [m³/s]	Delta in [%]	Beobachtet in [m³/s]	Referenzlauf [m³/s]	Delta in [%]
193	München	Isar mit Stadtbächen	Isar	2.838	91,1	95,4	0,9	5	43,1	37,7	12	380,8	380,7	0
481	Neumühle	Rednitz	Regnitz	1.774	12,1	11,9	0,7	-2	5,0	5,1	-2	81,5	100,8	-24
151	Neu Ulm, Bad Held	Donau	DoBW	7.617	125,0	131,1	0,9	5	47,0	50,3	-7	518,9	494,1	5
284	Oberaudorf	Inn	OInn	9.713	303,5	321,3	0,9	6	103,2	101,2	2	1025,9	1831,1	-78
31	Offingen	Mindel	Do1	952	12,4	13,2	0,8	6	6,8	7,4	-9	58,6	59,9	-2
533	Passau-Ingling	Inn	UInn	26.040	732,6	745,9	0,9	2	309,5	247,1	20	2472,7	3391,5	-37
473	Pettstadt	Regnitz	Regnitz	6.978	52,4	56,0	0,8	7	23,3	32,4	-39	287,0	300,9	-5
188	Plattling	Isar mit Mühbächen	Isar	8.613	174,1	179,4	0,9	3	96,3	95,8	1	517,4	646,9	-25
195	Puppling	Isar	Isar	1.620	48,0	52,0	0,9	8	18,5	13,4	28	230,5	249,2	-8
26	Rain Werksabfluss	Lech	Do1	4.461	180,0	120,4	0,7	-33	40,1	41,8	-4	962,6	485,3	50
458	Regenstau	Regen	Regen	2.658	38,4	34,5	0,9	-10	13,8	13,7	1	250,6	208,7	17
639	Sachsenheim (SYS)*	Wern	UMain	599	2,6	3,3	0,9	28	1,1	1,7	-55	13,6	13,1	4
462	Sägmühle	Schwarzer Regen	Regen	834	19,1	17,3	0,9	-9	5,7	5,8	13	141,0	109,8	22
634	Salz	Fränkische Saale	UMain	1.042	8,2	9,0	0,9	10	2,1	2,7	-30	67,1	68,2	-2
227	Schlehdorf	Loisach	Isar	638	21,8	22,7	0,9	4	8,3	6,5	22	111,2	102,0	8
82	Schwabelweis	Donau	Do2	35.476	455,1	462,3	0,9	2	199,0	200,5	-1	1473,1	1504,2	-2
649	Schweinfurt Neuer Hafen	Main	UMain	12.717	105,3	111,9	0,9	6	37,4	52,4	-40	581,1	581,1	0
447	Schwüritz	Main	OMain	2.419	30,7	31,4	0,9	2	6,6	8,5	-29	272,1	217,3	20
584	Stein	Traun	UInn	376	12,5	12,9	0,8	3	4,2	4,9	-17	97,6	68,2	30
671	Tauberbischofsheim (SYS)*	Tauber	UMain	1.583	8,3	10,4	0,9	26	2,4	4,3	-76	85,6	75,8	11
10	Thann	Altmühl	Altmühl	327	2,1	2,0	0,6	-4	0,3	0,4	-60	36,6	24,6	33
577	Unterjettenberg	Saalach	UInn	941	36,6	36,2	0,8	-1	9,9	7,7	22	231,7	276,8	-19
252	Unterköblitz	Naab	Naab	2.014	19,6	17,8	1,0	-9	5,4	5,7	-7	148,8	120,1	19
449	Unterlangenstadt	Rodach	OMain	714	10,3	10,1	0,9	-3	1,5	2,0	-34	111,4	88,5	21
254	Warnbach	Schwarzach	Naab	820	9,0	8,3	0,9	-7	3,0	4,3	-44	41,7	29,2	30
219	Weilheim	Ammer	Isar	608	14,8	16,3	0,9	10	6,0	7,2	-20	108,4	82,0	24
179	Wiblingen	Iller	Iller	2.040	72,2	74,6	0,9	3	23,0	25,4	-10	375,1	372,8	1
630	Wolfsmünster	Fränkische Saale	UMain	2.126	17,2	18,6	0,9	8	4,6	5,6	-20	124,9	125,4	0
643	Würzburg	Main	UMain	14.018	114,5	115,1	0,8	1	54,3	55,1	-2	594,6	638,6	-7

Anhang B: Vergleich der Bandbreiten des verwendeten Abflussprojektionsensembles mit und ohne die MIROC-RCP2.6 Projektion

Die folgenden Abbildungen zeigen den Vergleich der Klimasignale der Gleitenden Mittel des Projektionsensembles mit und ohne die Projektion MIROC-RCP2.6:

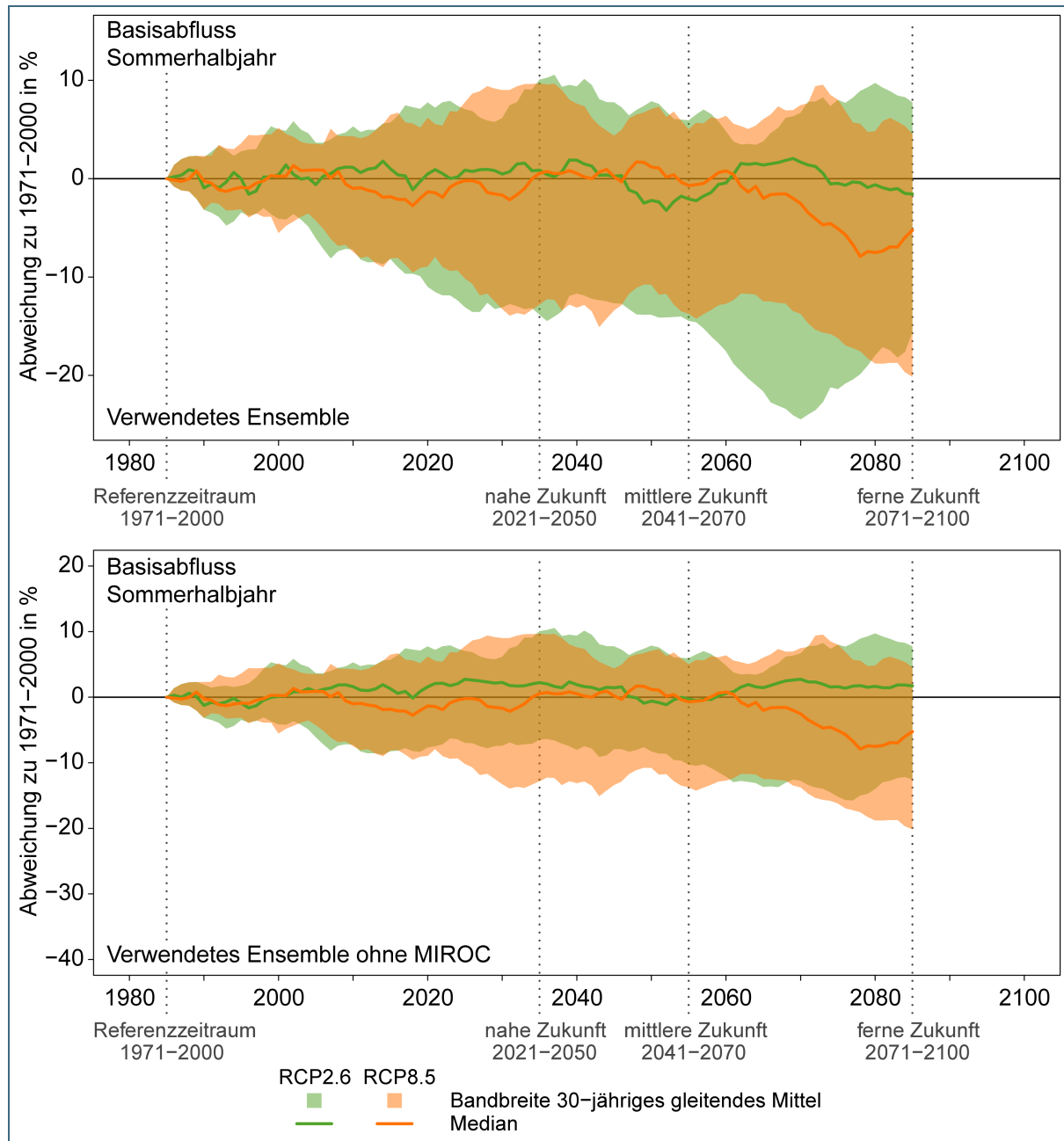


Abb. 68: Vergleich der Klimaänderungssignale des Basisabflusses für das Sommerhalbjahr des verwendeten Abflussprojektionsensembles und des Abflussensembles ohne die MIROC-RCP2.6 Projektion.

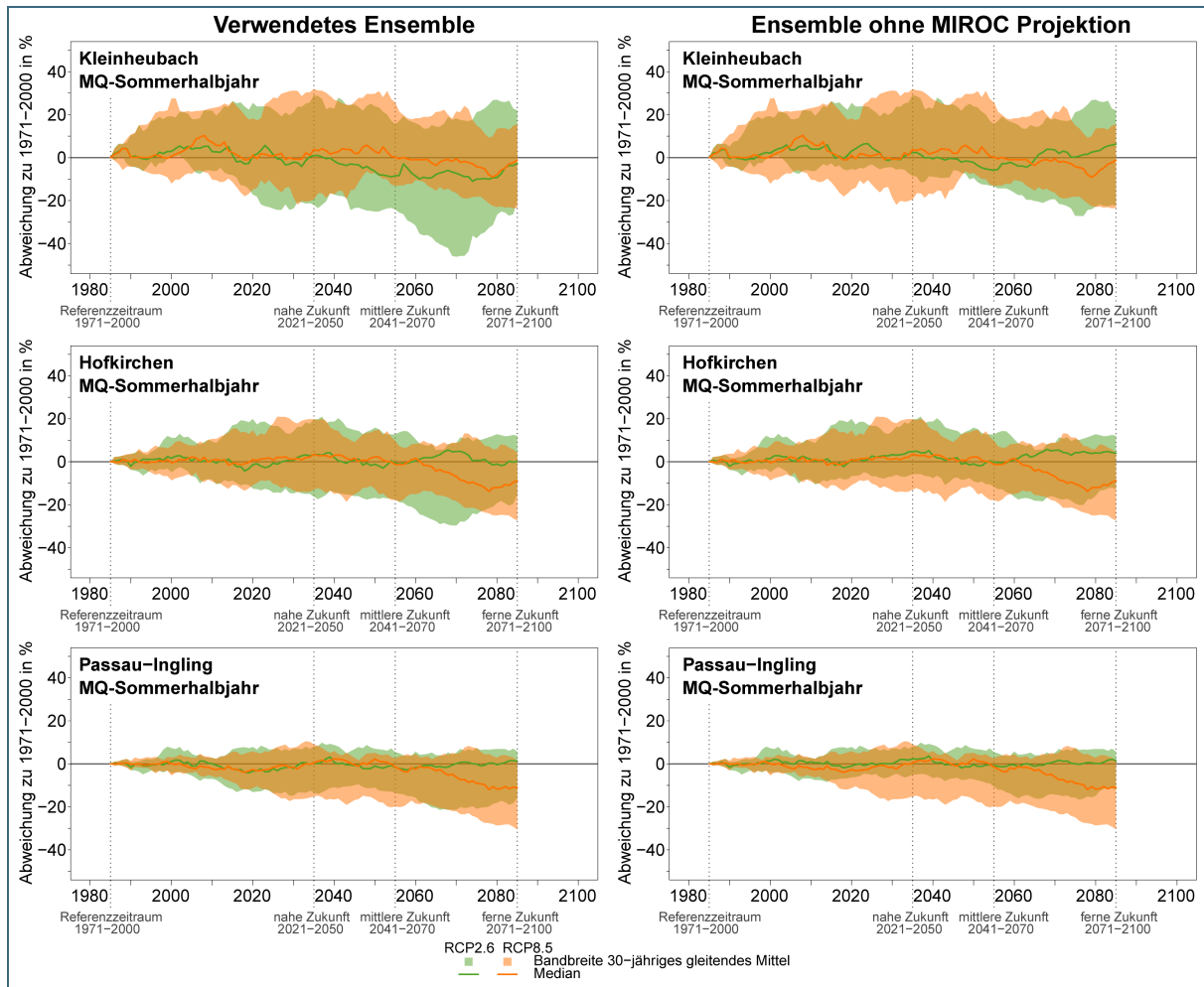


Abb. 69: Vergleich der Klimaänderungssignale der Beispielpiegel des MQ für das Sommerhalbjahr des verwendeten Abflussprojektionsensembles und des Abflussensembles ohne die MIROC-RCP2.6 Projektion.

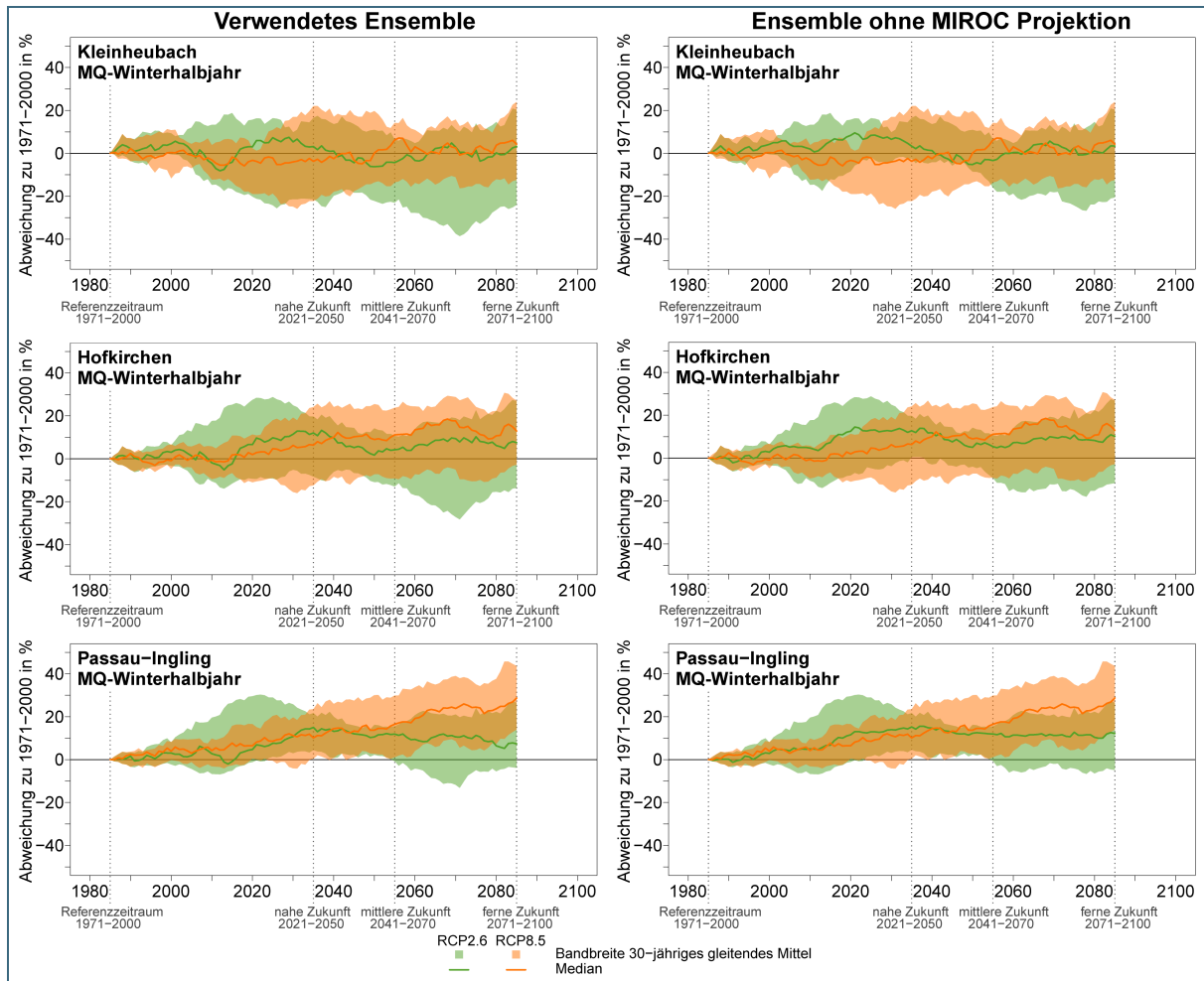


Abb. 70: Vergleich der Klimaänderungssignale der Beispielpegel des MQ für das Winterhalbjahr des verwendeten Abflussprojektionsensembles und des Abflussensembles ohne die MIROC-RCP2.6 Projektion.

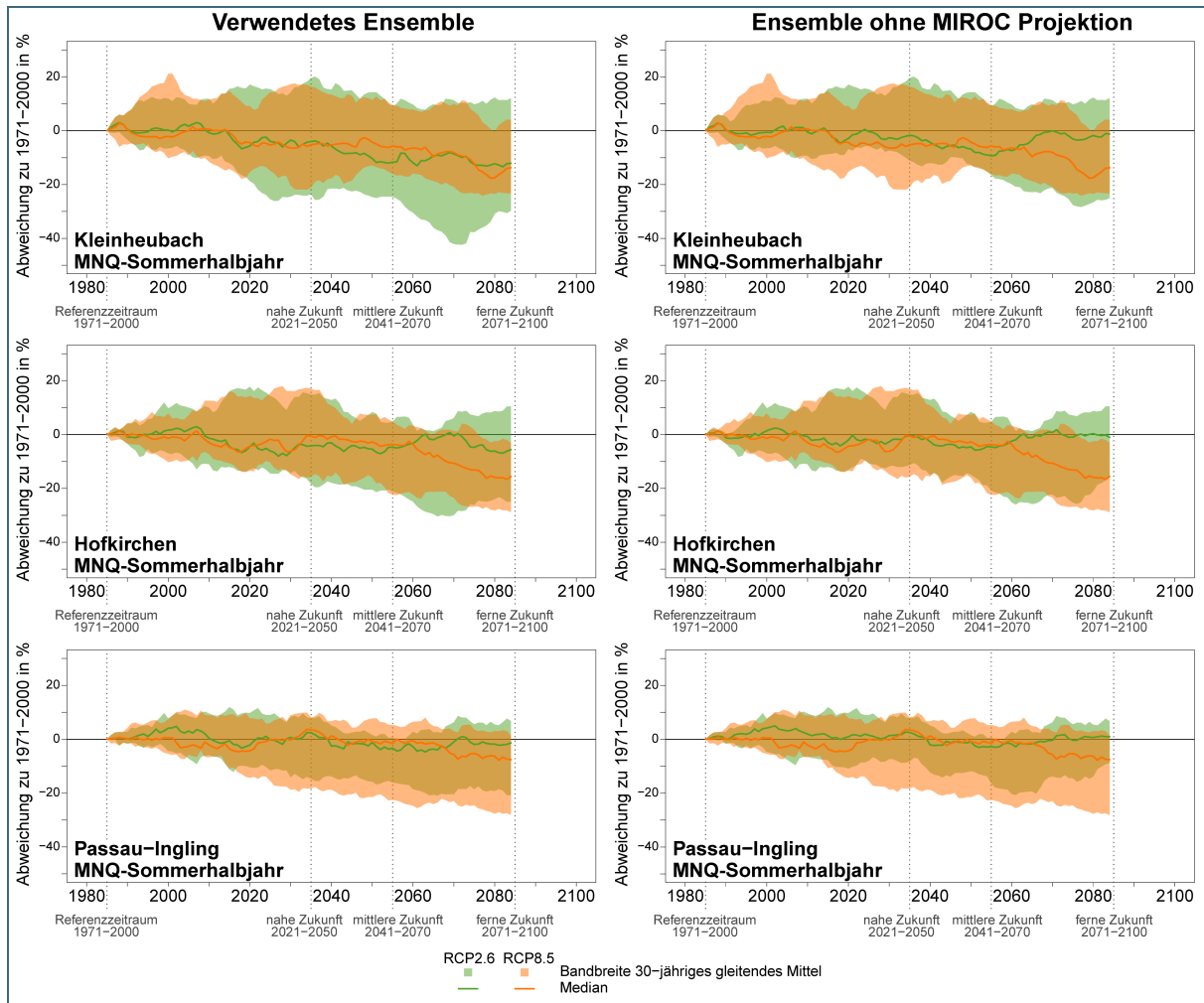


Abb. 71: Vergleich der Klimaänderungssignale der Beispielpegel des MNQ für das Sommerhalbjahr des verwendeten Abflussprojektionsensembles und des Abflussensembles ohne die MIROC-RCP2.6 Projektion.

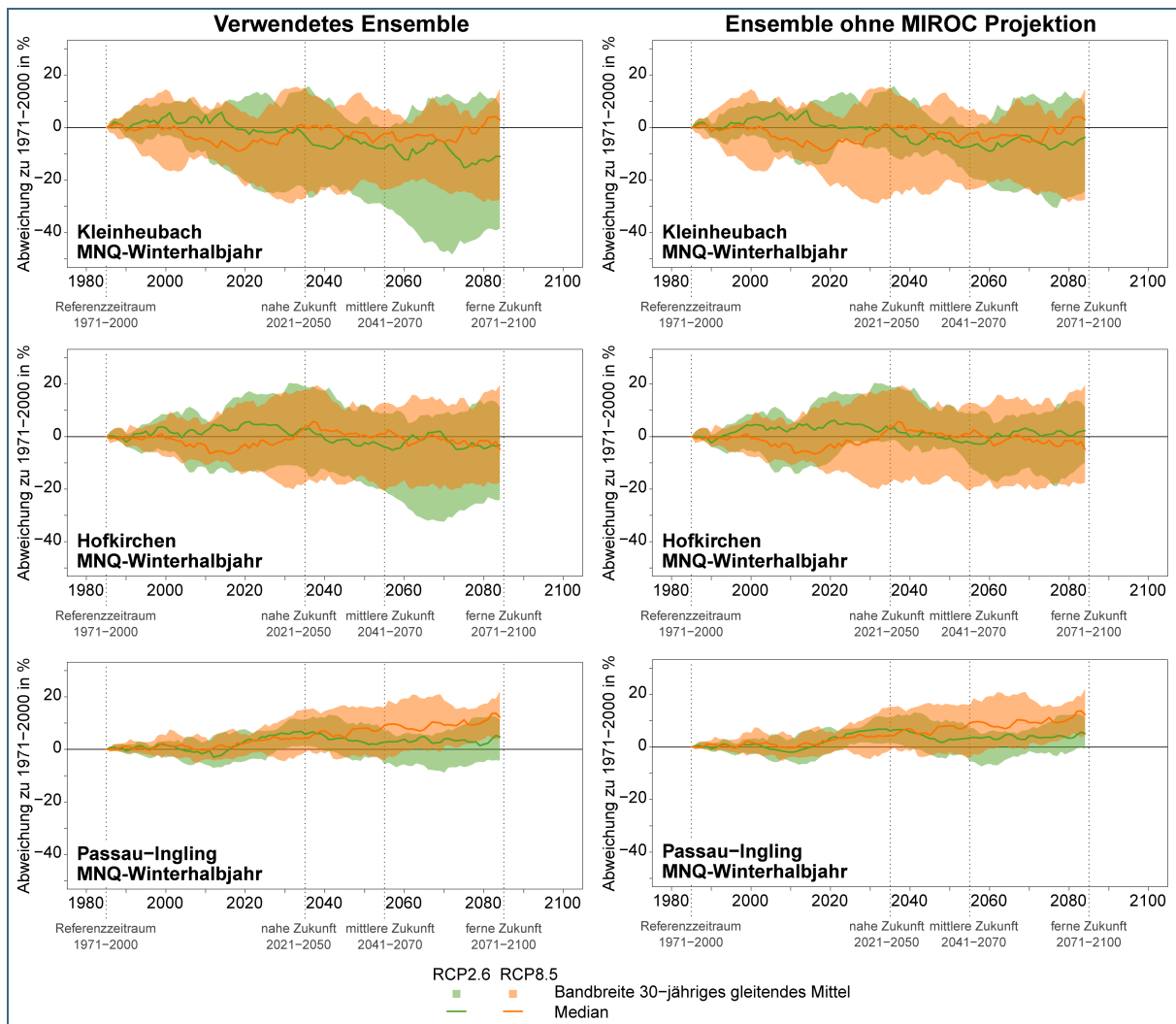


Abb. 72: Vergleich der Klimaänderungssignale der Beispielpegel des MNQ für das Winterhalbjahr des verwendeten Abflussprojektionsensembles und des Abflussensembles ohne die MIROC-RCP2.6 Projektion.

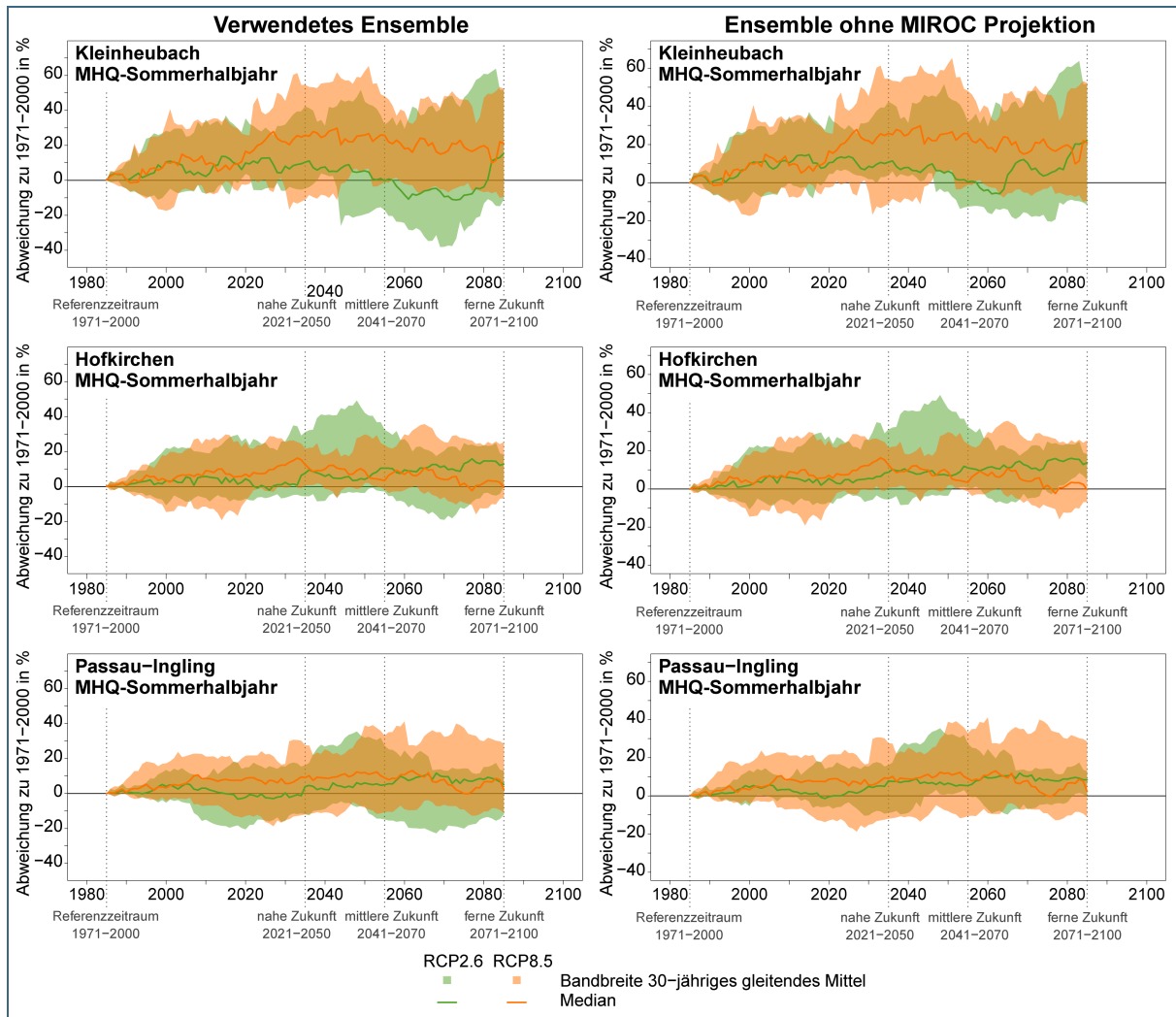


Abb. 73: Vergleich der Klimaänderungssignale der Beispielpegel des MHQ für das Sommerhalbjahr des verwendeten Abflussprojektionsensembles und des Abflussensembles ohne die MIROC-RCP2.6 Projektion.

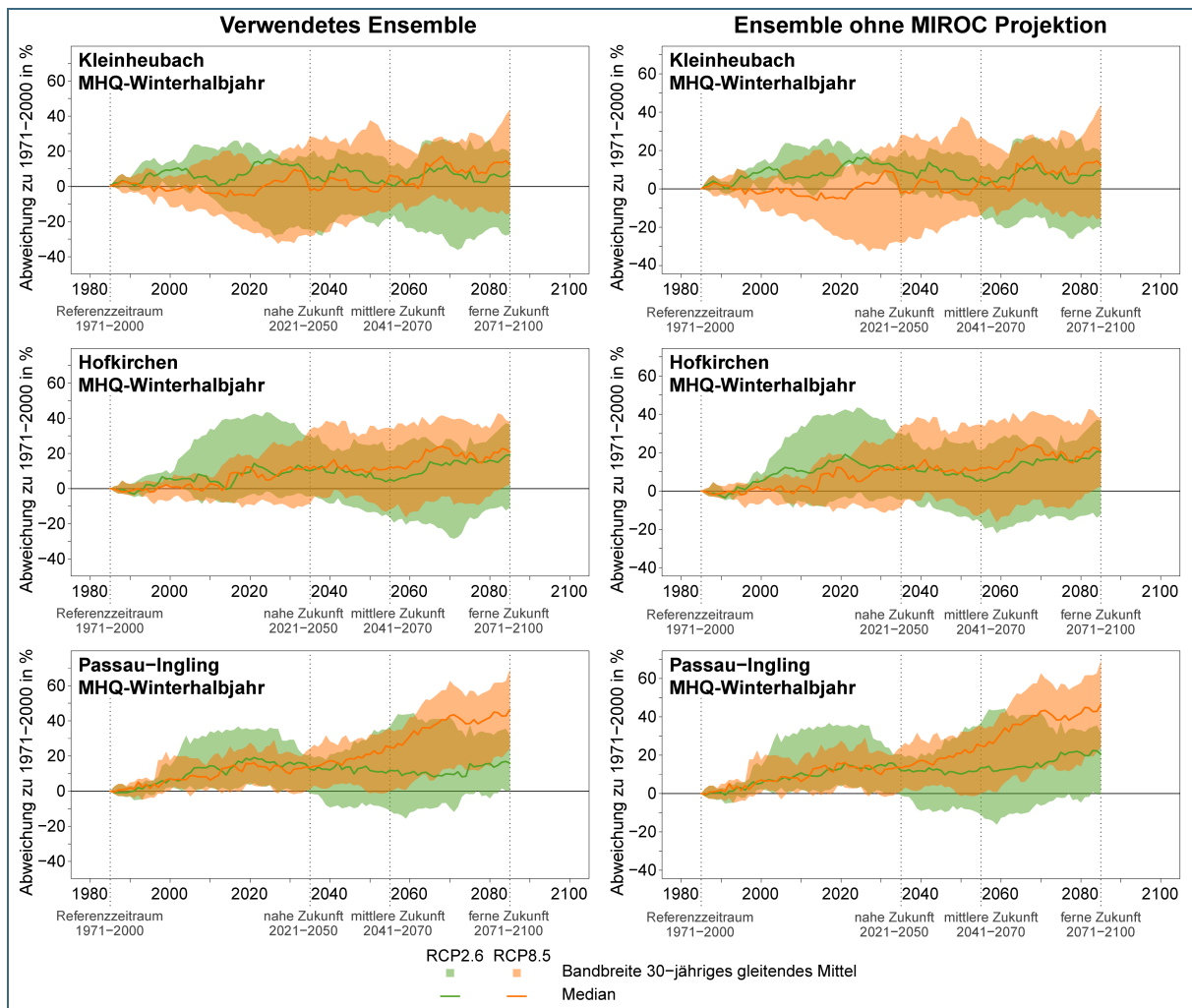


Abb. 74: Vergleich der Klimaänderungssignale der Beispielpegel des MHQ für das Winterhalbjahr des verwendeten Abflussprojektionsensembles und des Abflussensembles ohne die MIROC-RCP2.6 Projektion.

Anhang C: Jahreswerte des MQ, MNQ und MHQ für die drei Beispielpegel

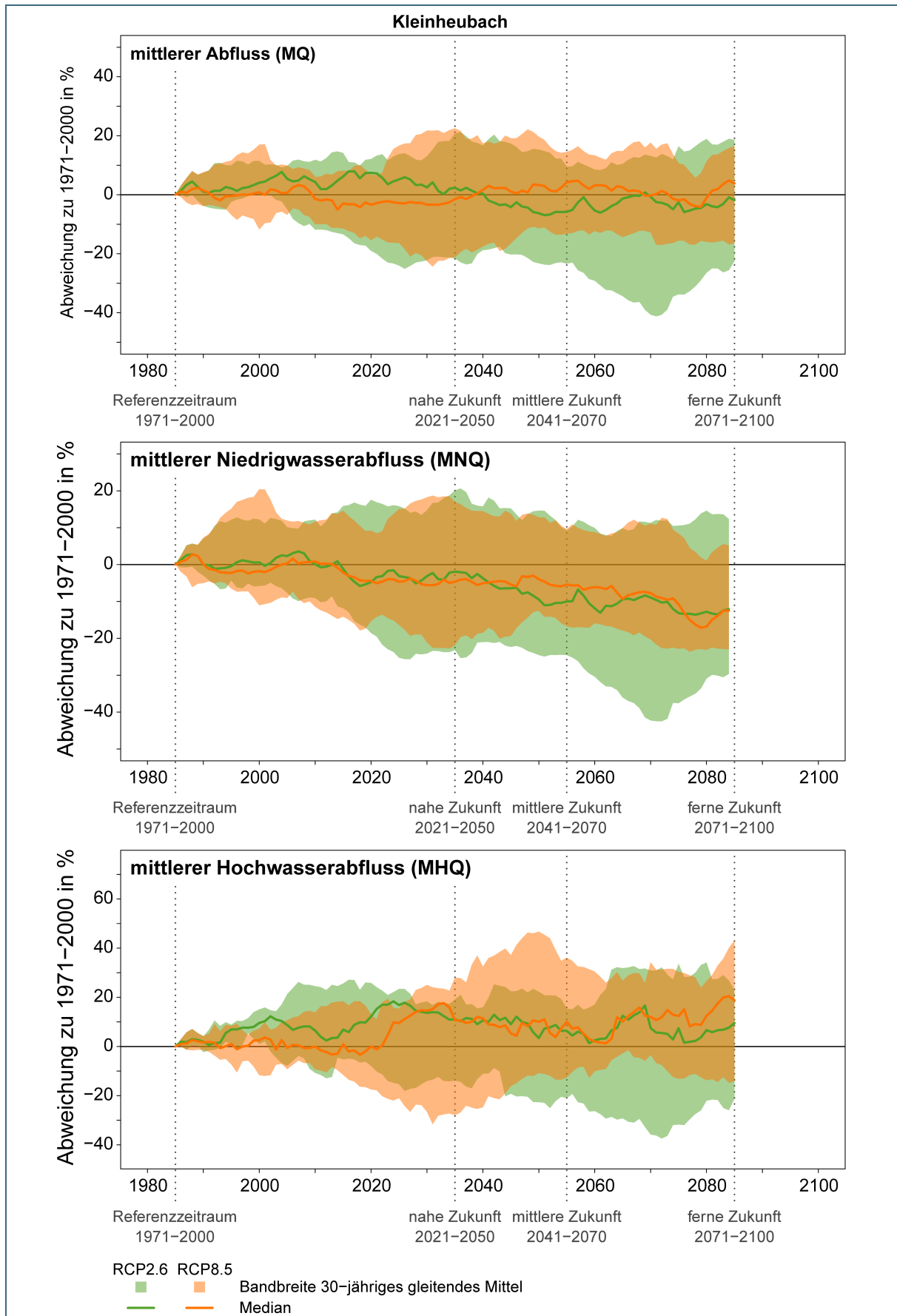


Abb. 75: Jahreswerte MQ, MNQ und MHQ für den Pegel Kleinheubach (Main)

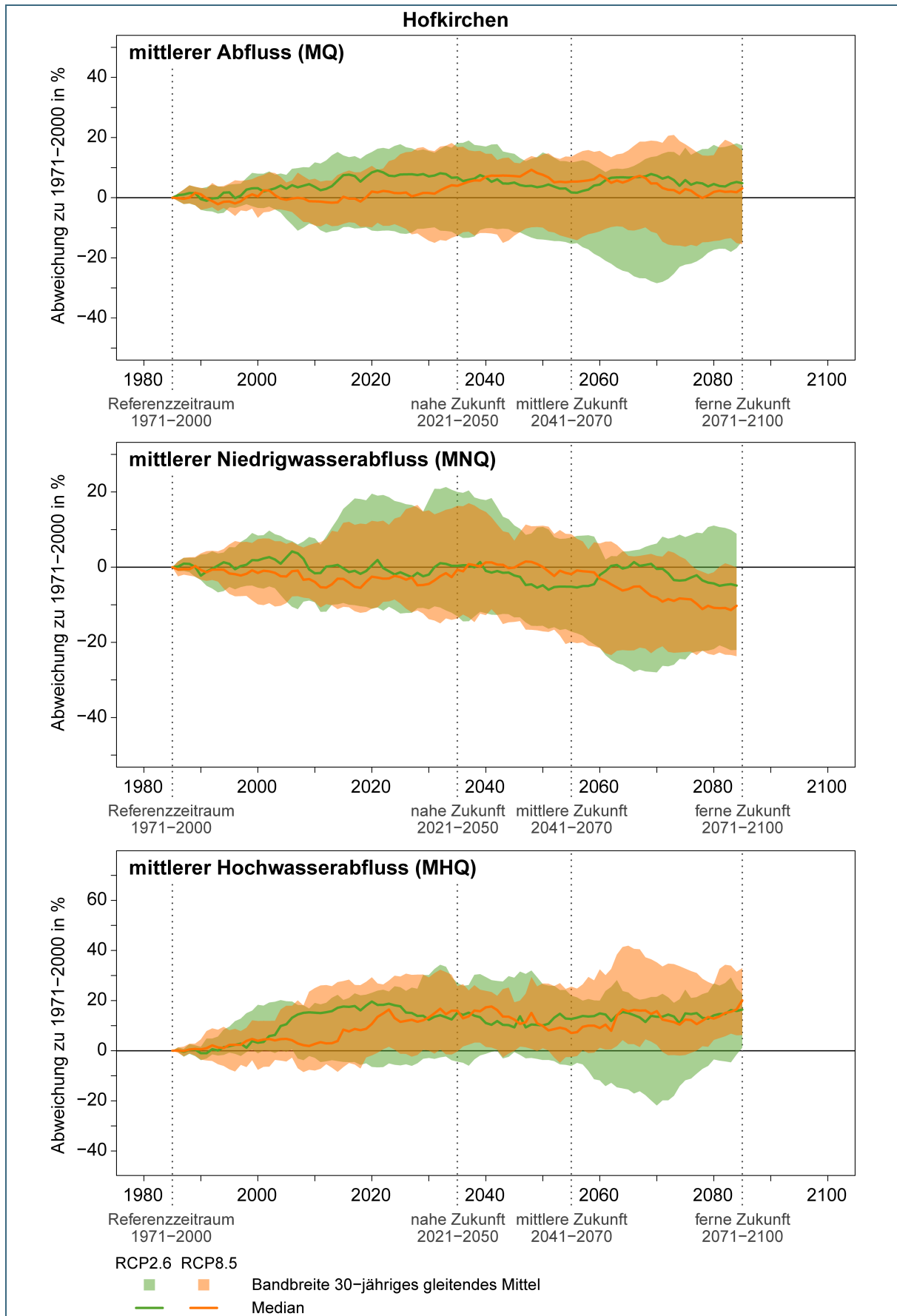


Abb. 76: Jahreswerte MQ, MNQ und MHQ für den Pegel Hofkirchen (Donau)

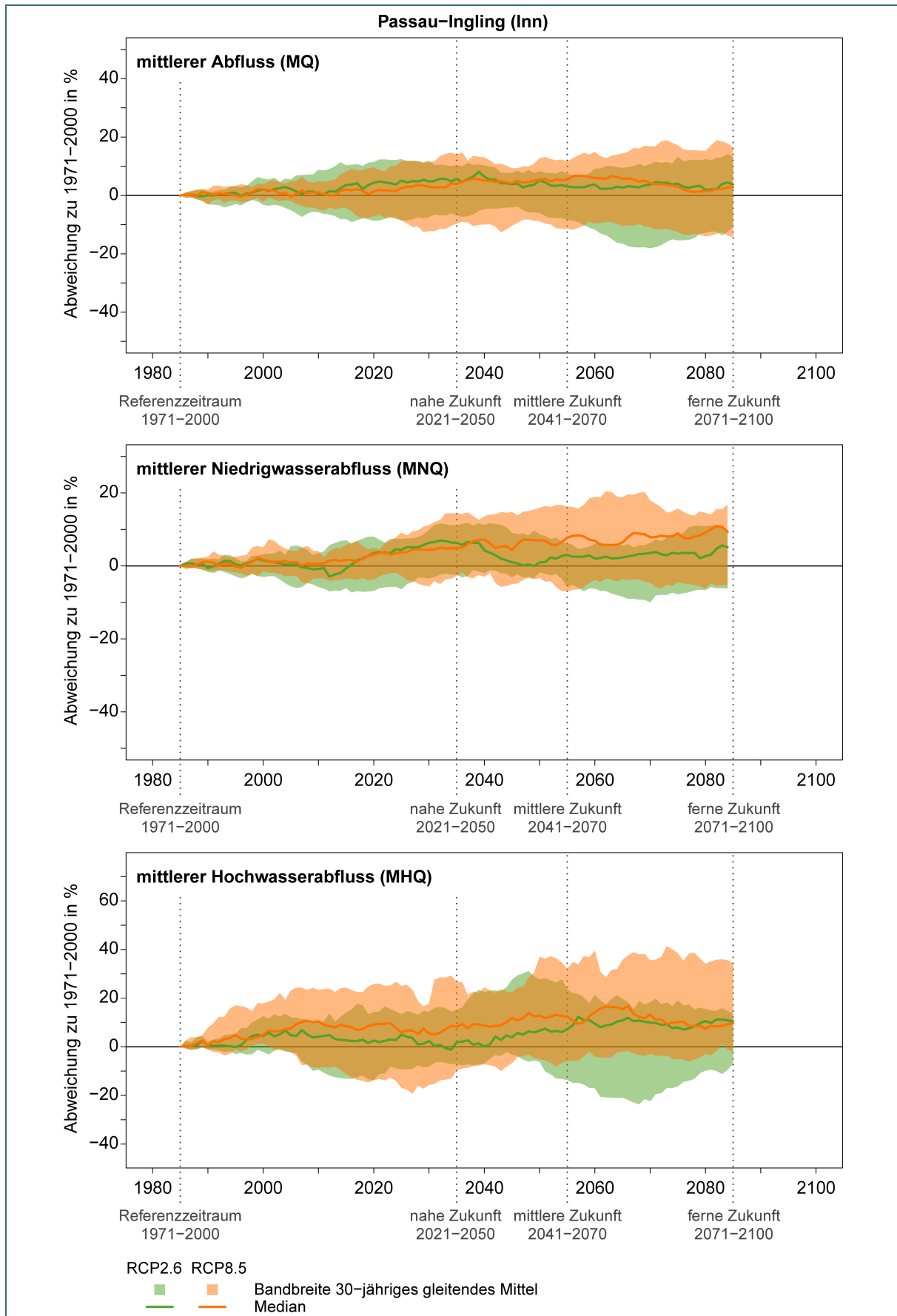


Abb. 77: Jahreswerte MQ, MNQ und MHQ für den Pegel Passau-Ingling (Donau)

Anhang D: Maximales und Minimales Klimasignal sowie Median der 60 Auswertepegel

Die folgenden Karten bilden die Grundlage der zusammenfassenden Karten aus den Kapiteln 4.6.1, 4.6.2.1 und 4.6.3.1

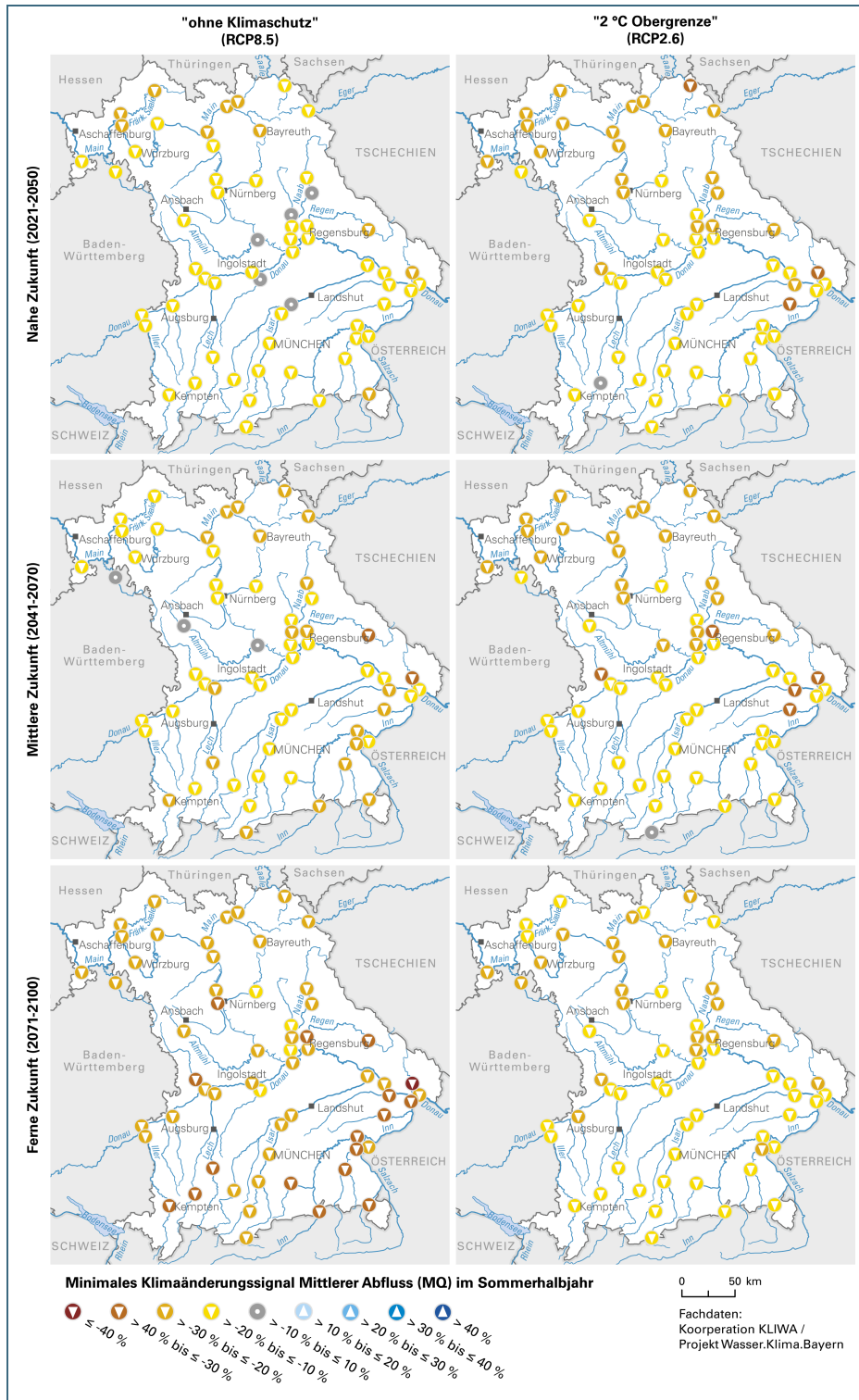


Abb. 78: Minima der Klimasignale der 60 Auswertepegel für den MQ Sommerhalbjahr

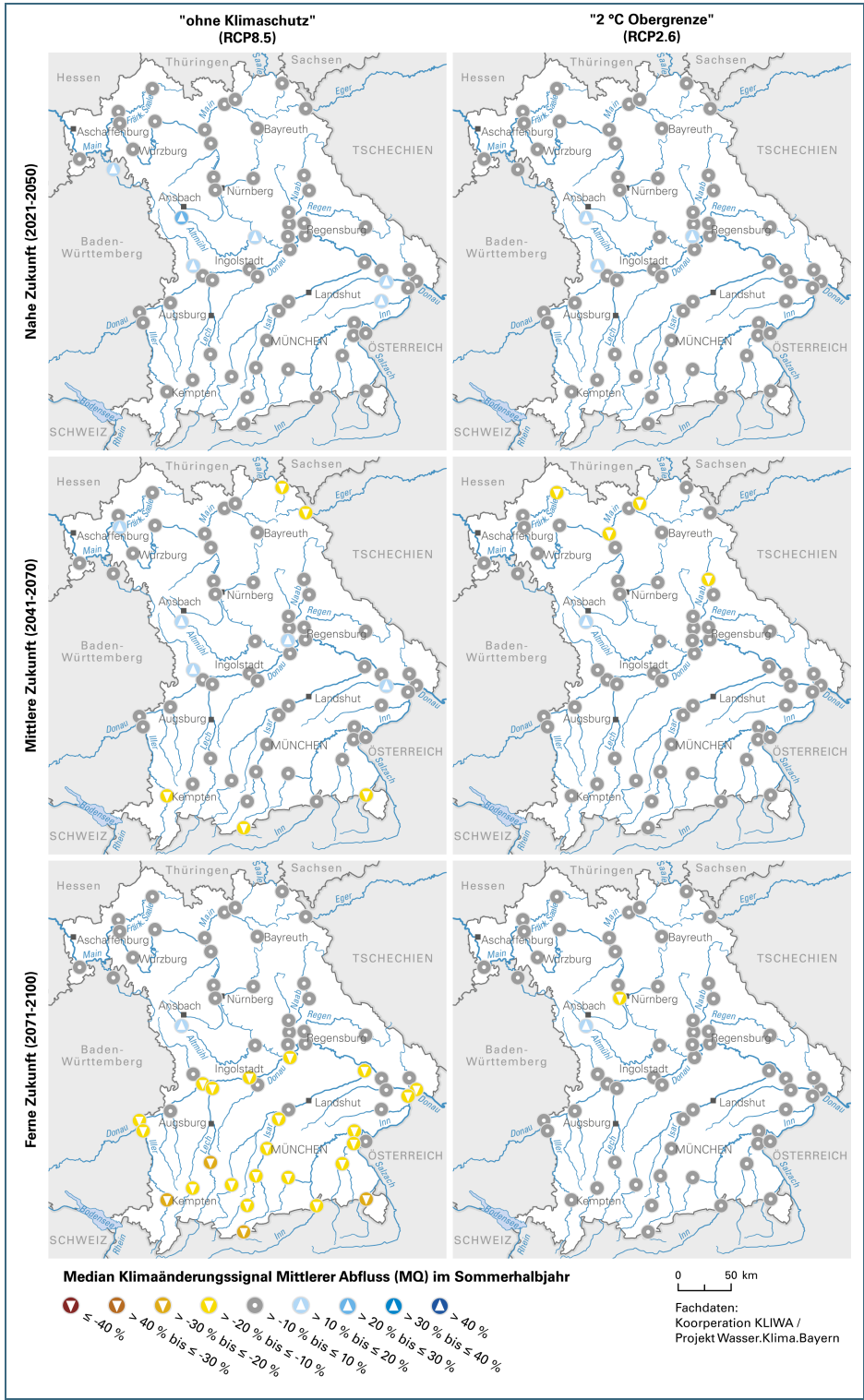


Abb. 79: Median der Klimasignale der 60 Auswertepegel für den MQ Sommerhalbjahr

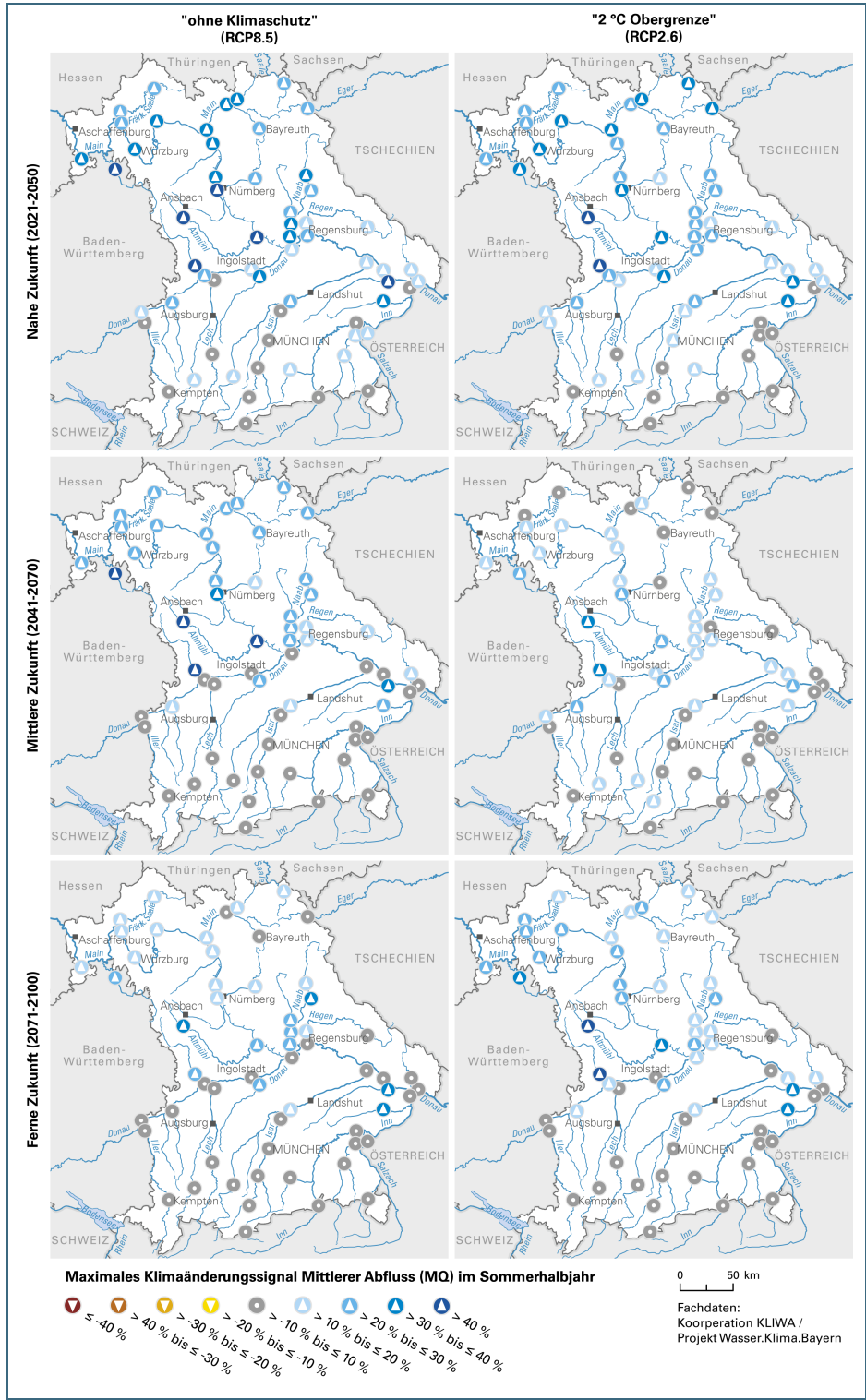


Abb. 80: Maxima der Klimasignale der 60 Auswertepegel für den MQ Sommerhalbjahr

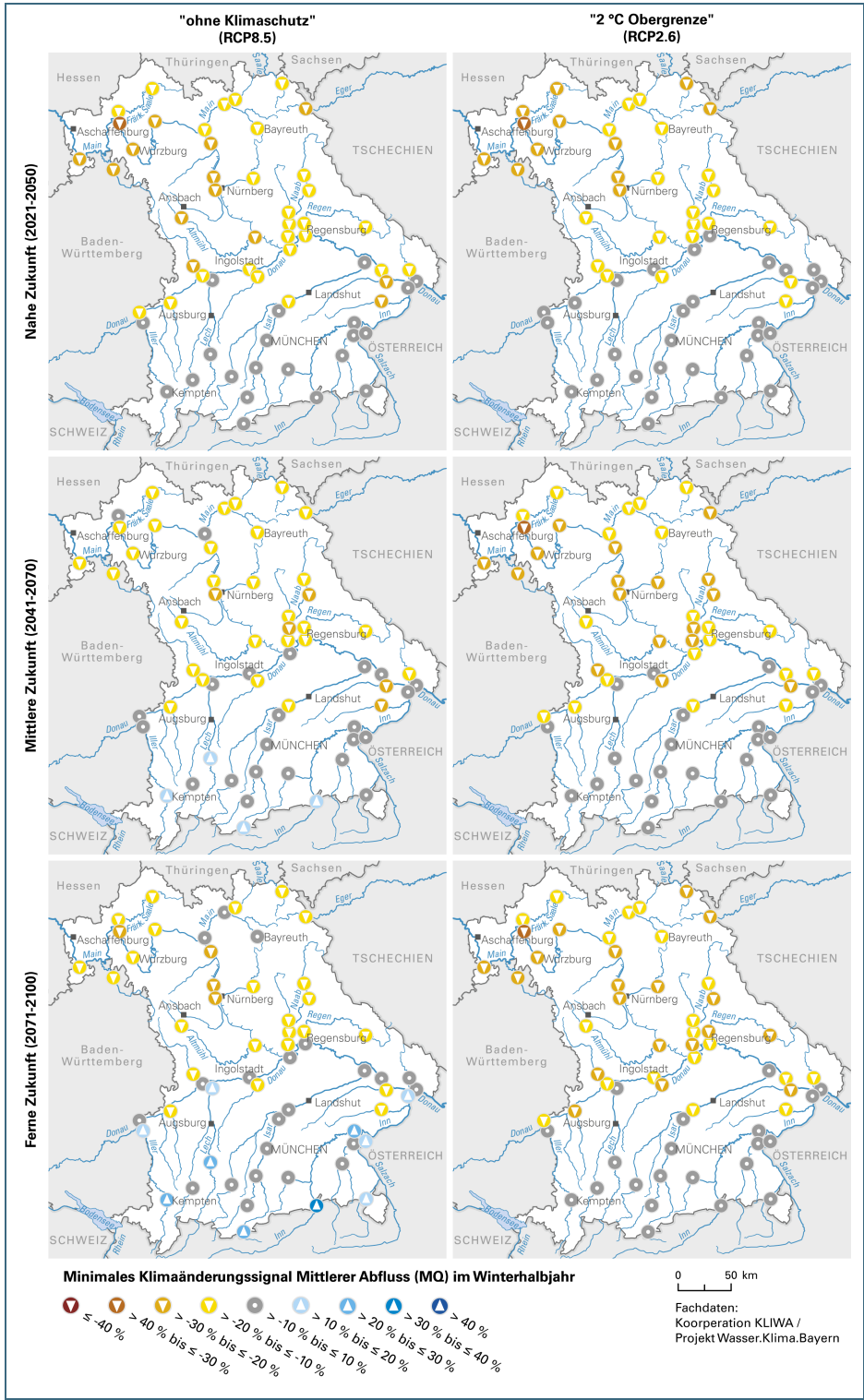


Abb. 81: Minima der Klimasignale der 60 Auswertepegel für den MQ Winterhalbjahr

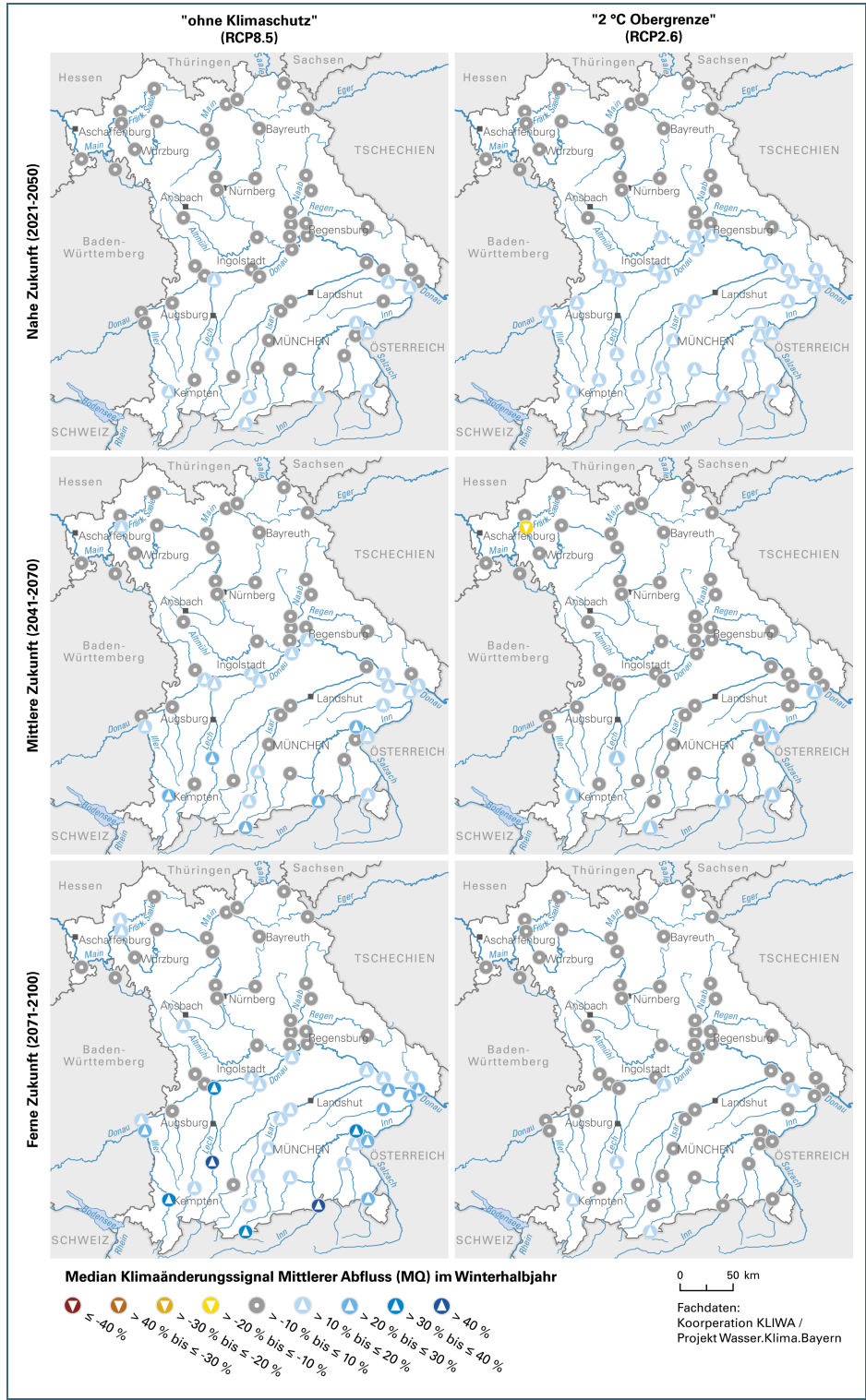


Abb. 82: Median der Klimasignale der 60 Auswertepegel für den MQ Winterhalbjahr

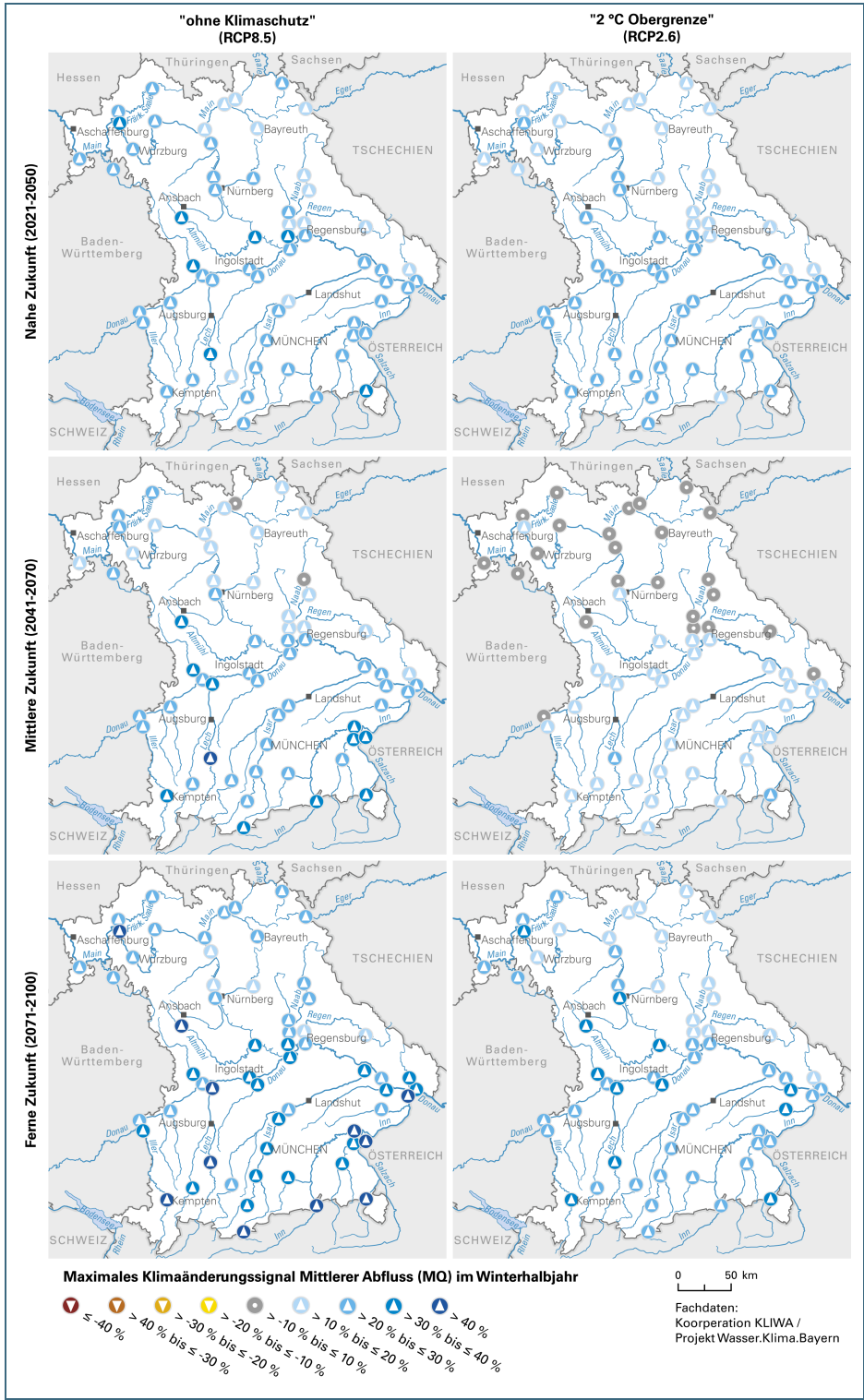


Abb. 83: Maxima der Klimasignale der 60 Auswertepegel für den MQ Winterhalbjahr

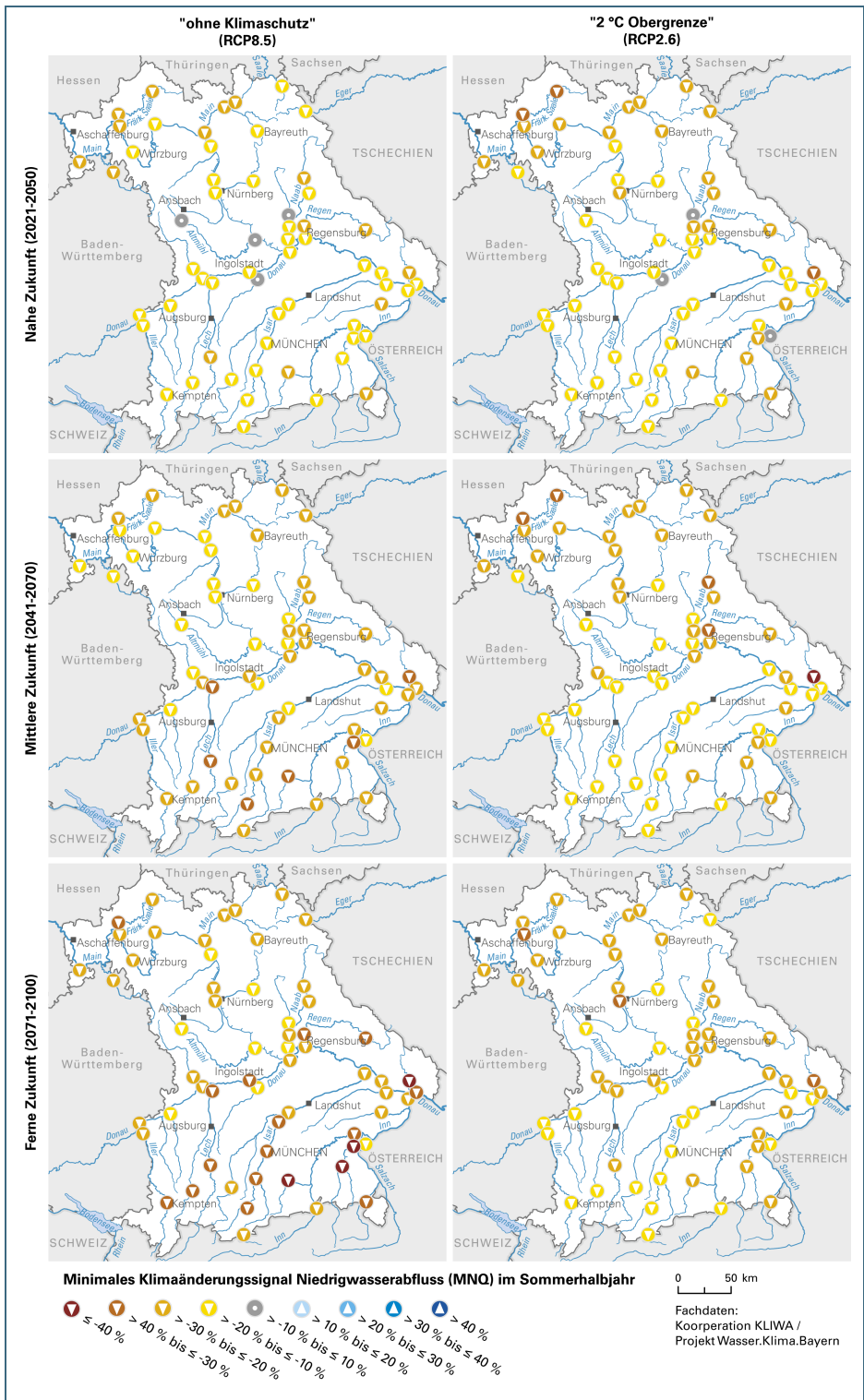


Abb. 84: Minima der Klimasignale der 60 Auswertepegel für den MNQ Sommerhalbjahr

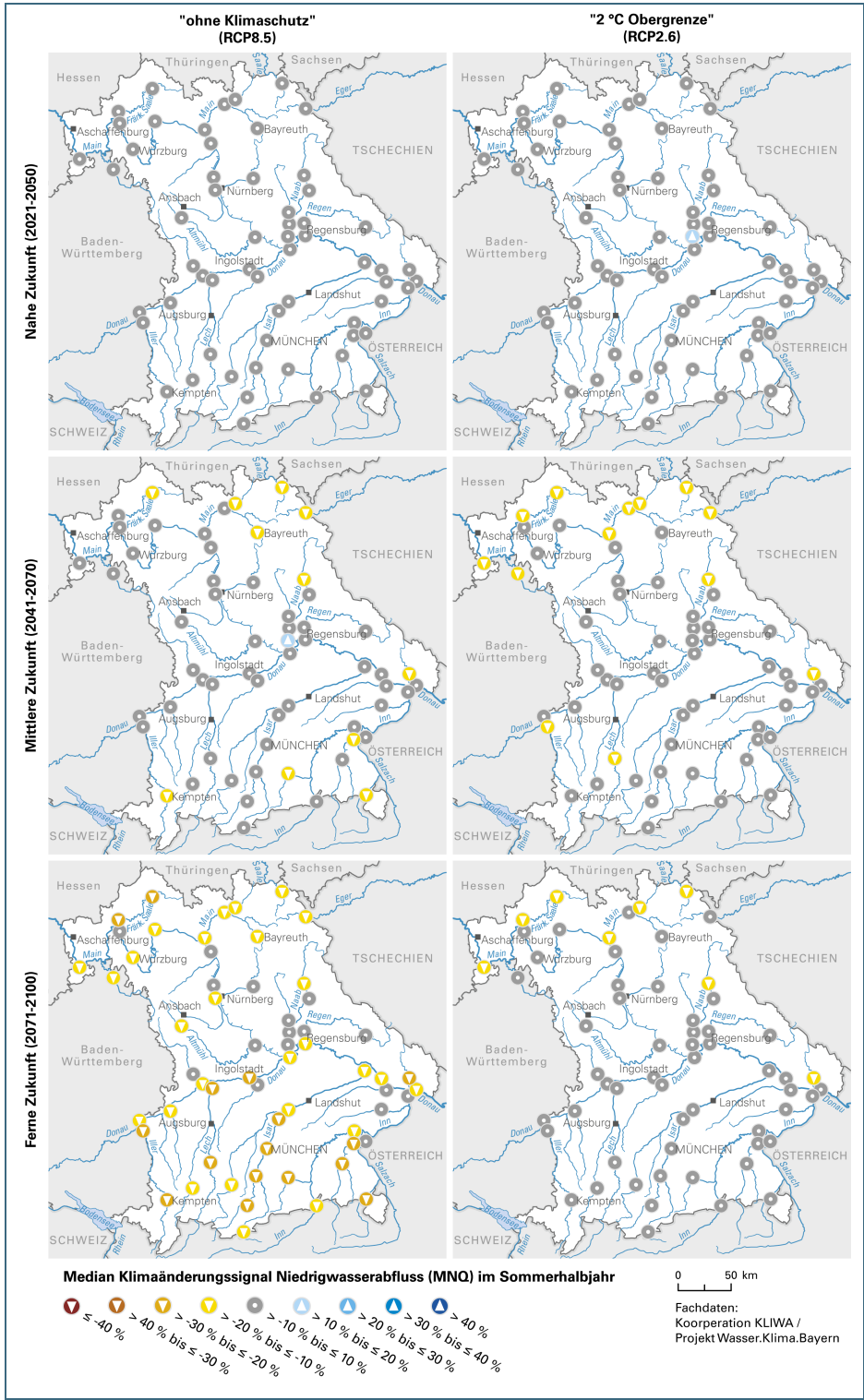


Abb. 85: Median der Klimasignale der 60 Auswertepegel für den MNQ Sommerhalbjahr

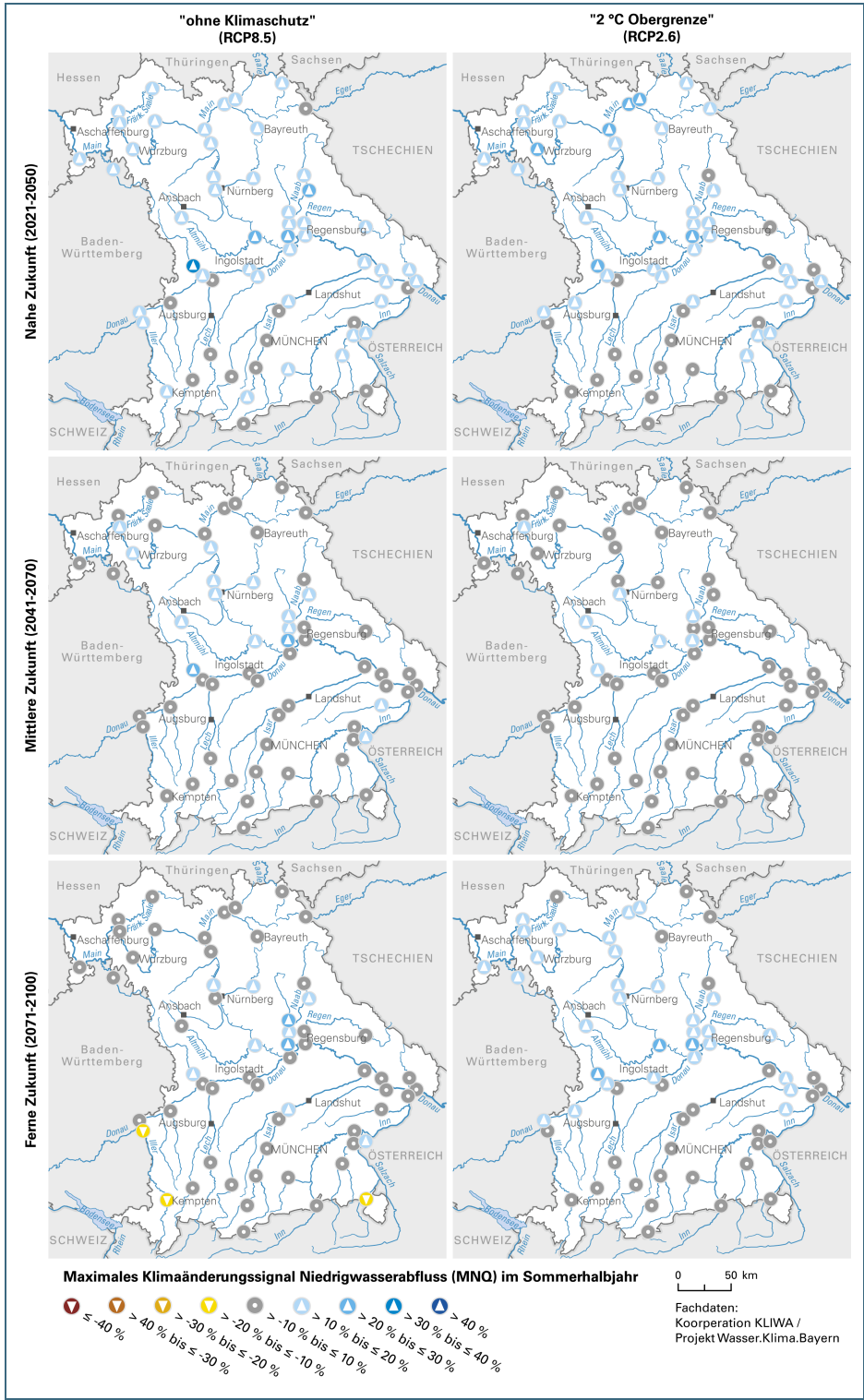


Abb. 86:
Maxima der Klimasig-
nale der 60 Auswerte-
pegel für den MNQ
Sommerhalbjahr

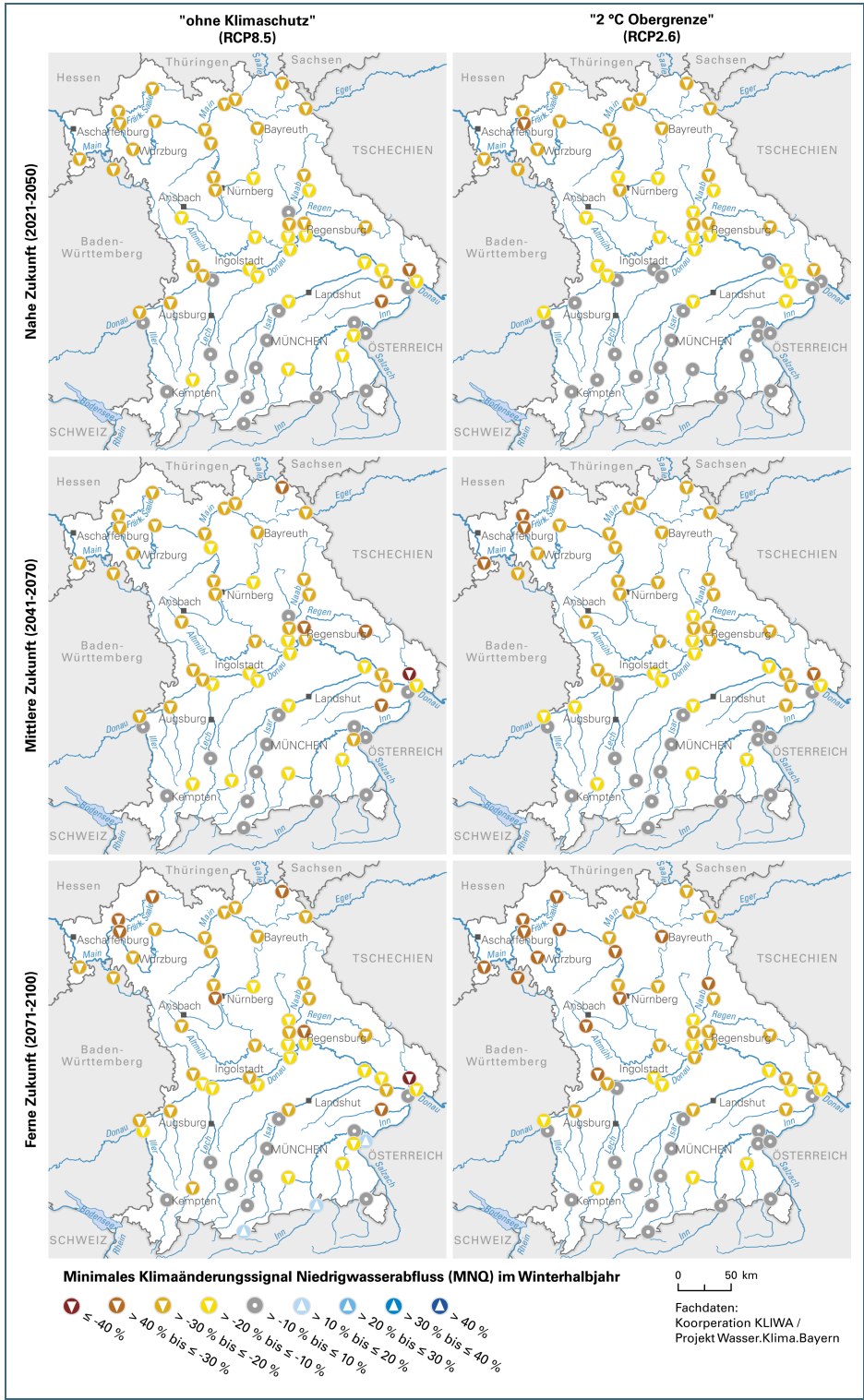


Abb. 87: Minima der Klimasignale der 60 Auswertepegel für den MNQ Winterhalbjahr

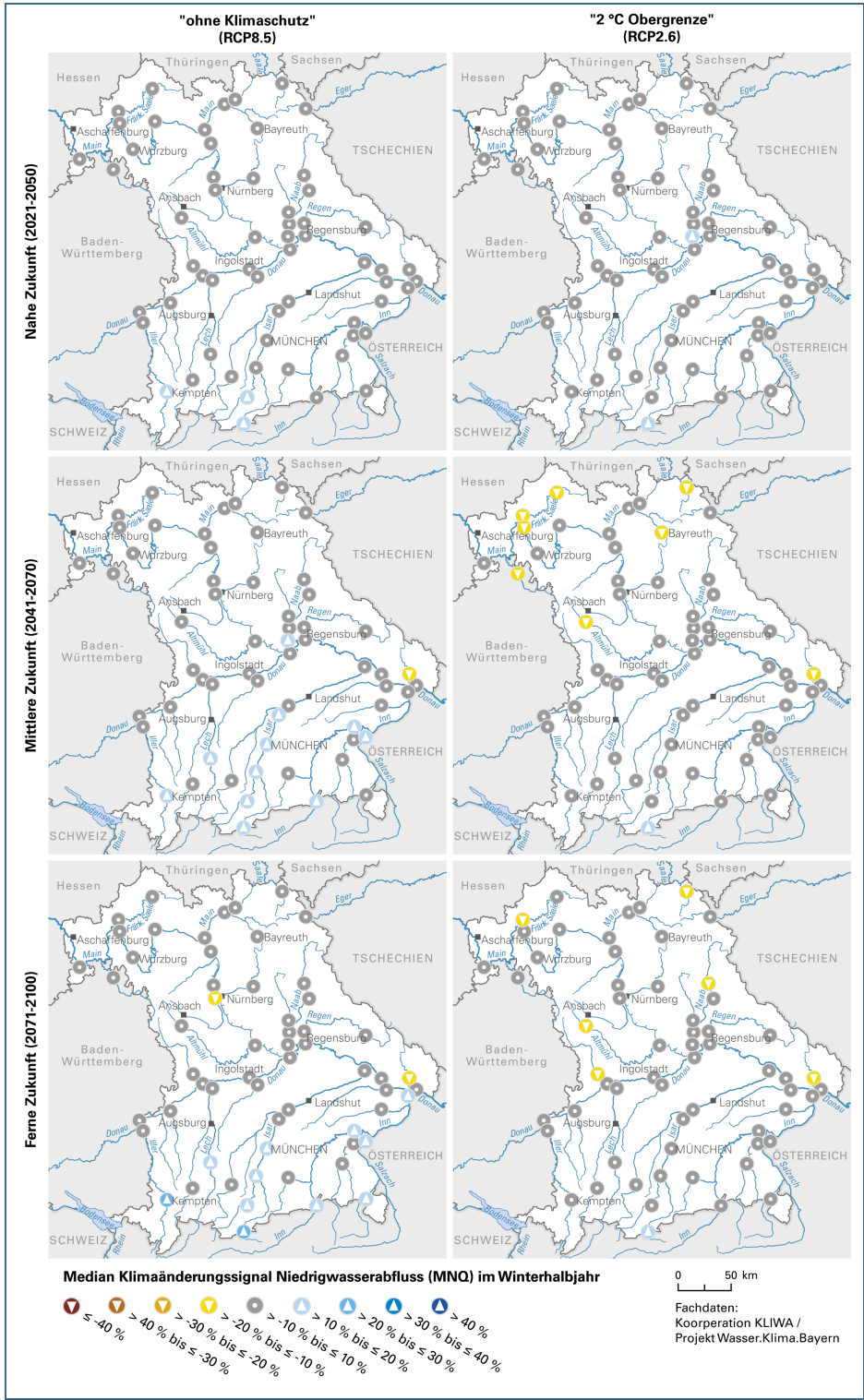


Abb. 88: Median der Klimasignale der 60 Auswertepegel für den MNQ Winterhalbjahr

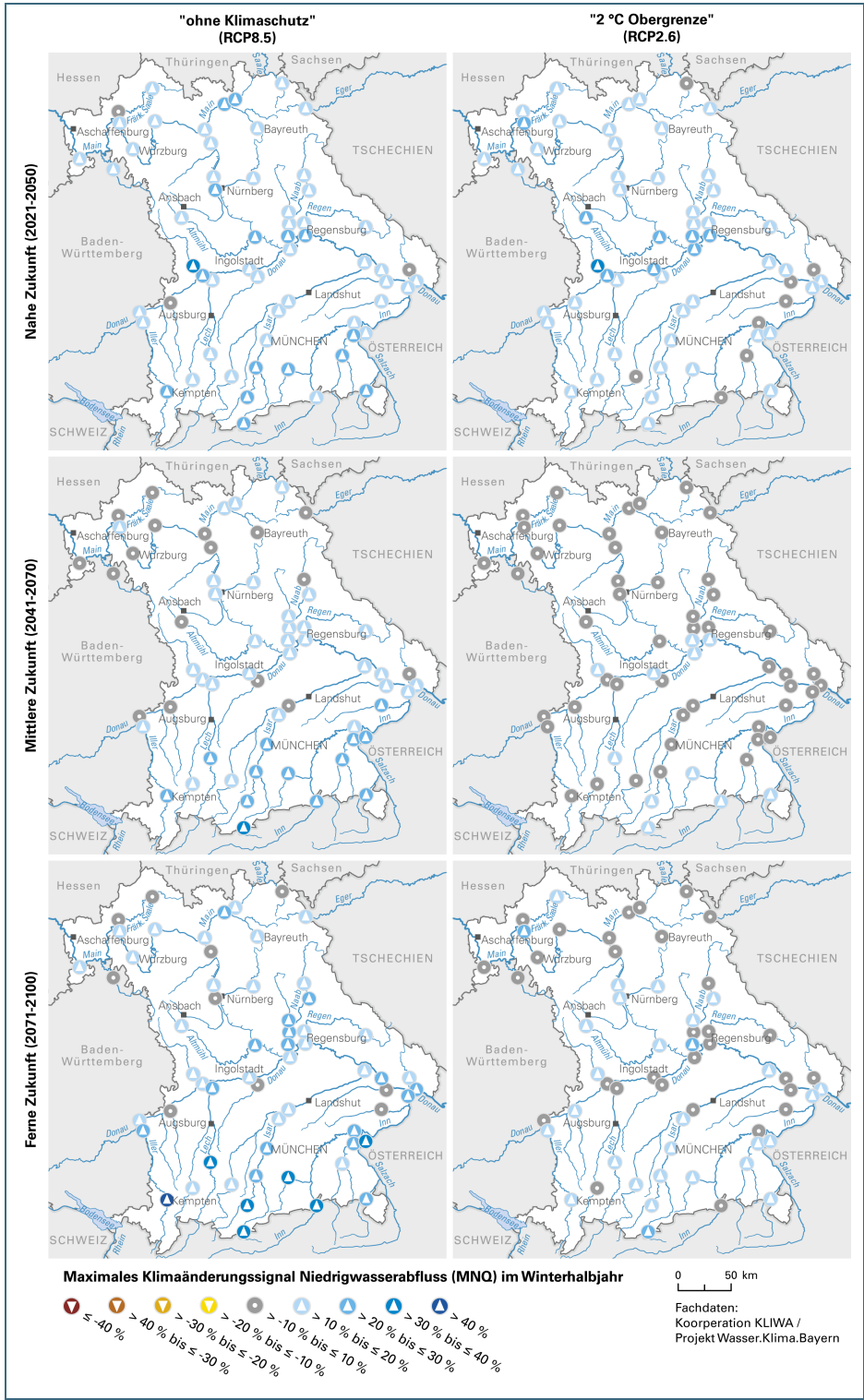


Abb. 89: Maxima der Klimasignale der 60 Auswertepegel für den MNQ Winterhalbjahr

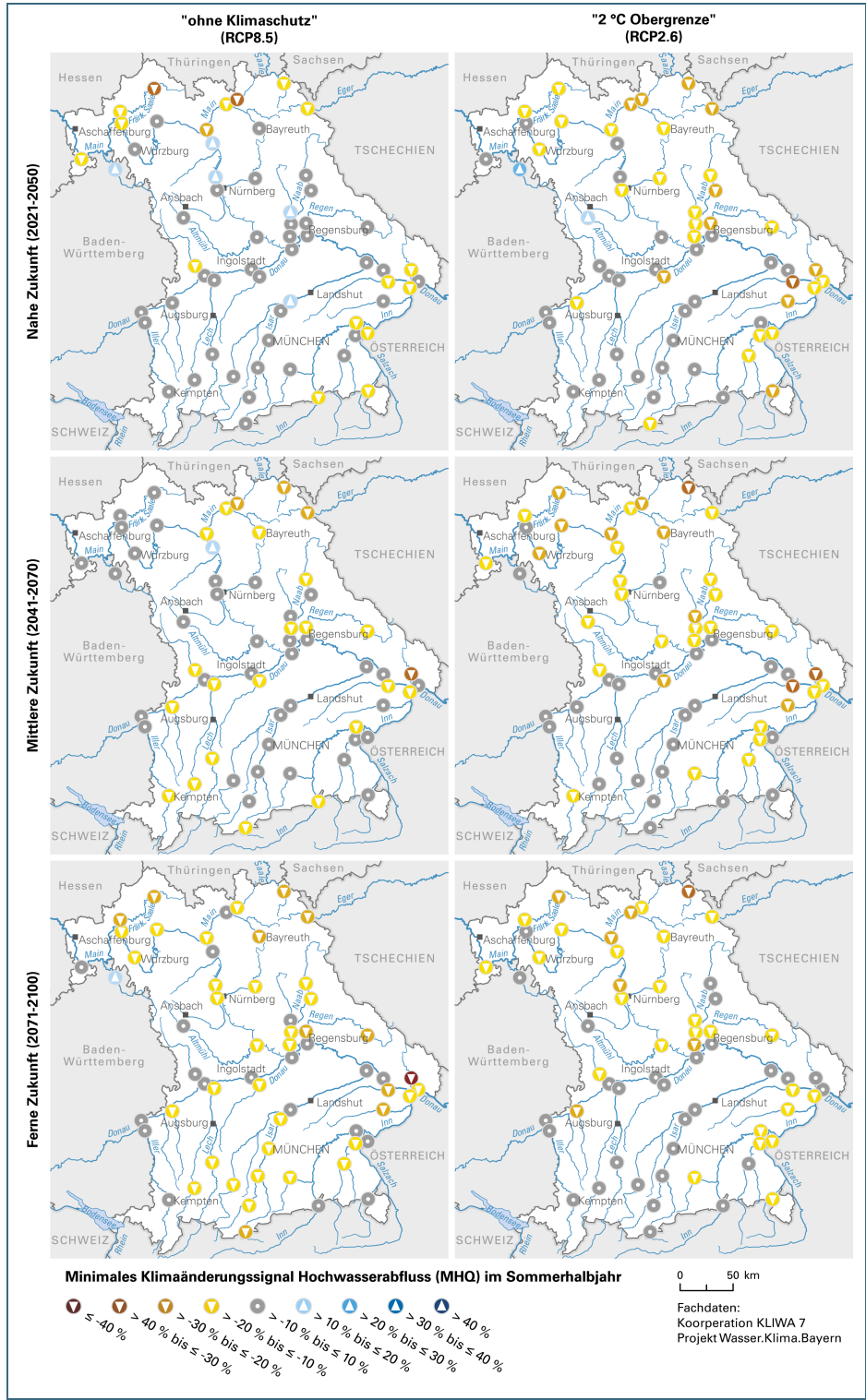


Abb. 90: Minima der Klimasignale der 60 Auswertepegel für den MHQ Sommerhalbjahr

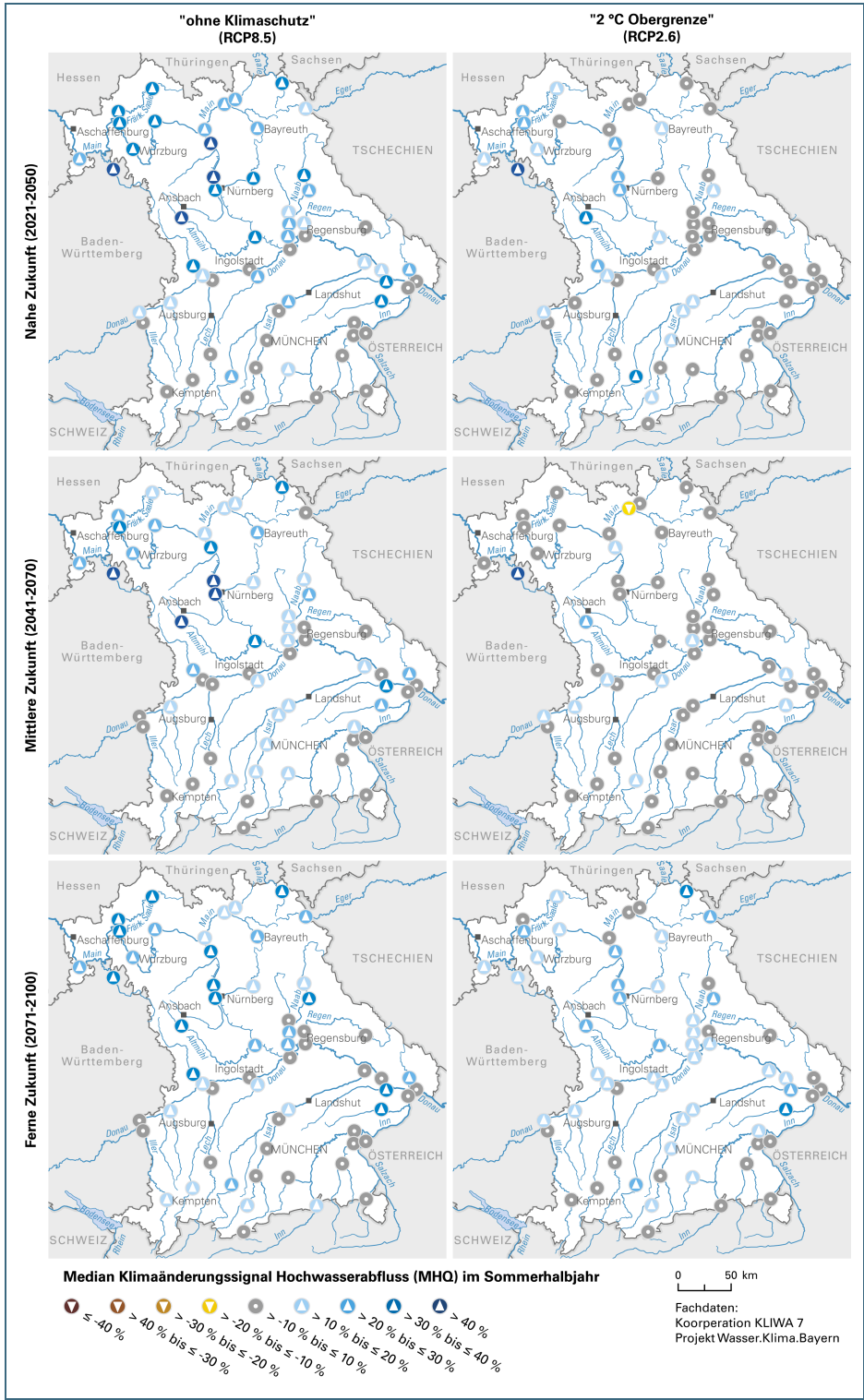


Abb. 91: Median der Klimasignale der 60 Auswertepegel für den MHQ Sommerhalbjahr

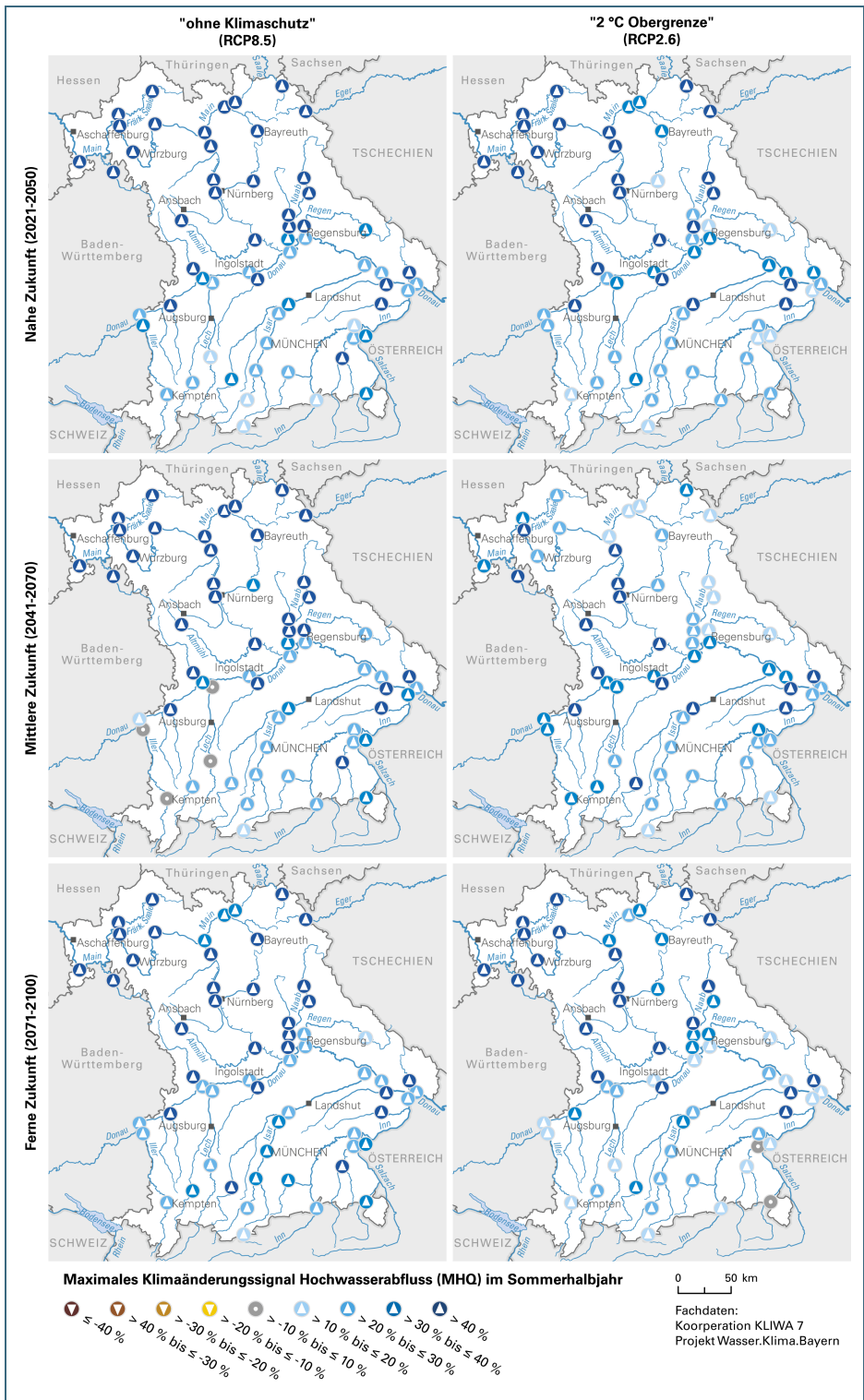


Abb. 92: Maxima der Klimasignale der 60 Auswertepegel für den MHQ Sommerhalbjahr

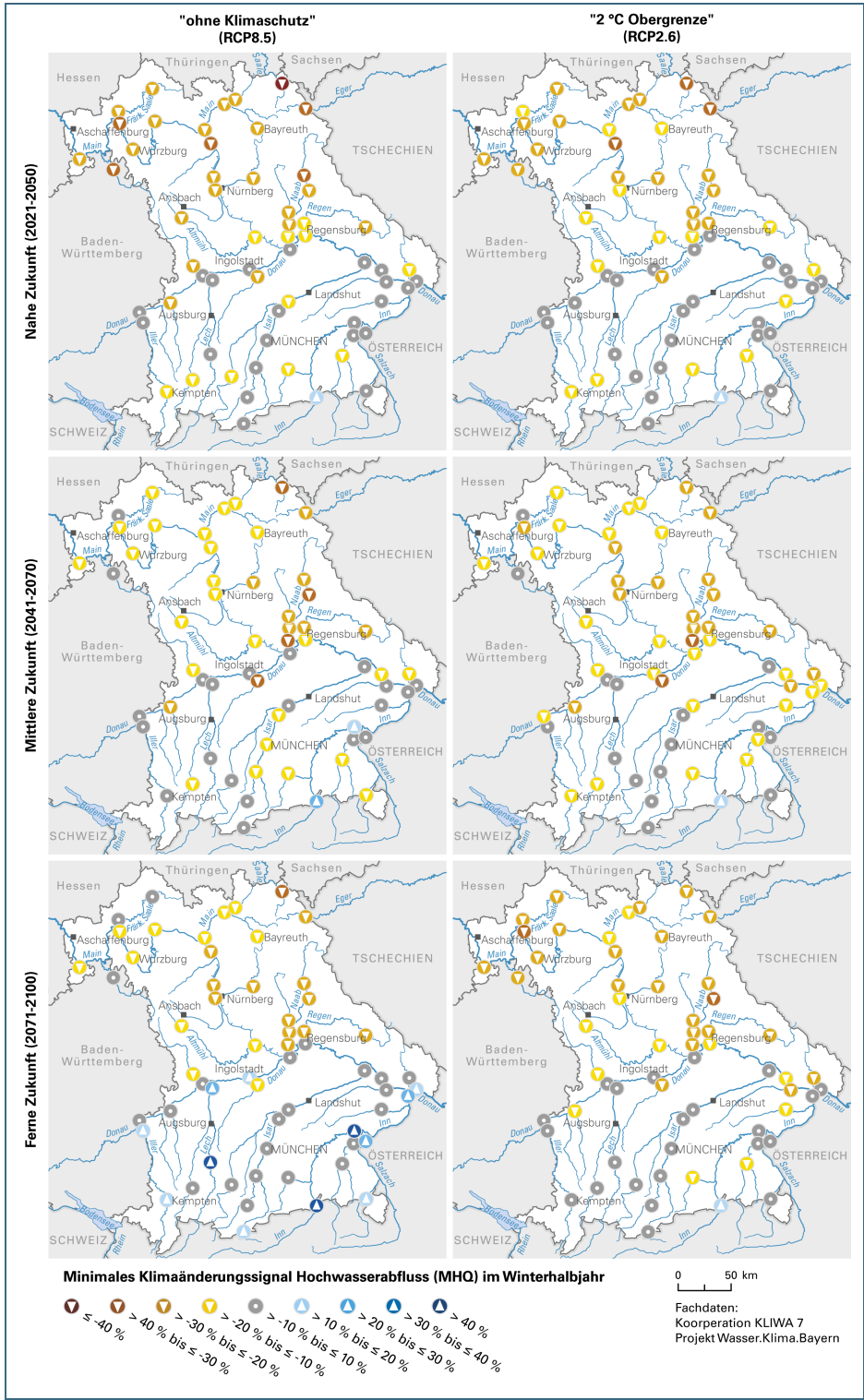


Abb. 93: Minima der Klimasignale der 60 Auswertepegel für den MHQ Winterhalbjahr

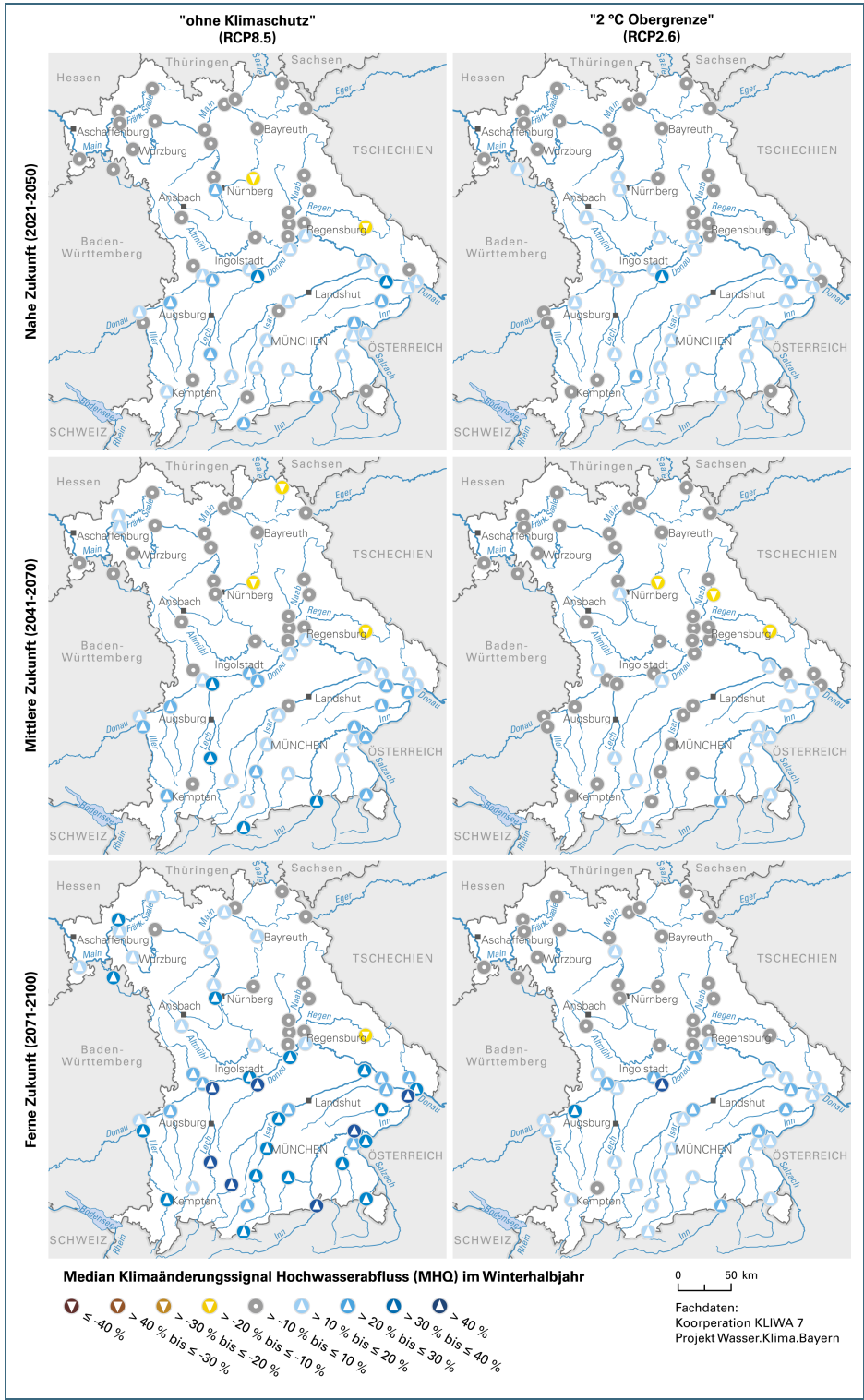


Abb. 94: Median der Klimasignale der 60 Auswertepegel für den MHQ Winterhalbjahr

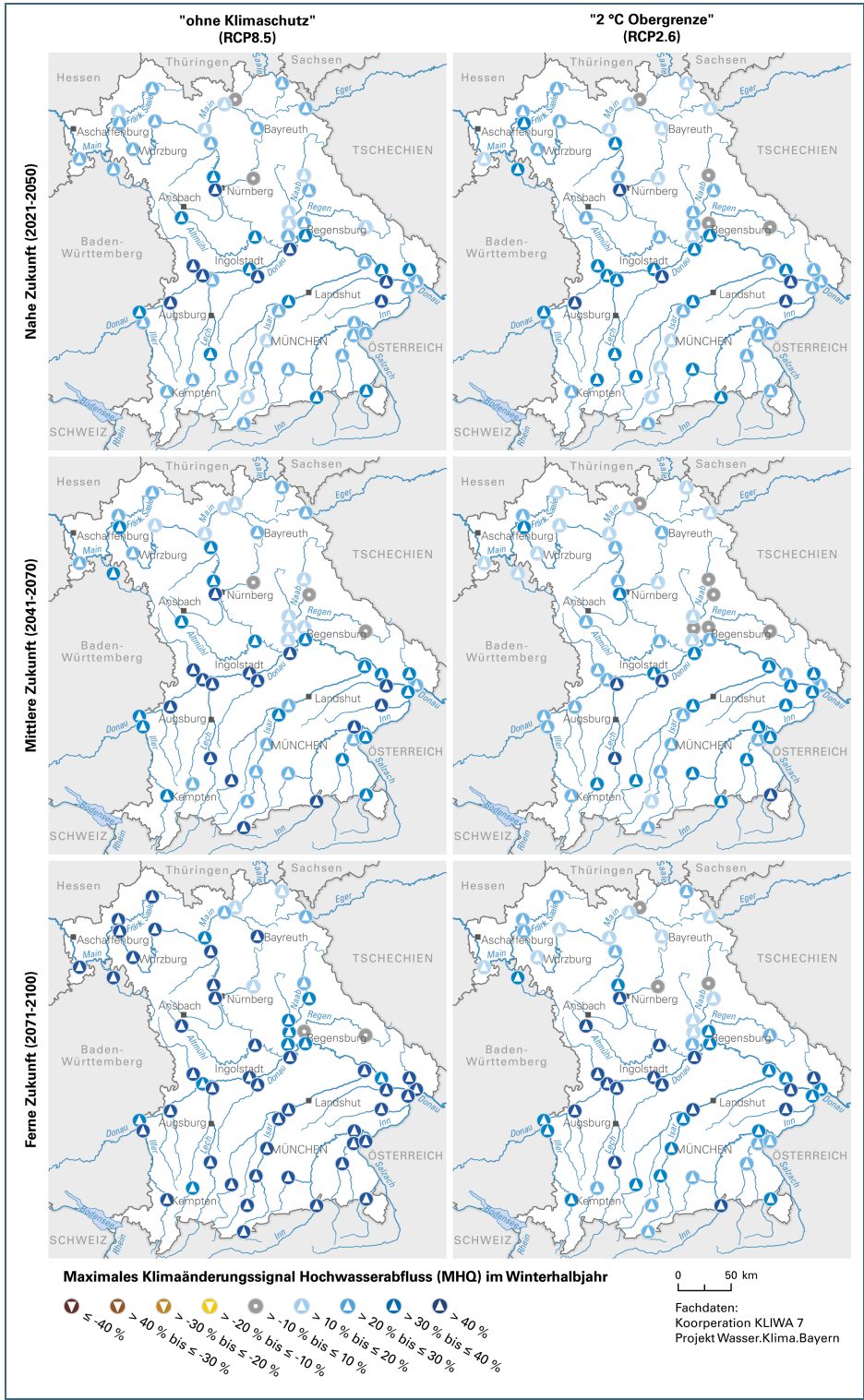


Abb. 95: Maxima der Klimasignale der 60 Auswertepegel für den MHQ Winterhalbjahr

Anhang E: Median der Klimaänderungssignale Niedrigwasserjährlichkeiten

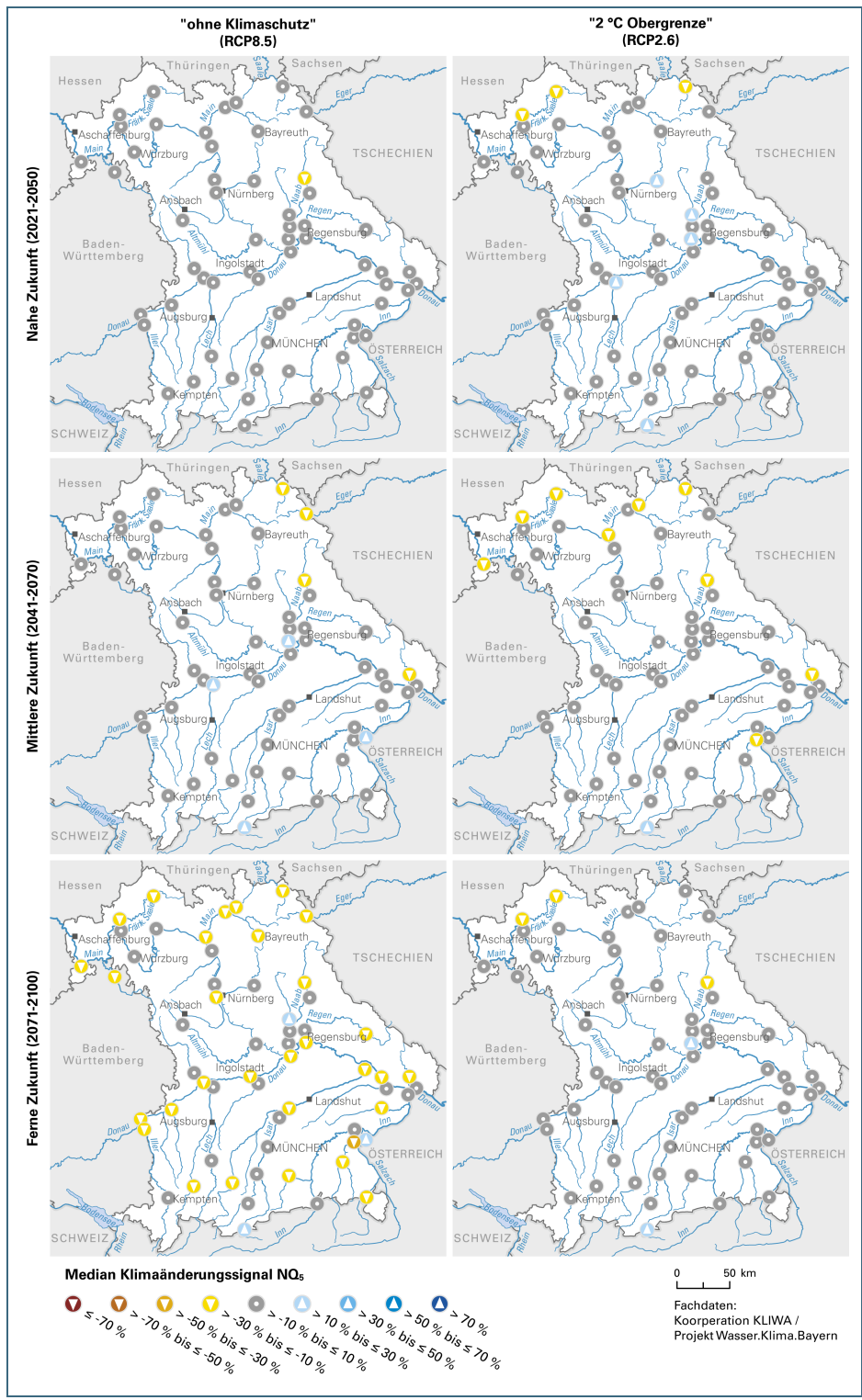


Abb. 96: Median der Klimasignale der 60 Auswertepunkte für den NQ₅

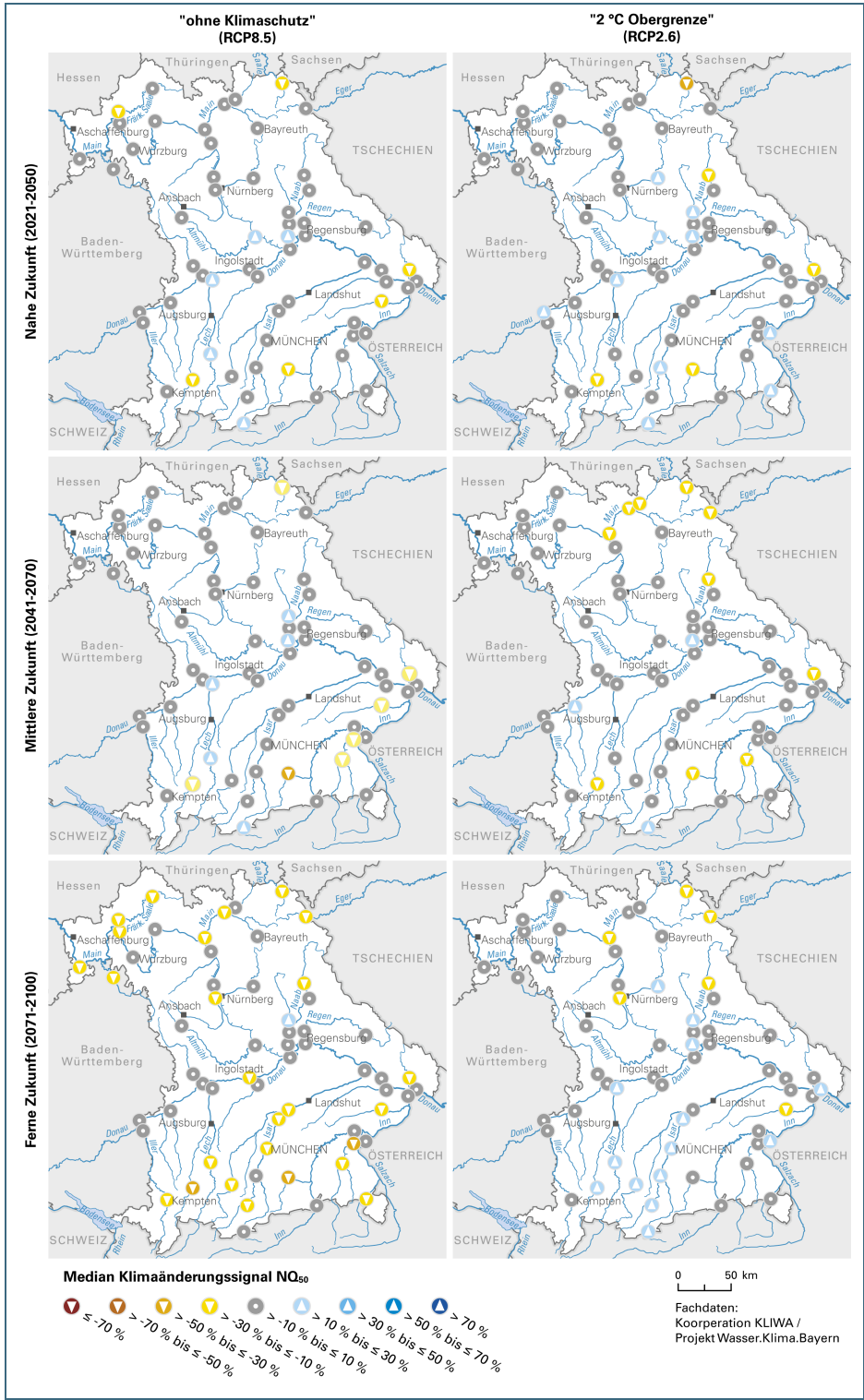


Abb. 97: Median der Klimasignale der 60 Auswertepunkte für den NQ₅₀

Anhang F: Median der Klimaänderungssignale Hochwasserjährlichkeiten

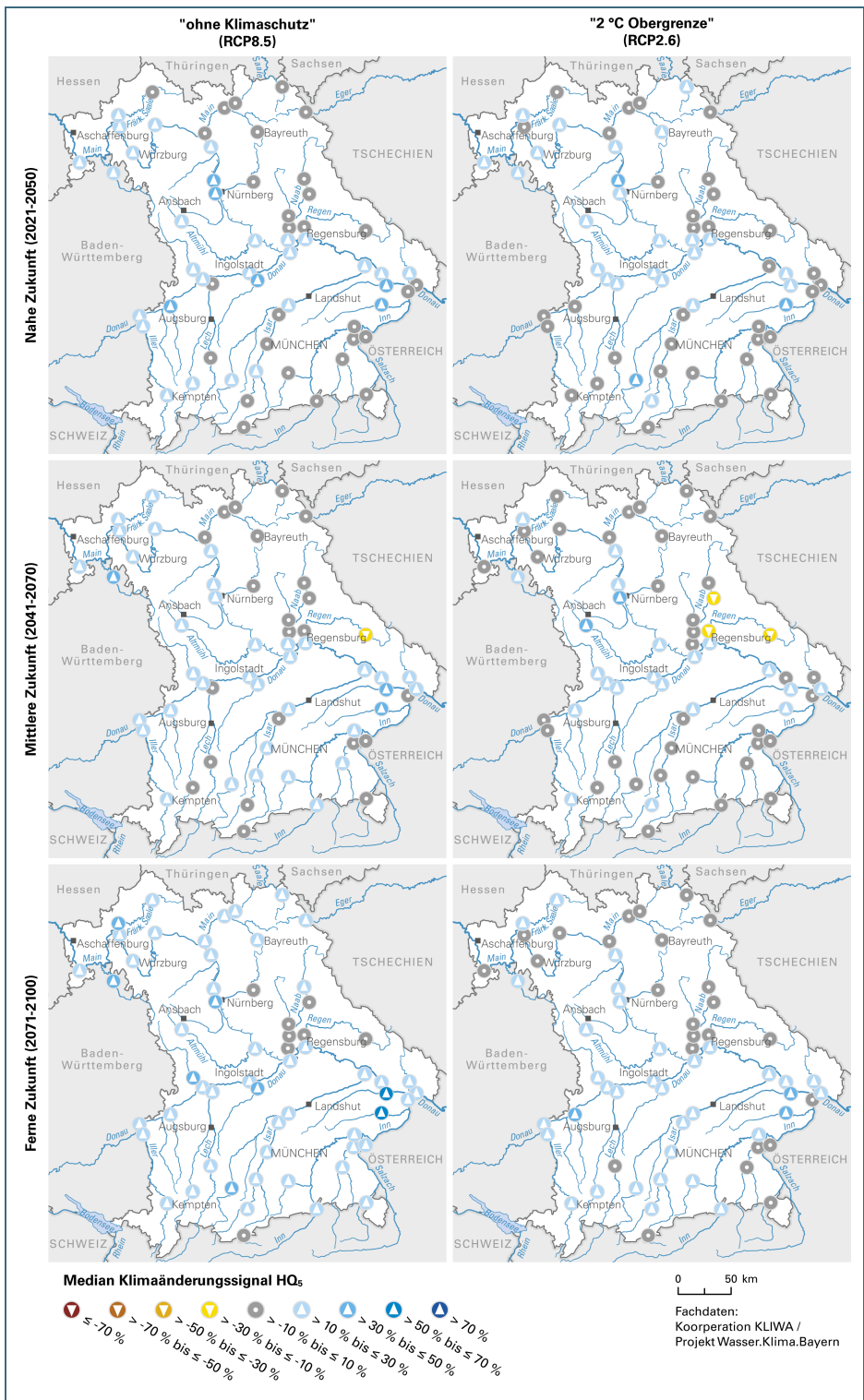


Abb. 98: Median der Klimasignale der 60 Auswertepel für den HQ₅

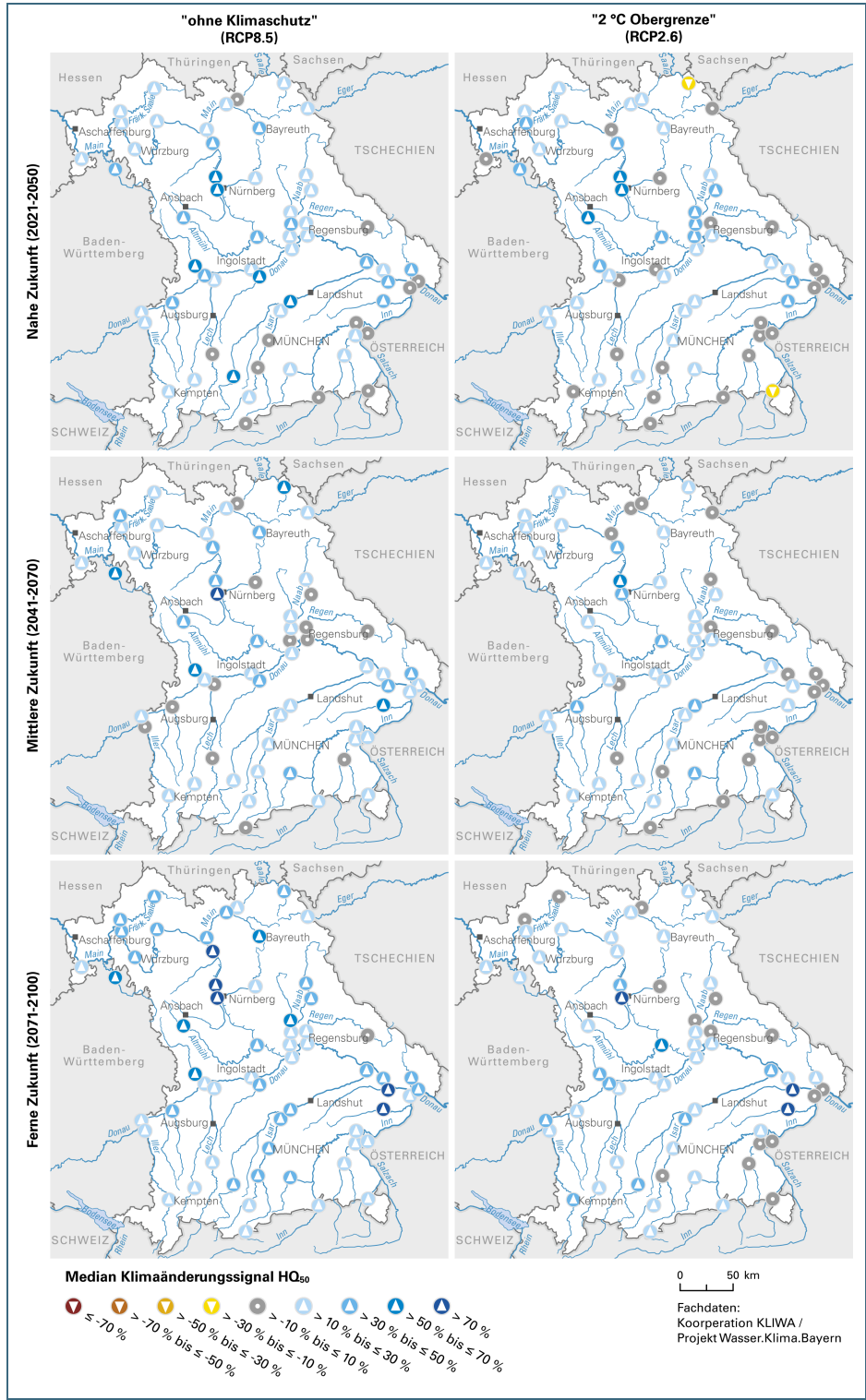


Abb. 99: Median der Klimasignale der 60 Auswertepunkte für den HQ₅₀



Eine Behörde im Geschäftsbereich
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz

