



# Klimaentwicklung und Klimaprojektionen in Nordrhein-Westfalen

Datengrundlage und Wissenschaftlicher Hintergrund  
der Klimaanpassungsstrategie

LANUV-Fachbericht 157



## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung und Hintergrund .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen Klimaszenarien.....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Zukünftige mögliche klimatische Entwicklung in NRW .....</b>	<b>11</b>
3.1	Temperatur, Hitze und Vegetationszeiten .....	13
3.1.1	Lufttemperatur .....	13
3.1.2	Kältebedingte Kenntage .....	16
3.1.3	Hitzebedingte Kenntage .....	17
3.1.4	Hitzewellen .....	20
3.1.5	Vegetationszeit .....	23
3.1.6	Gradtage .....	25
3.2	Niederschlag, Starkregen und Trockenheit .....	28
3.2.1	Niederschlagssumme .....	28
3.2.2	Niederschlags-Kenntage – Starkniederschlag .....	32
3.2.3	Niederschlags-Kenntage – Trockenheit .....	35
3.2.4	Auswirkungen von Trockenheit – Waldbrandgefahr und Waldbrände .....	38
3.3	Wasserversorgung und Schiffbarkeit .....	39
3.3.1	Wasserhaushaltsgrößen .....	39
3.3.2	Klimatische Wasserbilanz .....	43
3.3.3	Beobachtete und mögliche zukünftige Abflüsse/Wasserstände und Auswirkungen auf die Schiffbarkeit am Rheinpegel-Standort Düsseldorf .....	46
3.4	Zusammenfassung und Interpretation.....	52
<b>4</b>	<b>Stand der globalen Klimaschutzbemühungen und Empfehlung zur Szenarienwahl.....</b>	<b>53</b>
<b>5</b>	<b>Fazit .....</b>	<b>58</b>
<b>6</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>61</b>
<b>7</b>	<b>Verzeichnis Karten und Daten aus dem Klimaatlas: .....</b>	<b>66</b>
7.1	Klimaatlas NRW Karten .....	66
7.2	Klimafolgen- und Anpassungsmonitoring (KFAM) im Klimaatlas NRW .....	67
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>69</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>71</b>

# 1 Einleitung und Hintergrund

Der Klimawandel ist in den nordrhein-westfälischen Städten und Gemeinden angekommen. Die Ereignisse der letzten Jahre, wie die Flutkatastrophe 2021, die Hitze- und Dürre-Sommer 2018, 2019 und 2022 mit rekordverdächtigen Niedrigwasserständen an Rhein und Ruhr sowie Waldbränden im Sauerland, aber auch das Hochwasser an Weihnachten 2023 und zum Jahreswechsel 2023/24 haben die Auswirkungen der Klimakrise in Nordrhein-Westfalen (NRW) und der damit einhergehenden gravierenden Folgen für Mensch, Umwelt und Infrastruktur verdeutlicht.

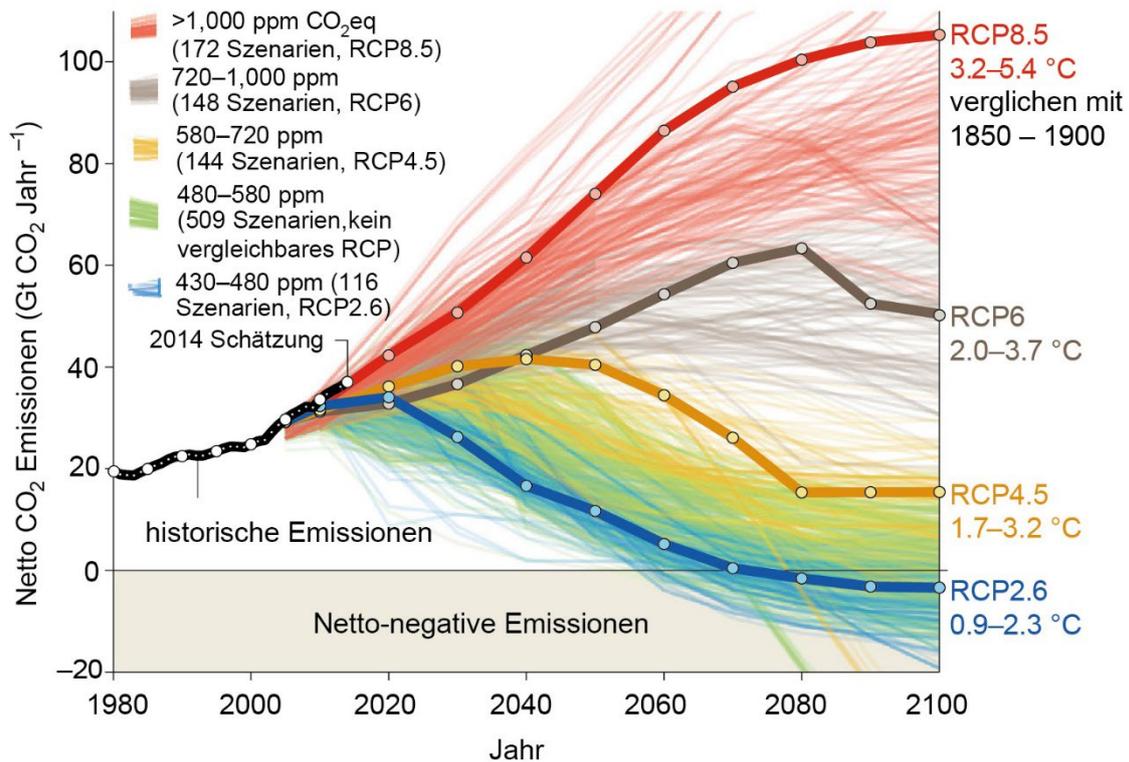
Das Klimaanpassungsgesetz des Landes Nordrhein-Westfalen (KlAnG) aus dem Jahr 2021 hat zum Ziel, die negativen Auswirkungen des Klimawandels zu begrenzen, Schäden zu verringern und die Klimaresilienz zu steigern. Um die Klimaanpassungsziele zu erreichen, erstellt die Landesregierung eine Klimaanpassungsstrategie (§8 KlAnG). Für eine Klimaanpassungsstrategie (KlanS) sind valide Daten zur zukünftigen möglichen Klimaentwicklung eine wichtige Grundvoraussetzung. Nur durch eine bestmögliche Datengrundlage können wahrscheinliche zukünftige negative Klimafolgen antizipiert und entsprechende Gegenmaßnahmen (Klimaschutz und Klimafolgenanpassung) entwickelt werden. Dem Landesamt für Umwelt, Natur und Verbraucherschutz (LANUV) wurde die Aufgabe übertragen, wissenschaftliche Datengrundlagen und Instrumente zur Unterstützung der Akteurinnen und Akteure der Klimaanpassung zu erarbeiten und bereitzustellen (§10 KlAnG). Auftragsgemäß recherchiert das LANUV entsprechende Daten, bereitet diese für NRW auf und veröffentlicht sie im Klimaatlas NRW ([www.klimaatlas.nrw.de](http://www.klimaatlas.nrw.de)) sowohl in der dortigen Kartenanwendung als auch im Klimafolgen- und Anpassungsmonitoring (KFAM).

Der hier vorliegende Fachbericht gibt zunächst eine Übersicht über die Grundlagen der Klimaprojektion und -szenarien sowie deren Verfügbarkeit für NRW. Anschließend wird die mögliche klimatische Entwicklung in NRW anhand der Klimaprojektionen beschrieben und mit Hilfe der Beobachtungen und bereits erfolgten Klimaveränderungen eingeordnet. Abschließend ordnet er ein, auf welchem Pfad der Treibhausgasemissionen und damit der globalen Erwärmung sich Deutschland und die Staatengemeinschaft befinden. Darauf aufbauend wird eine Empfehlung gegeben, welche Klimaszenarien als Grundlage für die Ableitung von Anpassungsmaßnahmen verwendet werden sollten. Damit liefert das LANUV den wissenschaftlichen Hintergrund für die neue Klimaanpassungsstrategie (KlanS) des Landes Nordrhein-Westfalen. Alle in diesem Bericht aufgezeigten Daten und die damit verbundenen Karten werden im Klimaatlas NRW veröffentlicht, wo sie entsprechend auch zur Weiterverarbeitung heruntergeladen werden können.

## 2 Grundlagen Klimaszenarien

Während das Klima der Vergangenheit und Gegenwart in Nordrhein-Westfalen durch meteorologische Daten und Beobachtungen gut beschrieben werden kann (vgl. LANUV 2021a), müssen für Aussagen zu möglichen zukünftigen Klimaentwicklungen physikalische Rechenmodelle herangezogen werden, die man auch als globale Klimamodelle bezeichnet. Globale Klimamodelle beschreiben jene Prozesse im Klimasystem, wie zum Beispiel Strömungsvorgänge in Atmosphäre und Ozeanen in Abhängigkeit auf die im System befindliche Energie, die in Temperatur und Wasserdampfgehalt ausgedrückt werden kann. Durch die Anwendung physikalischer Grundgleichungen (z. B. Massen-, Impuls- und Energieerhaltungsgesetze) sowie die Hauptsätze der Thermodynamik können vereinfacht Klimaänderungen vorausberechnet werden, je nachdem, wieviel Energie dem System zusätzlich hinzugefügt wird. Mit Hilfe von Klimaszenarien kann bestimmt werden, wieviel Energie in das System der jeweiligen Klimamodelle gegeben wird, um entsprechende Klimaänderungen, primär Temperaturanstiege und daran gekoppelte Klimawirkungen, für bestimmte Zukunftszeiträume zu projizieren. Da die zusätzliche Energie, die in das globale Klimasystem gelangen kann, vom Erfolg oder Misserfolg beim Klimaschutz abhängig ist, spricht man von Klimaprojektionen, und nicht von Klimaprognosen, wie es bei der Wettervorhersage mit den Wetterprognosen üblich ist und wo die Eingangsparameter bereits feststehen. Um Klimaprojektionen einen Rahmen zu geben, wohin die möglichen modellierten Klimaänderungen gehen sollen, braucht es einen konzeptionellen Hintergrund, womit sich die potenziellen Klimabedingungen der Zukunft beschreiben lassen. Hierfür werden sogenannte Klimaszenarien verwendet. Diese Klimaszenarien können sinnbildlich mit verschiedenen „Drehbüchern“ verglichen werden, in denen der Klimaschutz unterschiedlich gut gelingt und entsprechende Bedingungen vorgegeben werden. Die Klimamodelle wiederum spielen anhand der vorgegebenen Bedingungen die physikalischen Folge-Effekte auf das Weltklima und letztendlich auch die klimatischen Bedingungen in NRW durch.

Die aktuell verwendeten Klimaszenarien, die mit dem 5. Sachstandsbericht des Weltklimarates im Jahr 2013 als Standard für Klimamodelle eingeführt wurden, werden als „RCP-Szenarien“ bezeichnet. Die Abkürzung RCP steht für die englische Bezeichnung „*Representative Concentration Pathways*“, übersetzt für die „Repräsentativen Konzentrationspfade“. Es gibt insgesamt vier RCP-Szenarien, die wie folgt benannt werden: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 und RCP8.5 (VAN VUUREN et al. 2011). Die RCP-Szenarien stehen stellvertretend für eine Vielzahl seinerzeit entwickelter Klimaszenarien, die alle nach bestimmten Treibhausgaskonzentrationsklassen eingeteilt wurden. Abbildung 1 stellt die Auswahl der repräsentativen Konzentrationspfade dar.



**Abbildung 1:** Auswahl der repräsentativen Konzentrationspfade (RCP) aus einer Vielzahl an Szenarien, die je nach Treibhausgaskonzentration klassifiziert sind (Quelle: Fuss et al. 2014).

Die Zahlen 2.6, 4.5, 6.0 und 8.5 stehen für die zusätzliche Energie, welche durch angenommene verstärkte Treibhausgasemissionen und -konzentrationen (in der Atmosphäre) auf das Klimasystem wirken. So stellt das RCP2.6-Szenario eine Verstärkung des Strahlungsantriebes gegenüber der vorindustriellen Zeit (1850–1900) von 2,6 Watt pro Quadratmeter (W/m<sup>2</sup>) im Jahr 2100 dar. Für die Szenarien RCP4.5 bis RCP8.5 werden entsprechend stärkere Anstiege des Strahlungsantriebes angenommen. Der Strahlungsantrieb (von engl. *radiative forcing*) bezeichnet den durch die veränderten Treibhausgaskonzentrationen bedingten Einfluss des Menschen auf die natürliche Strahlungs- und Energiebilanz der Erde.

Die Veränderungen der Treibhausgaskonzentrationen werden durch Pfade bestimmt, die wie eine Art Drehbuch zu verstehen sind. Wenn zum Beispiel während der Zeit 1850–1900 die Konzentration von CO<sub>2</sub>, dem bedeutendsten Treibhausgas, ca. 280 ppm (*parts per million*) in der Atmosphäre betrug, geht der Pfad beim RCP2.6-Szenario hoch bis auf eine Konzentration von ~ 490 ppm CO<sub>2</sub>-Äquivalente (Treibhausgaskonzentrationen von stärker klimawirksamen Treibhausgasen als CO<sub>2</sub> werden in CO<sub>2</sub>-Äquivalente umgerechnet). Die Besonderheit beim RCP2.6-Szenario ist, dass dieses Maximum der Treibhausgaskonzentration vor dem Jahr 2100 erreicht wird (Strahlungsantrieb von bis zu 3 W/m<sup>2</sup> nach 2050) und dann wieder absinkt. Ein solches Szenario wird auch als sogenanntes „overshoot-“ oder „Überschuss-Szenario“ bezeichnet, weil hier die Treibhausgaskonzentrationen wieder geringer werden. Das RCP2.6-Szenario entspricht einem Pfad, bei welchem die globale Erwärmung im Median bei 1,6 Grad Celsius (°C), also unter 2 °C, gegenüber der vorindustriellen Zeit liegt. Ein entsprechendes Erwärmungslimit von 2 °C wurde bereits im Jahr 2009 auf der Weltklimakonferenz in Cancun

beschlossen (und in Paris 2015 verschärft). Daher wird dieses Szenario auch als „Klimaschutz-Szenario“ bezeichnet. Beim RCP4.5-Szenario wird von einem zusätzlichen Strahlungsantrieb von 4,5 W/m<sup>2</sup> im Jahr 2100 ausgegangen. Die dafür notwendige Konzentration an CO<sub>2</sub>-äquivalenten Treibhausgasen stabilisiert sich zum Ende des Jahrhunderts auf einem hohen Niveau von ~ 650 ppm. Beim RCP4.5-Szenario gibt es keinen Rückgang der Treibhausgaskonzentration. Der in diesem „Stabilisierungsszenario“ eingeschlagene Pfad der globalen Erwärmung liegt im Median bei 2,4 °C gegenüber der vorindustriellen Zeit, weshalb dieses Szenario auch als „moderates Szenario“ bezeichnet wird. Das RCP6.0-Szenario, welches generell wenig verbreitet ist, ist ebenfalls ein Stabilisierungsszenario mit einem entsprechend noch höheren Strahlungsantrieb und einer nochmals gestiegenen Treibhausgaskonzentration von ~ 850 ppm nach dem Jahr 2100. Das RCP6.0-Szenario repräsentiert eine weitere Erwärmung von bis zu 2,8 °C im Median gegenüber dem globalen Temperaturniveau 1850–1900. Das RCP8.5-Szenario ist von allen RCP-Szenarien jenes mit der weitesten Verbreitung und den meisten Modellläufen. Der Grund hierfür besteht darin, dass dieses Szenario die mit Abstand stärkste mögliche Erderwärmung repräsentiert. Entgegen den anderen bisher vorgestellten Szenarien ist das RCP8.5-Szenario eines mit stetig steigenden Treibhausgaskonzentrationen, die auch noch nach 2100 weiter steigen werden. Demnach wird 2100 ein zusätzlicher Strahlungsantrieb von 8,5 W/m<sup>2</sup> bei ~ 1370 ppm CO<sub>2</sub>-Äquivalenten erreicht werden, der ebenfalls noch weiter steigen wird. Mit einem Temperaturanstieg von über 4 °C (4,3 °C im Median) im Jahr 2100 gegenüber der vorindustriellen Zeit und einem stetigen Anstieg der Treibhausgaskonzentration wird dieses Szenario auch als „weiter-wie-bisher-Szenario“ oder „Hochemissions-Szenario“ bezeichnet.

In der folgenden Tabelle 1 werden die vier RCP-Szenarien einmal zusammenfassend gegenübergestellt. Zusätzlich dient Abbildung 1 der Veranschaulichung der Temperaturpfade gemäß der RCP-Szenarien.

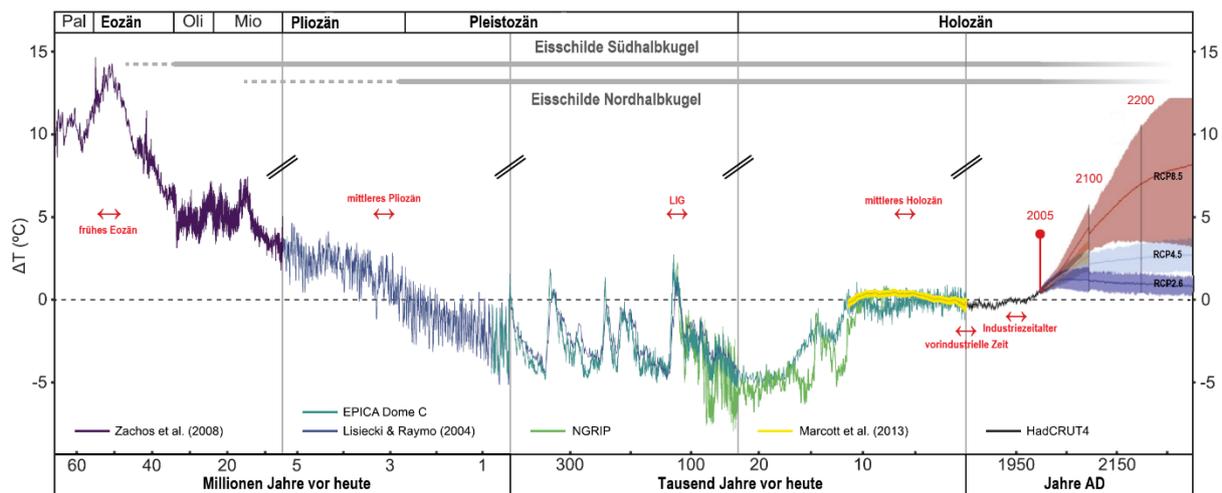
**Tabelle 1:** Überblick über die RCP-Szenarien globale Perspektive (Quelle: IPCC 2014, VAN VUUREN et al. 2011)

RCP-Szenario	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
Zusätzlicher Strahlungsantrieb 2100 gegenüber 1850–1900	2,6 W/m <sup>2</sup>	4,5 W/m <sup>2</sup>	6,0 W/m <sup>2</sup>	8,5 W/m <sup>2</sup>
Treibhausgaskonzentration 2100 in der Atmosphäre (zum Vergleich 1850–1900: ~ 280 ppm)	~ 490 ppm CO <sub>2</sub> -Äquivalent	~ 650 ppm CO <sub>2</sub> -Äquivalent	~ 850 ppm CO <sub>2</sub> -Äquivalent	~ 1370 ppm CO <sub>2</sub> -Äquivalent
Temperaturanstieg 2100 gegenüber 1850–1900 (05.–95. Perzentil, 50. Perzentil bzw. Median)	0,9–2,3 °C, 1,6 °C	1,7–3,2 °C, 2,4 °C	2,0–3,7 °C, 2,8 °C	3,2–5,4 °C, 4,3 °C

Um die verfügbaren RCP-Szenarien, die allesamt mögliche und vermeidbare Zukunftspfade repräsentieren, einordnen zu können, ist es sehr hilfreich, die Erdgeschichte zu betrachten. Wie bereits erwähnt, lag die CO<sub>2</sub>-Konzentration in vorindustrieller Zeit, also im Zeitraum 1850–1900, bei ca. 280 ppm. Dieses Niveau wurde in den letzten 800.000 Jahren nie übertroffen, wie Eisbohrkerne deutlich belegen (LÜTHI et al. 2008). Für den Zeitraum 2011 bis 2020 lag die mittlere jährliche Treibhausgaskonzentration bei 410 ppm allein für CO<sub>2</sub>, zusätzlich kommen

noch andere Treibhausgase wie Methan und Lachgas hinzu. Im gleichen Zeitraum liegt der globale Temperaturanstieg bei 1,1 °C gegenüber der vorindustriellen Zeit (IPCC 2023). Im Jahr 2023 betrug die globale CO<sub>2</sub>-Konzentration bereits rund 424 ppm und lag damit so hoch wie zuletzt vor 3,3 Millionen Jahren. Der rasante Anstieg der Konzentration des wichtigsten Treibhausgases CO<sub>2</sub> um 50 % innerhalb so kurzer Zeit ist für die letzten 66 Millionen Jahre mit hoher Wahrscheinlichkeit beispiellos (ZEEBE et al. 2016).

Die bei den RCP-Szenarien angenommenen Treibhausgaskonzentrationen und daraus resultierenden globalen Temperaturen (vgl. Tabelle 1) gab es zuletzt in einem Zeitraum wie vor 3–40 Millionen Jahren (Abbildung 2), als die Erde noch völlig anders aussah und von ganz anderen Pflanzen und Tieren bevölkert war. Zum Teil war selbst die Antarktis eisfrei und es herrschte ein sogenanntes „hot house“-Klima oder auch „Heißzeit“. In Abbildung 2 werden die möglichen globalen Temperaturverläufe der drei RCP Szenarien 2.6, 4.5 und 8.5 bis 2300 nach Christus (AD) auf der rechten Seite des Diagramms mit aus unterschiedlichen Archiven stammenden Temperaturdaten der letzten 66 Millionen Jahre verglichen (BURKE et al. 2018). Die Basislinie wird durch die globalen Temperaturen der Klimanormalperiode 1961–1990 dargestellt.



**Abbildung 2:** Globale Temperaturrekonstruktionen der letzten 66 Millionen Jahre (Quelle: BURKE et al. 2018). Zur Beachtung: die X-Achse enthält Skalensprünge, um der zeitlichen Auflösung der unterschiedlichen Datenarchive gerecht zu werden.

Noch kann eine solche Klima-Zukunft, vergleichbar zu den „hot house“-Phasen der geologischen Vergangenheit, verhindert werden, je nachdem, ob es gelingt, die möglichen Zukunftspfade der Treibhausgasemissionen in den Grenzen unterhalb der 2 °C-Grenze zu halten oder nicht (STEFFEN et al. 2018). Da die aktuell überall auf der Welt sichtbaren Folgen der Erwärmung von knapp 1,1 °C bereits jetzt auftreten und negativ spürbar werden, ist auch nachvollziehbar, dass diese sich bei einer höheren Erwärmung noch deutlich verstärken werden. Bereits heute gibt es überall auf der Welt zunehmend extreme Wetter- und Witterungsereignisse, die in ihrem Ausmaß bisher unbekannt waren. Im aktuellen Berichtszyklus des Weltklimarates (2021–2023) werden die bis heute eingetretenen negativen Effekte der globalen Erwärmung deutlich beschrieben. Daher wäre es dringend zu empfehlen, nicht nur unterhalb der 2 °C-Grenze zu bleiben, sondern das in Paris 2015 beschlossene Ziel einzuhalten, eine globale

Erwärmung von 1,5 °C nicht zu überschreiten, um die Folgen der globalen Erwärmung möglichst gering und beherrschbar zu halten.

Fest steht: Es sollte unter allen Umständen vermieden werden, auf einen Pfad wärmer als 2 °C zu kommen. Der aktuelle Berichtszyklus des Weltklimarates (IPCC 2021–2023) ist hier eindeutig. Bereits bei einer globalen Erwärmung von 1,5 °C gibt es in einigen Bereichen keine Anpassungsspielräume mehr. Ab 2 °C globaler Erwärmung werden sich die Lebensbedingungen für alle Menschen dauerhaft deutlich verschlechtern. Jedes Zehntelgrad unterhalb der 2 °C-Grenze hilft, existenzielle Risiken für die gesamte Menschheit und die Natur zu verringern.

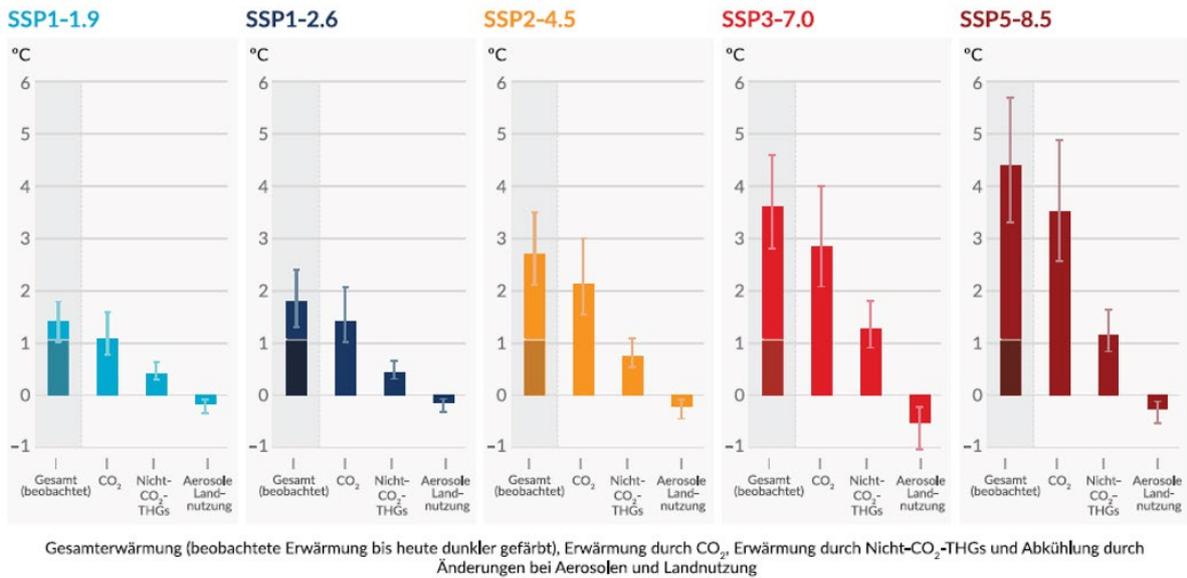
Mit dem 6. Sachstandsbericht (2021–2023) des Weltklimarats (IPCC 2021, 2022a, 2022b, 2023) wurden die Klimaszenarien weiterentwickelt. Neben dem schon bekannten Ansatz zum Strahlungsantrieb und den damit verknüpften Konzentrationen an Treibhausgasen im Jahr 2100 arbeiten die Nachfolgeszenarien mit einer Kombination aus den RCP-Szenarien und den sogenannten „*Shared Socioeconomic Pathways*“ (SSP), den „gemeinsam genutzten sozio-ökonomischen Pfaden“, die einen bestimmten, dem jeweiligen Szenario zugrundeliegenden, sozioökonomischen Trend beschreiben. Gemeinsam mit dem aus den RCP-Szenarien bekannten Abkürzungen zum zusätzlichen Strahlungsantrieb gegenüber vorindustriellem Niveau lassen sich so mögliche zukünftige Pfade nochmals genauer beschreiben. Nach RIAHI et al. (2017) gibt es fünf sogenannte Narrative, die von SSP1 bis SSP5 von einer sehr nachhaltigen bis zu einer voll-fossilen Zukunft handeln:

- SSP1: Der nachhaltige und grüne Weg
- SSP2: Der mittlere Weg
- SSP3: Regionale Rivalitäten
- SSP4: Ungleichheit
- SSP5: Die fossile Entwicklung

Jedes SSP-Szenario unterliegt bestimmten Annahmen zur Wirtschaftsentwicklung, Bevölkerungswachstum, Energie- und Landverbrauch inklusive einer deutlich detaillierteren Struktur der Treibhausgas-Emissionen als es bei den RCP-Szenarien der Fall ist. Aus der Kombination der RCP-Szenarien mit den SSP-Szenarien folgen die neuen Klimaszenarien **SSP1-1.9**, **SSP1-2.6**, **SSP2-4.5**, **SSP3-7.0** und **SSP5-8.5**, die im 6. Sachstandsbericht des Weltklimarats verwendet wurden (IPCC 2023).

In Abbildung 3 werden die **Szenarien-Kombinationen** samt den resultierenden Erwärmungsniveaus dargestellt. Lediglich das Szenario SSP1-1.9 stellt das Einhalten der überaus wichtigen 1,5 °C-Grenze gegenüber vorindustrieller Zeit dar. Das SSP1-2.6-Szenario repräsentiert entsprechend die 2 °C-Grenze.

Änderung der globalen Oberflächentemperatur 2081–2100 gegenüber 1850–1900 (°C)



**Abbildung 3:** Die möglichen Erwärmungspfade nach den aktuellen SSP-RCP Szenarien-Kombinationen (Quelle: IPCC 2021).

Die in Kapitel 3 beschriebenen Klimaprojektionen für NRW basieren noch auf den RCP-Szenarien, da die neuen SSP-RCP-Kombinationen (Stand Juli 2024) noch nicht für Deutschland und somit NRW regionalisiert vorliegen. Vom Deutschen Wetterdienst (DWD) werden die Szenarien RCP2.6 („Klimaschutz“-Szenario), RCP4.5 („moderates“ Szenario) und RCP8.5 („weiter-wie-bisher“-Szenario) bereitgestellt. Das Szenario RCP6.0 steht nicht zur Verfügung und kann demnach weder im Klimaatlas NRW noch in diesem Fachbericht dargestellt werden. Die Modellergebnisse der drei verfügbaren RCP-Szenarien liegen für NRW in einer Gitterweite von 5 Kilometern vor. Diese wurden 2018 durch den Deutschen Wetterdienst bereitgestellt. Hierdurch sind im Gegensatz zur Gitterweite von ca. 50–100 Kilometern der globalen Klimamodelle auch regionale Aussagen über mögliche zukünftige Klimaentwicklungen möglich.

### 3 Zukünftige mögliche klimatische Entwicklung in NRW

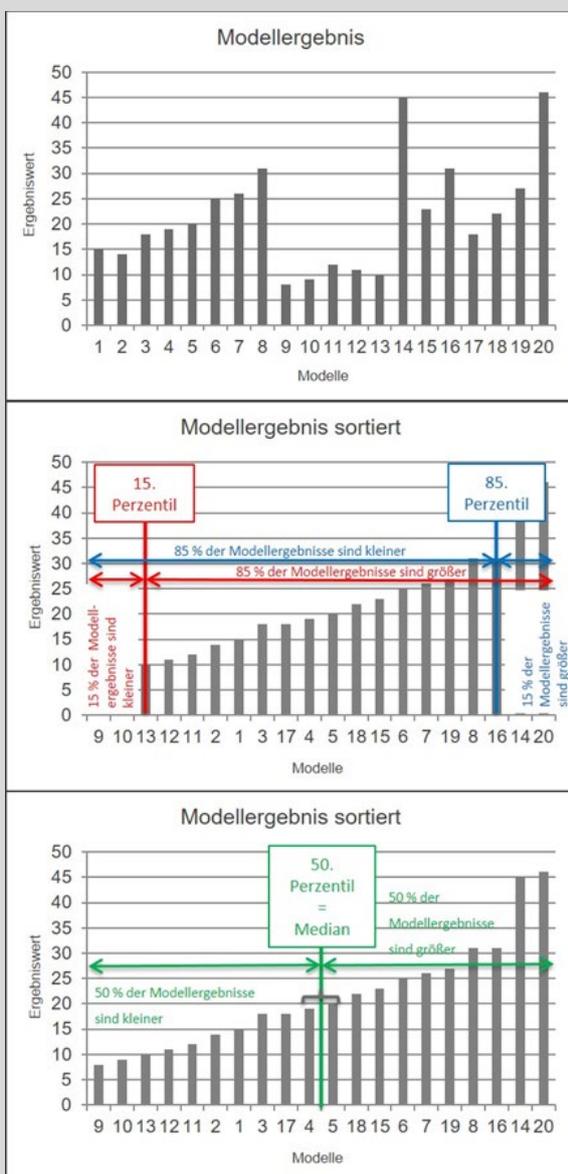
In Nordrhein-Westfalen hat sich das Klima seit Beginn der Messungen im ausgehenden 19. Jahrhundert bereits deutlich verändert. Die Kenntnis der bereits eingetretenen Veränderungen und deren Ausmaß ist wichtig, um auch die zukünftige Entwicklung richtig interpretieren und einordnen zu können. Daher wird in diesem Kapitel auch die bereits beobachtete Klimaveränderung beschrieben.

Dabei werden klimatische Entwicklungen insbesondere durch statistische Auswertung der meteorologischen Größen einer Mindestperiode von 30 Jahren beschrieben, sogenannte Klimanormalperioden (KNP). Der Zeitraum 1991–2020 ist die aktuell gültige Klimanormalperiode. Sie ergibt seit einigen Jahren die neue Basis, um das „aktuelle Klima“ in NRW zu beschreiben. Zuvor war die Periode 1961–1990 die Periode für klimatische Betrachtungen. Diese gilt als letzte KNP, in welcher das Klima noch relativ wenig von den Auswirkungen anthropogener Einflüsse beeinträchtigt wurde. Sie wird daher weiterhin als Referenzperiode vom Deutschen Wetterdienst (DWD) verwendet, um die besondere Entwicklung der letzten dreißig Jahre besser herausarbeiten zu können. Der nachfolgende Zeitraum 1971–2000 gilt als Bezugsperiode, welche häufig zu Vergleichszwecken mit Klimaprojektionen für die Zukunft herangezogen wird. Daher werden hier diese Klimanormalperioden für den Beobachtungszeitraum sowie die jeweils erste verfügbare Klimanormalperiode dargestellt. Diese werden mit den Klimaprojektionsergebnissen für die zwei Zukunftszeiträume 2031–2060 (Mitte des Jahrhunderts) und 2071–2100 (ferne Zukunft) in Beziehung gesetzt.

Die Ergebnisse der Klimaprojektionen werden sowohl für das RCP8.5-Szenario als auch im Vergleich dazu für das RCP2.6-Szenario dargestellt. So wird eine größtmögliche Spannweite möglicher zukünftiger klimatischer Entwicklungen beschrieben und abgebildet. Sofern Daten dazu vorliegen, wird darüber hinaus das Szenario RCP4.5 beschrieben. Für das RCP6.0 Szenario liegen, wie in Kapitel 2 beschrieben, keine regionalisierten Daten für NRW vor. Dabei gibt es für jedes verfügbare Klimaszenario nicht nur ein Ergebnis für NRW. Bereits für die globale Skala werden durch Klima-Modellierer-Gruppen (z. B. derzeit für Deutschland Max-Planck-Institut für Meteorologie) verschiedene globale Klimamodelle mit den Klimaszenarien angetrieben und gerechnet. Die Auflösung der Ergebnisse der globalen Klimamodelle ist sehr grob. Daher wird nachgeschaltet an die globalen Modellsimulationen mit Hilfe von regionalen Klimamodellen, die nicht die komplette Erdoberfläche, sondern nur einen bestimmten Ausschnitt (beispielsweise Europa) abdecken, eine sogenannte Regionalisierung der Ergebnisse durchgeführt (vgl. Kapitel 2). Dadurch wird die Auflösung der Ergebnisse für den gewählten Ausschnitt erhöht. Da globale Klimamodelle nur von einer sehr geringen Zahl an Institutionen und Forschungseinrichtungen betrieben werden, wird durch die Regionalisierung auch die Anzahl der Modellsimulationen erhöht, da meist die Ergebnisse mehrerer globaler Klimamodelle in die regionalen Klimamodelle einfließen. Dadurch entstehen sogenannte Modellketten, die verschiedenen globale und regionale Klimamodelle kombinieren. All diese Kombinationen zusammengefasst werden als Modellensemble bezeichnet. Für Deutschland bietet der Deutsche Wetterdienst regionalisierte Projektionsdaten an, die zusätzlich einer Qualitätsprüfung (Validierung) unterzogen wurden. Diese Klimaprojektionsergebnisse werden als DWD-Referenzensemble (Stand 2018) bezeichnet. Für RCP8.5 besteht das zugrundeliegende Modellensemble aus 21 Modellkombinationen, beim RCP4.5 aus 12, beim RCP2.6 aus 11. Darüber hinaus hat der DWD ein weiteres statistisches Downscaling vorgenommen, so dass die Daten letztlich in einer Auflösung von 5 km × 5 km vorliegen.

Die Klimaprojektionsergebnisse des kompletten Modellensembles sind alle als gleich wahrscheinlich anzusehen. Damit nicht alle Einzelergebnisse dargestellt und genannt werden müssen, wird bei der Ergebnisdarstellungsweise auf Perzentile zurückgegriffen (s. Infokasten: „Was sind eigentlich Perzentile?“). Hier werden das 15., 50. und 85. Perzentil der Klimaprojektionen der einzelnen Szenarien verwendet. Für diese Darstellungsweise werden die Ergebnisse der Modellkombinationen aufsteigend sortiert und jeweils die Klimaprojektionen herausgezogen, die dem genannten Perzentil entspricht. Beispielsweise zeigen beim 15. Perzentil 15 % der Modellergebnisse geringere Werte und 85 % der Modellergebnisse höhere Werte. Durch die Darstellung des 15., 50. und 85. Perzentils wird so eine mittlere Bandbreite der Modellergebnisse angegeben und dargestellt.

### Was sind eigentlich Perzentile?



Perzentile geben die Lage bestimmter Werte in einer statistischen Verteilung wieder. Sie sind somit den Quantilen gleichzusetzen, werden der Anschaulichkeit halber aber auf eine Grundgesamtheit von 100 % bezogen. Um Perzentile oder Quantile bestimmen zu können, werden die Werte der Verteilung der Größe nach geordnet (s. Darstellung links, oben und Mitte).

Das 15 %-Perzentil beschreibt dann den Wert der Verteilung, bei welchem 15 % der Werte kleiner sowie 85 % der Werte größer sind. Das bekannteste Perzentil stellt das 50 %-Perzentil dar, das auch Median genannt wird. Das 50 %-Perzentil teilt die Werte so, dass 50 % der Werte in der Verteilung größer sind sowie 50 % der Werte kleiner sind als das 50 %-Perzentil (s. Darstellung links, unten).

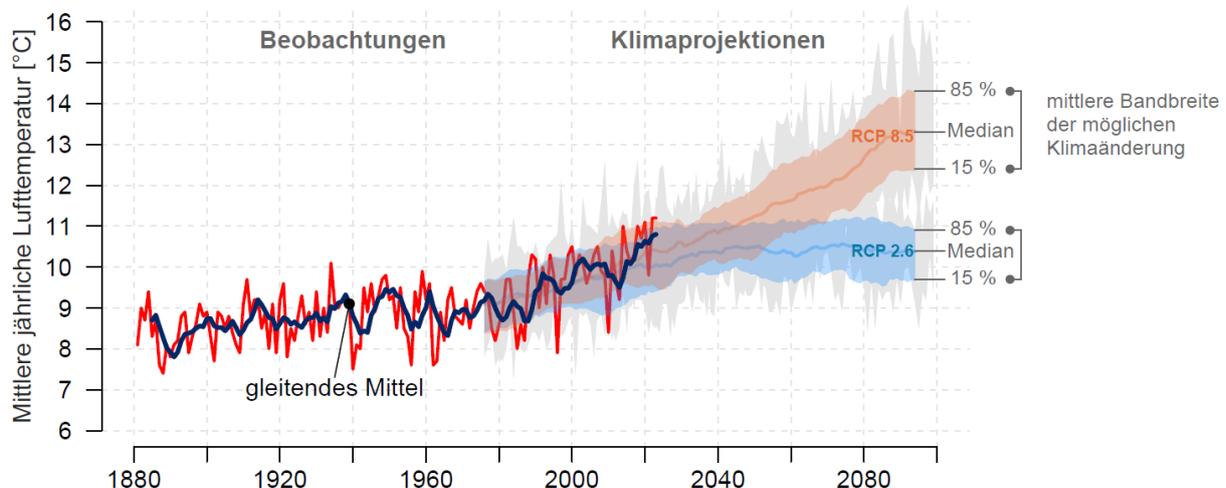
Durch die Auswertung der Ergebnisse für die ausgewählten Perzentile kann somit eine gewisse Spanne der möglichen klimatischen Entwicklung angegeben werden. Bei den dargestellten Perzentilen werden somit 70 % der Modellergebnisse abgedeckt, wohingegen mögliche Extremwerte nicht dargestellt werden.

### 3.1 Temperatur, Hitze und Vegetationszeiten

#### 3.1.1 Lufttemperatur

- Von der ersten Klimanormalperiode 1881–1910 zur aktuellen KNP 1991–2020 ist in NRW bereits ein Anstieg der Jahresmitteltemperatur um +1,6 °C erfolgt.
- In der fernen Zukunft (2071–2100) könnte die mittlere Durchschnittstemperatur in NRW in den Szenarien RCP4.5 und RCP8.5 noch weit über dem Einzeljahr-Rekordwert von 11,2 °C aus 2022 und 2023 liegen.
- Für die Zukunftszeiträume zeigen die Projektionen den größten möglichen Anstieg der Lufttemperatur in NRW im Herbst, gefolgt vom Sommer.

Grundlegender Parameter zur Beschreibung der Veränderungen durch den Klimawandel in NRW ist die Lufttemperatur. In Abbildung 4 wird die Entwicklung der mittleren jährlichen Lufttemperatur von 1881 bis 2100 dargestellt. Das Jahr 1881 stellt dabei den Beginn der systematischen Wetteraufzeichnungen in Deutschland dar. Basis für den Zeitraum 1881–2023 bilden hierbei die Messwerte, für den Zeitraum 1971–2100 werden die Ergebnisse der Klimaprojektionen für die RCP-Szenarien 2.6 und 8.5 dargestellt (teilweise parallel zu den Messungen). Neben den Mittelwerten der Einzeljahre der Beobachtungsdaten bzw. Einzelläufe der Klimaprojektionen werden auch gleitende Mittel dargestellt. In der Grafik ist zu sehen, dass die Lufttemperatur in NRW immer wieder Schwankungen zeigt, seit etwa den 1980er Jahren aber einen deutlichen Anstieg erfahren hat. Vergleicht man die erste KNP 1881–1910 mit der aktuellen KNP 1991–2020, ergibt sich ein Anstieg der Jahresmitteltemperatur in NRW um 1,6 Grad Celsius (°C, Tabelle 2). Die durchschnittliche Lufttemperatur in NRW liegt im Zeitraum 1991–2020 bei 10,0 °C. Die Temperaturveränderung hat landesweit annähernd homogen stattgefunden (LANUV 2021a). Die höchsten Jahresmitteltemperaturen von mehr als 11 °C treten in den Niederungen entlang des Rheintals im Niederrheinischen Tiefland sowie der Niederrheinischen Bucht auf. Entsprechend kühler stellen sich die Mittelgebirge aufgrund der dortigen Höhenlagen dar. Flächendeckend liegen die Werte im Sauer- und Siegerland sowie der Eifel unter 10,5 °C und können kleinräumig in den Höhenlagen auf bis zu 6,5 °C Jahresdurchschnittstemperatur sinken (vgl. [Klimaatlas NRW – LTM](#)).



**Abbildung 4:** Mittlere jährliche Lufttemperatur in °C in NRW: Beobachtung 1881–2023 und Projektionen 1971–2100 für die Szenarien RCP2.6 und RCP8.5. Dargestellt sind sowohl die Einzeljahre und das 10-jährig gleitende Mittel (Beobachtungen) als auch die Einzelläufe und gleitende Mittel des 15., 50., und 85. Perzentils der beiden Szenarien (Projektionen) (Quelle: LANUV NRW, Datengrundlage: DWD).

**Tabelle 2:** Mittlere Jahreslufttemperatur in °C in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1881–1910, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: [Klimaatlas NRW – LTM](#), [KFAM 1.1](#); Datengrundlage: DWD).

1881–1910	1961–1990	1971–2000	1991–2020		2031–2060			2071–2100		
Beobachtung				Perzentil	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
8,4	9,0	9,3	10,0	15	10,0	10,0	10,6	10,1	10,6	12,1
				50	10,4	10,6	11,1	10,3	11,3	12,9
				85	10,8	11,2	11,4	10,8	12,0	13,7

Im Zeitraum 2031–2060 wirkt sich der divergierende Strahlungsantrieb der Szenarien noch nicht so gravierend aus wie 2071–2100; hier unterscheidet sich die Temperaturentwicklung für die beiden Szenarien RCP2.6 und RCP8.5 deutlich. Bis zum Ende des Jahrhunderts 2071–2100 (ferne Zukunft) steigt die Lufttemperatur auf 12,1 °C bis 13,7 °C beim RCP8.5–Szenario an (15. Perzentil bis 85. Perzentil). Demgegenüber fällt der Temperaturanstieg beim RCP2.6–Szenario mit 10,1 °C bis 10,8 °C (15. Perzentil bis 85. Perzentil) deutlich geringer aus und zeigt kaum einen weiteren Anstieg gegenüber der aktuellen Klimanormalperiode. Die Projektionen zeigen dabei keine nennenswerten räumlichen Unterschiede bei der Temperaturentwicklung, sodass die bisherige räumliche Gliederung in NRW erhalten bleibt (vgl. [Klimaatlas NRW](#)).

In NRW stellen 2022 bzw. 2023 mit jeweils 11,2 °C die wärmsten Jahre seit Messbeginn dar, dicht gefolgt von 2020 als drittwärmstem Jahr (11,1 °C) ([KFAM 1.1](#)). Die 11 °C-Marke wurde erstmalig in den Jahren 2014 und 2018 (11,0 °C) erreicht. Solche Jahre, die zurzeit als Ausnahme- und Rekordjahre bei den Temperaturen gelten, könnten zukünftig den „Normalzustand“ darstellen. Dies bedeutet aber auch, dass Einzeljahre die genannten Durchschnittswerte der Klimanormalperioden deutlich überschreiten können und werden (Abbildung 4).

Betrachtet man den Jahresverlauf, fand in allen meteorologischen Jahreszeiten ein deutlicher Anstieg der Lufttemperatur statt (Tabelle 3). Im Vergleich der ersten verfügbaren KNP 1881–1910 mit der aktuellen KNP 1991–2020 ist der Anstieg mit 1,7 Kelvin (K – die Einheit Kelvin wird für die Angabe von Temperaturänderungen verwendet) im Frühling (März–Mai), 1,4 K im Sommer (Juni–August), 1,3 K im Herbst (September–November) und 1,7 K im Winter (Dezember–Februar) nicht ganz gleichmäßig über das Jahr verteilt. Für die Zukunftszeiträume zeigen die Projektionen den größten möglichen Anstieg im Herbst, gefolgt vom Sommer. Auch bei den Jahreszeiten lassen sich keine eindeutigen räumlichen Muster ableiten, sodass die Erwärmung sehr gleichförmig in NRW erfolgt (vgl. [Klimaatlas NRW – LTM](#)).

**Tabelle 3:** Mittlere Jahreszeitenlufttemperatur in °C in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1881–1910, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: [Klimaatlas NRW – LTM](#), [KFAM 1.2](#); Datengrundlage: DWD).

Jahres- abschnitt	1881– 1910	1961– 1990	1971– 2000	1991– 2020	2031–2060			2071–2100			
	Beobachtung				Perzentil	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
Frühling	7,8	8,3	8,7	9,5	15	9.2	9.2	9.8	9.3	9.6	10.8
					50	9.5	9.8	10.0	9.6	10.5	11.6
					85	10.0	10.2	10.5	9.9	10.8	11.9
Sommer	16,1	16,3	16,7	17,5	15	17.2	17.6	18.1	17.6	18.1	19.6
					50	17.8	18.0	18.4	17.8	18.6	20.3
					85	18.2	18.3	18.9	18.4	19.2	21.4
Herbst	8,8	9,5	9,4	10,1	15	10.4	10.3	10.9	10.1	11.1	12.5
					50	10.9	10.8	11.5	10.8	11.8	13.5
					85	11.4	11.5	12.0	11.4	12.8	14.9
Winter	1,0	1,7	2,2	2,7	15	3.2	3.0	3.3	3.2	3.7	5.3
					50	3.3	3.6	4.1	3.4	4.3	5.8
					85	3.6	4.3	4.8	3.7	4.8	6.6

Der Anstieg der durchschnittlichen Lufttemperatur wirkt sich auch auf das Auftreten der Temperaturkenntage aus. Dies sind Tage, an welchen die Tagesminimal- oder -maximaltemperatur bestimmte Schwellenwerte unter- bzw. überschreitet.

### 3.1.2 Kältebedingte Kenntage

- Die Frosttage könnten in der fernen Zukunft im Vergleich zur aktuellen Situation um ein Drittel (RCP2.6), etwa die Hälfte (RCP4.5) oder um drei Viertel (RCP8.5) abnehmen.
- In der fernen Zukunft wird es in NRW vermehrt Jahre geben, in welchen im Mittel für NRW überhaupt kein Eistag registriert wird.

Zunächst wird hier auf die kältebedingten Kenntage eingegangen. Dies sind zum einen die Eistage, also Tage, an welchen die Maximaltemperatur unter 0 °C liegt, zum anderen die Frosttage, an welchen die Minimaltemperatur unter 0 °C fällt. Betrachtet man die kältebedingten Kenntage in der Vergangenheit und vergleicht die erste hier durch Messwerte erfasste Klimanormalperiode 1891–1920 mit der aktuellen KNP 1991–2020 fällt auf, dass beide Kenntage deutlich zurückgegangen sind: die Eistage um fünf Tage, die Frosttage um zwölf Tage (vgl. Tabelle 4 und Tabelle 5).

**Tabelle 4:** Mittlere Anzahl der Eistage (Tagesmaximumtemperatur < 0 °C) in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1891–1920, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: [Klimaatlas NRW – KT\\_ET, KFAM 1.3](#); Datengrundlage: DWD).

1891–1920	1961–1990	1971–2000	1991–2020		2031–2060			2071–2100		
Beobachtung				Perzentil	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
17	17	14	12	15	8	4	4	6	3	1
				50	9	7	6	8	5	3
				85	11	12	9	10	10	5

**Tabelle 5:** Mittlere Anzahl der Frosttage (Tagesminimumtemperatur < 0 °C) in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1891–1920, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: [Klimaatlas NRW – KT\\_FT, KFAM 1.3](#); Datengrundlage: DWD).

1891–1920	1961–1990	1971–2000	1991–2020		2031–2060			2071–2100		
Beobachtung				Perzentil	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
74	70	65	62	15	45	37	34	43	28	14
				50	49	44	41	51	34	23
				85	52	53	47	54	49	30

Die Ergebnisse der Klimaprojektionen zeigen, ähnlich wie für die Jahresmitteltemperatur, dass zur Mitte des Jahrhunderts (2031–2060) alle Szenarien relativ ähnliche Werte aufweisen, zum Ende des Jahrhunderts (2071–2100) aber die Unterschiede zwischen den Szenarien (und den ihnen zu Grunde liegenden Annahmen über Treibhausgasemissionen und Klimaschutzmaßnahmen, vgl. Kapitel 2) deutlich werden. Im Zeitraum 2031–2060 liegen die Werte der Projektionen zwischen neun Eistagen (RCP8.5, 85. Perzentil) und zwölf Eistagen (RCP4.5, 85. Perzentil). Dies entspricht somit zum Teil dem Bereich, den wir bereits in der aktuellen Klimanormalperiode 1991–2020 mit zwölf Eistagen erlebt haben. Betrachtet man demgegenüber die größten Veränderungswerte dem 15. Perzentil im Zeitraum 2071–2100, so fallen die Eistage auf sechs Tage bis hin zu einem Tag ab (RCP8.5 versus RCP2.6, Tabelle 4). Dies bedeutet also, dass es in NRW vermehrt Jahre geben wird, in welchen im Mittel überhaupt kein Eistag registriert wird.

Bei den Frosttagen zeigen bereits die Klimaprojektionsergebnisse des 85. Perzentils im Zeitraum 2031–2060 mit Werten zwischen 47 Tagen und 53 Tagen einen weiteren Rückgang der Frosttage im Vergleich zur aktuellen KNP 1991–2020 mit 62 Tagen. Dieser liegt etwa in der Größenordnung des bisher beobachteten Rückgangs im Messzeitraum. Betrachtet man die ferne Zukunft (2071–2100) mit den größten Änderungswerten (15. Perzentil), könnte im Vergleich zur aktuellen Situation ein weiterer Rückgang der Frosttage um ein Drittel (RCP2.6), etwa die Hälfte (RCP4.5) oder um 75 % (RCP8.5) erfolgen (Tabelle 5).

Die oben beschriebene räumliche Verteilung der Lufttemperatur ist auch bei den kältebedingten Kenntagen gegeben (vgl. [Klimaatlas NRW – KT\\_ET](#), [KT\\_FT](#)). Auch bei den Ergebnissen der Klimaprojektionen bleibt sie weiterhin erhalten: in den Mittelgebirgslagen werden weiterhin mehr kältebedingte Kenntage auftreten, als im Niederrheinischen und Westfälischen Tiefland oder der Niederrheinischen Bucht. Dennoch fällt der Rückgang der kältebedingten Kenntage in Regionen, die insgesamt eine höhere Anzahl dieser Kenntagen aufweisen, größer aus als in den anderen Regionen (vgl. [Klimaatlas NRW – KT\\_ET](#), [KT\\_FT](#)).

### 3.1.3 Hitzebedingte Kenntage

- Im Extremfall sind bis zu 28 Heiße Tage pro Jahr zum Ende des Jahrhunderts (2071–2100) möglich.
- Der Rekordwert von 76 Sommertagen aus dem Jahr 2018 könnte im Extremfall zum jährlichen Durchschnittswert von NRW werden.
- Im Zeitraum 1991–2020 sind Tropennächte im Mittel für NRW alle 1–2 Jahre aufgetreten; dieser Wert wird sich zukünftig vervielfachen.

Im Gegensatz zu den kältebedingten Kenntagen treten hitzebedingte Kenntage beim Überschreiten bestimmter Lufttemperaturschwellwerte auf. In diesem Kapitel werden die Sommertage (Tagesmaximaltemperatur  $\geq 25$  °C), die Heißen Tage (Tagesmaximaltemperatur  $\geq 30$  °C) und die Tropennächte (Tiefsttemperatur in der Nacht  $\geq 20$  °C) betrachtet. Gegenläufig zu den kältebedingten Kenntagen haben die wärmebedingten Kenntage zugenommen. Dies wird schon bei der Betrachtung der Vergangenheit deutlich. Hier haben im Vergleich der Klimanormalperioden 1891–1920 und 1991–2020 die Sommertage um zwölf Tage zugenommen, die Heißen Tage um vier (Tabelle 6 und Tabelle 7). Auch die Ergebnisse der Klimaprojektionen

zeigen ein ähnliches Verhalten. Die Anzahl der Tage, die im Zeitraum 2031–2060 in allen Szenarien im 15. Perzentil auftritt, liegt im Bereich der Werte der KNP 1991–2020, die Werte des 85. Perzentils in allen RCP-Szenarien deutlich darüber. Zum Ende des Jahrhunderts (2071–2100) fächern sich die Ergebnisse entsprechend der Szenarien nochmal deutlich auf und erreichen im 85. Perzentil Werte zwischen 41 (RCP2.6) und 77 (RCP8.5) Sommertagen bzw. zwölf (RCP2.6) und 28 (RCP8.5) Heißen Tagen. Gerade der letzte Wert führt die Auswirkungen sehr deutlich vor Augen; dies entspricht quasi einem ganzen Monat, in welchem die Tagesmaximaltemperatur die 30 °C-Marke überschreitet, auch wenn diese Tage nicht am Stück, sondern verteilt über den Sommer und die angrenzenden Monate auftreten werden. Auch bei den Sommertagen kann ein ähnlicher Vergleich gezogen werden. Im bisherigen Rekordjahr 2018 wurden 76 Sommertage registriert. Diese Verhältnisse könnten somit zum Ende des Jahrhunderts zum Durchschnitt werden. 2018 war damit bisher eindeutig Spitzenreiter, auf Platz 2 folgt 1947 mit 63 Sommertagen und auf dem dritten Platz 2022 mit 56 Sommertagen ([KFAM 1.4](#)).

**Tabelle 6:** Mittlere Anzahl der Sommertage (Tagesmaximumtemperatur  $\geq 25$  °C) in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1891–1920, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: [Klimaatlas NRW – KT\\_ST](#), [KFAM 1.4](#); Datengrundlage: DWD).

1891–1920	1961–1990	1971–2000	1991–2020		2031–2060			2071–2100		
Beobachtung				Perzentil	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
24	25	28	36	15	32	33	39	34	40	54
				50	37	38	42	38	44	63
				85	42	46	46	41	51	77

**Tabelle 7:** Mittlere Anzahl der Heißen Tage (Tagesmaximumtemperatur  $\geq 30$  °C) in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1891–1920, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: [Klimaatlas NRW – KT\\_HT](#), [KFAM 1.4](#); Datengrundlage: DWD).

1891–1920	1961–1990	1971–2000	1991–2020		2031–2060			2071–2100		
Beobachtung				Perzentil	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
4	4	5	8	15	7	8	9	8	10	16
				50	8	10	11	9	12	22
				85	11	14	14	12	17	28

Auch die Tropennächte, also die Nächte (19 Uhr bis 7 Uhr MEZ), in welchen die Temperatur nicht unter die 20 °C-Marke fällt, sind ähnlich wie die Hitzewellen, die im nächsten Abschnitt beschrieben werden, ein Indikator für Hitzebelastungssituationen. Tropennächte treten am häufigsten in den wärmebegünstigten Regionen entlang des Rheins auf. Darüber hinaus sind

vor allem Großstädte und dicht bebaute und besiedelte (Innen-)Stadtkerne – quasi regional unabhängig – von Tropennächten betroffen. Innenstadtbereiche sind in den in Tabelle 8 genannten Werten jedoch nicht explizit berücksichtigt. Für die Tropennächte stehen Auswertungen ab 1951 zur Verfügung. Im Zeitraum 1951–1980 traten Tropennächte gemittelt über ganz NRW etwa alle fünf Jahre auf (Tabelle 8). Aktuell (1991–2020) treten etwa alle zwei Jahre Tropennächte in NRW auf. Insgesamt im Mittel für NRW also noch recht selten. Die Projektionen liegen für diesen Parameter nicht als Absolutwerte, sondern als Änderungssignal bezogen auf den Zeitraum 1971–2000 vor. Die Projektionen zeigen, dass Tropennächte gemittelt über NRW zur Mitte des Jahrhunderts mit einer Zunahme zwischen 0,2 und 3,1 Tagen (RCP2.6, 15. Perzentil, RCP8.5, 85. Perzentil) noch relativ selten bleiben. Zum Ende des Jahrhunderts wird hingegen im Schnitt mindestens eine Tropennacht pro Jahr erwartet; die Spannweite reicht dabei bis hin zu etwa 16 Tropennächte pro Jahr (RCP8.5, 85. Perzentil). Dies würde eine drastisch verstärkte Hitzebelastung für NRW bedeuten.

**Tabelle 8:** Mittlere Anzahl der Tropennächte in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1951–1980, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 (Quelle: [KFAM 1.4](#); Datengrundlage: DWD) sowie Änderung der Anzahl der Tropennächte in den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 bezogen auf den Referenzzeitraum 1971–2000 in Tagen (Quelle: [Klimaatlas NRW – KT TN](#); Datengrundlage: DWD).

1951–1980	1961–1990	1971–2000	1991–2020		2031–2060			2071–2100		
Beobachtung				Perzentil	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
0,2	0,3	0,4	0,7	15	+0,2	+0,6	+1,2	+0,5	+1,1	+5,9
				50	+0,5	+0,9	+1,8	+0,9	+1,8	+8,9
				85	+1,1	+1,6	+3,1	+1,5	+4,6	+15,8

Auch heute schon treten bei sommerlichen Wetterlagen Hitzebelastungen für große Bevölkerungsteile in NRW auf. Dies wurde in der Klimaanalyse NRW untersucht ([Klimaatlas NRW – KY](#)): Für einen typischen Sommertag (Eingangsdaten: 20 °C um 21 Uhr, kein übergeordneter Wind, 50 % relative Luftfeuchtigkeit, keine Bewölkung) wurden die Lufttemperaturverhältnisse, die thermische Belastung mittels des Index PET (Physiologische Äquivalenttemperatur) und die Kaltluftproduktion und -flüsse in NRW für zwei Tageszeitpunkte analysiert. Bereits unter den genannten Bedingungen sind nachts 5 % der Siedlungsflächen in NRW von einer starken Hitzebelastung – entsprechend Temperaturen einer Tropennacht  $\geq 20$  °C – betroffen (LANUV 2018). Glücklicherweise besteht auch ein hohes Ausgleichspotenzial, sodass ca. 60 % des Siedlungsraumes in NRW zumindest mit geringen Mengen an Kaltluft versorgt werden. Auch tagsüber wird bereits heute unter den beschriebenen Witterungsbedingungen 12 % des Siedlungsraums als extrem thermisch belastet (PET  $>41$  °C) bewertet (LANUV 2018). Zukünftig werden durch die klimatischen Veränderungen die Belastungen noch zunehmen. Die Klimaanalyse NRW wird derzeit überarbeitet – mit der Veröffentlichung neuer Ergebnisse und Erkenntnisse ist im Jahr 2025 zu rechnen.

### 3.1.4 Hitzewellen

- Bereits im Beobachtungszeitraum hat sich das Auftreten von Hitzewellen von alle zehn Jahre (1951–1980) auf alle drei Jahre (1991–2020) erhöht.
- Zukünftig zeigen im Schnitt fast alle Szenarien mindestens eine Hitzewelle pro Jahr in NRW.

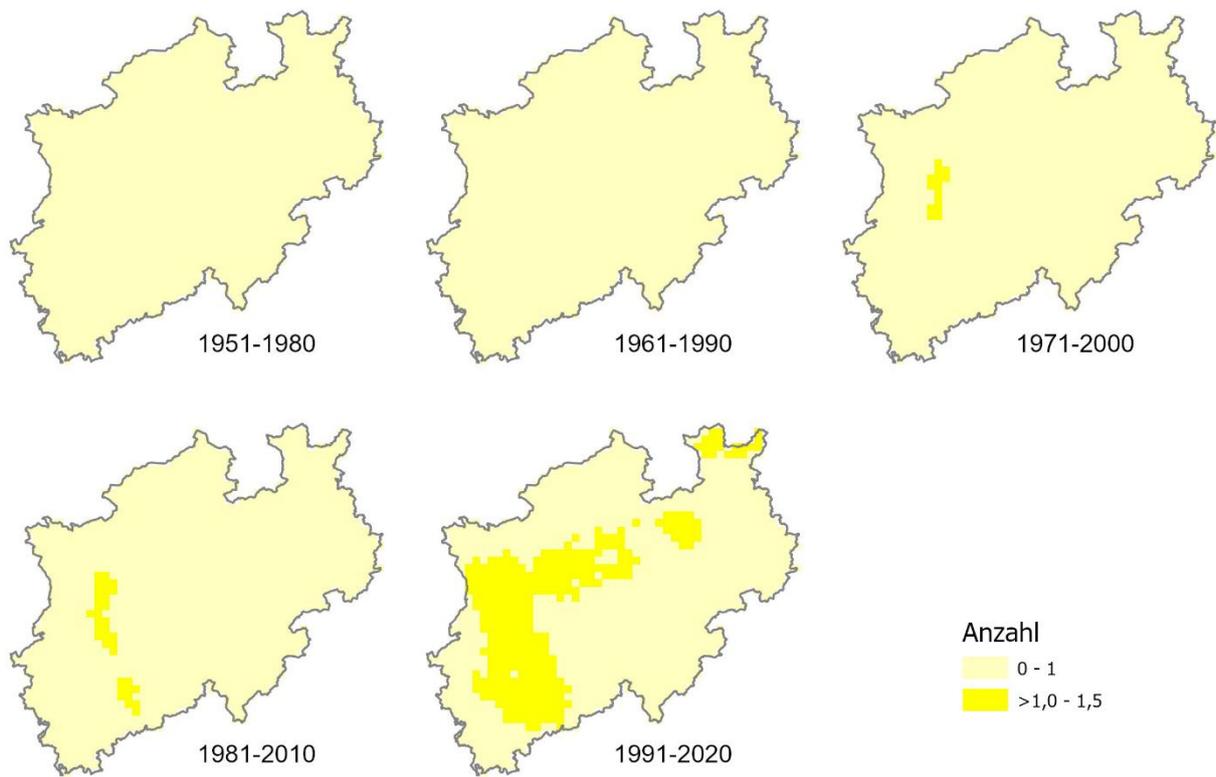
Einen genaueren Blick auf die Hitze und das häufigere Auftreten von Heißen Tagen erlauben die Hitzewellen. Diese werden erfasst, wenn drei Heiße Tage in direkter Folge auftreten. Für die Hitzewellen stehen, wie bei den Tropennächten, Daten ab dem Jahr 1951 zur Verfügung. Betrachtet man hier die erste verfügbare Klimanormalperiode 1951–1980, so traten Hitzewellen im Schnitt alle 10 Jahre auf. Bis zur KNP 1991–2020 hat sich ihr Auftreten auf etwa alle drei Jahre verdreifacht (vgl. Tabelle 9). Im Beobachtungszeitraum dauerten die Hitzewellen nach oben genannter Definition meist drei oder vier Tage an; Spitzenreiter war hier das Jahr 2003 mit einer Hitzewelle von acht Tagen Dauer. Der Sommer 2003 ist deutschlandweit auch als „erster“ Jahrhundertssommer bekannt geworden. Bis zum Ende des Jahrhunderts könnten durchschnittlich bis zu knapp vier Hitzewellen im Jahr auftreten (RCP8.5, 85. Perzentil; Tabelle 9 und Abbildung 6). Die Dauer liegt im Zeitraum 2031–2060 bei durchschnittlich drei bis fünf Tagen und erhöht sich zum Ende des Jahrhunderts auf vier bis fünf Tage (je nach Klimaszenario und betrachtetem Perzentil).

**Tabelle 9:** Mittlere Anzahl der Hitzewellen (Definition Hitzewelle: mindestens drei aufeinander folgende Heiße Tage) in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1951–1980, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: Klimaatlas NRW – LT\_HW, Veröffentlichung in Vorbereitung; Datengrundlage: DWD).

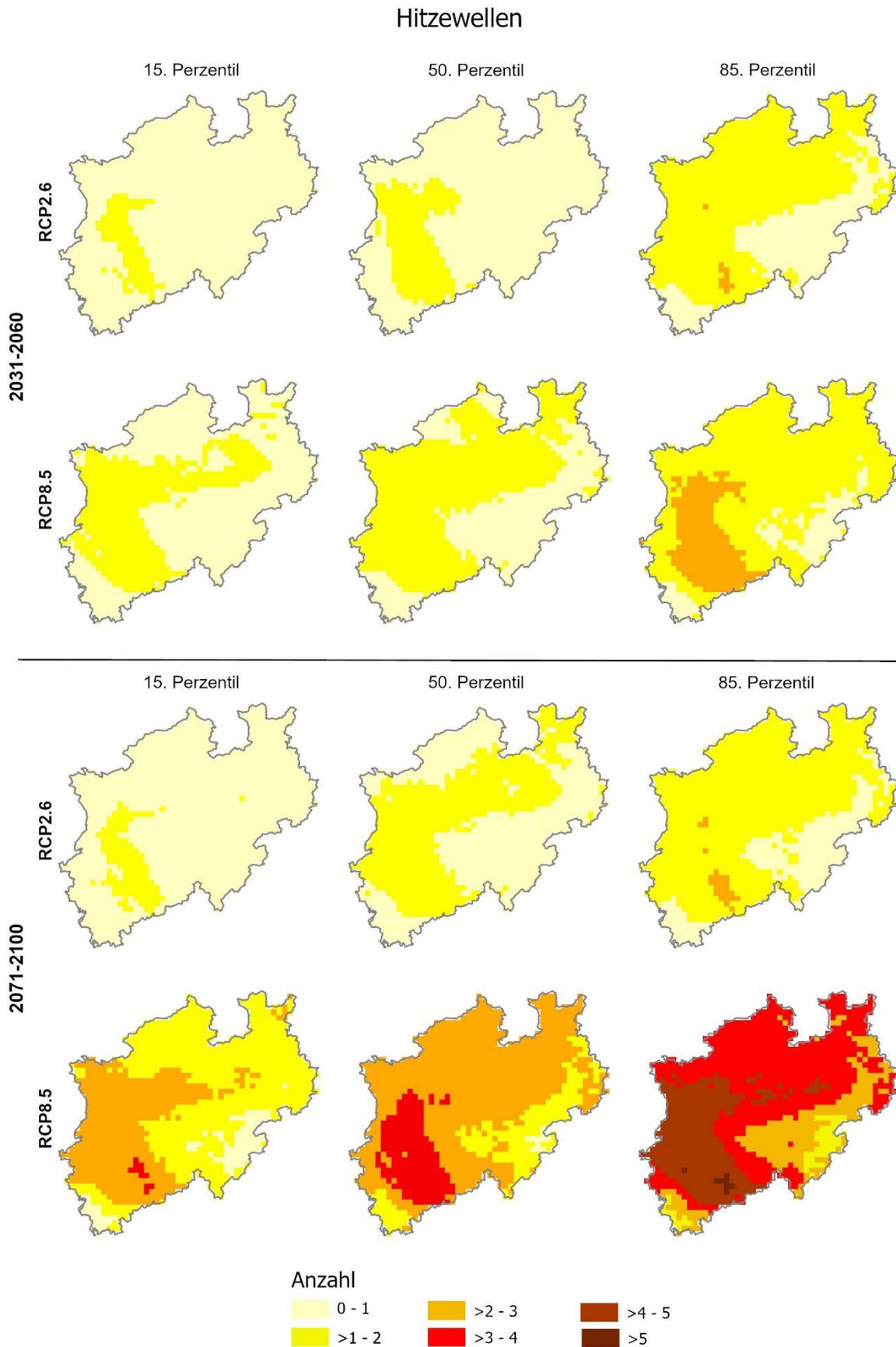
1951–1980	1961–1990	1971–2000	1991–2020		2031–2060			2071–2100		
Beobachtung				Perzentil	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
0,1	0,0	0,1	0,3	15	0,6	0,7	0,9	0,7	1,0	1,9
				50	0,8	1,0	1,1	1,0	1,3	2,5
				85	1,2	1,5	1,7	1,3	1,9	3,5

Die räumliche Verteilung der Hitzewellen entspricht wieder der typischen Lufttemperaturverteilung, somit kommen sie am häufigsten entlang des Rheins vor (Abbildung 5 und Abbildung 6). In den Höhenlagen traten zu Beginn der Aufzeichnungen noch keine Hitzewellen auf, danach entsprechend seltener als in den wärmebegünstigten Regionen.

### Hitzewellen



**Abbildung 5:** Mittlere Anzahl der Hitzewellen in NRW in den Beobachtungszeiträumen von 1951–1980 bis 1991–2020 (Quelle: LANUV NRW, Datengrundlage: DWD).



**Abbildung 6:** Mittlere Anzahl der Hitzewellen in NRW in den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: LANUV NRW, Datengrundlage: DWD).

### 3.1.5 Vegetationszeit

- Die Vegetationszeit hat sich im Beobachtungszeitraum sowohl durch einen früheren Eintritt als auch ein längeres Andauern im Jahresverlauf verlängert. Diese Entwicklung wird sich auch zukünftig fortsetzen.
- Die Spätfröste werden zukünftig weniger werden oder sich im bereits aus dem Beobachtungszeitraum bekannten Rahmen bewegen.

Es gibt viele weitere Parameter, die direkt auf die Veränderung der Lufttemperatur zurückzuführen bzw. temperaturbasiert sind. Zunächst wird hier auf die Entwicklung der Länge der Vegetationsperiode eingegangen. Hierbei wird die Vegetationsperiode nach dem Ansatz von HÜBENER et al. (2017) berechnet, wobei die Dauer über das Start- und Enddatum bestimmt wird. Diese treten ein, wenn die Schwellentemperatur an sechs aufeinanderfolgenden Tagen über- bzw. unterschritten wird (HÜBENER et al. 2017). Als Schwellentemperatur wird eine Tagesmitteltemperatur von 5 °C verwendet. Für die Vegetationszeit liegen Daten ab 1951 vor. Im Vergleich der Klimanormalperioden 1951–1980 und 1991–2020 hat sich die Vegetationszeit um 18 Tage verlängert (Tabelle 10). Demgegenüber zeigt die phänologische Vegetationszeitlänge, die durch den Blühbeginn der Salweide und der Blattverfärbung der Stieleiche begrenzt wird, mit zwölf Tagen eine etwas geringere Steigerung, ist insgesamt aber auch kürzer (KFAM 6.3). Dennoch stimmen die Daten und Veränderungen der beiden Vegetationszeiten sehr gut überein und zeigen sowohl durch einen früheren Eintritt als auch ein längeres Andauern im Jahresverlauf eine Verlängerung an. Die Projektionen weisen fast alle eine weitere Verlängerung der Vegetationszeit auf (Tabelle 10). Je nach Szenario und Zeitraum reicht sie von (fast) keiner Veränderung (15. Perzentil RCP2.6 und RCP4.5) in der nahen Zukunft bis zu einer Verlängerung um 45 Tage (85. Perzentil RCP8.5) in der fernen Zukunft (Tabelle 10). Für eine genauere Betrachtung der forstlichen Vegetationszeitlänge (ebenfalls definiert nach dem Ansatz von HÜBENER et al. (2017), allerdings mit einer Schwellentemperatur von 10 °C der Tagesmitteltemperatur) sei auf die Broschüre „Wald und Klima in NRW“ (LANUV 2024) verwiesen. Dort sowie in Kapitel 3.3 werden überdies die Auswirkungen einer längeren Vegetationszeit und höherer Lufttemperaturen auf das Wasserangebot sowie die Wasserversorgung der Pflanzen beschrieben.

**Tabelle 10:** Mittlere Dauer der Vegetationszeit in Anzahl der Tage >5 °C (berechnet nach dem Ansatz von Hübener et al. 2017) in den Beobachtungszeiträumen 1951–1980, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 in NRW (Quelle: [Klimaatlas NRW – BD\\_VZ](#); Datengrundlage: DWD).

1951–1980	1961–1990	1971–2000	1991–2020		2031–2060			2071–2100		
Beobachtung				Perzentil	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
				15	283	282	290	278	291	311
264	263	270	282	50	288	286	297	286	299	320
				85	293	292	303	294	304	327

Darüber hinaus besteht ein Zusammenhang zwischen einer längeren Vegetationszeit und einer höheren Gefahr von Spätfrösten. Dadurch, dass die Vegetationszeit früher im Jahr beginnt, können zu diesem relativ frühen Zeitpunkt im Jahr auch noch Fröste auftreten. Spätfröste wirken sich durch Schäden v. a. in der Landwirtschaft aus. Die Spätfröste werden berechnet, indem die Anzahl der Frosttage zwischen dem Beginn der Vegetationszeit (hier definiert nach HÜBENER et al. (2017) als Auftreten von sechs aufeinander folgenden Tagen mit einer Tagesmitteltemperatur über dem Schwellenwert von 5 °C) und dem festgelegten Datum des 01.06. (nach welchem nicht mehr mit Spätfrösten gerechnet wird) gezählt werden. Im Vergleich der Klimanormalperioden 1951–1980 und 1991–2020 hat sich die Anzahl der Spätfröste im Schnitt um einen Spätfrosttag pro Jahr erhöht (Tabelle 11), wobei sich der Beginn der Vegetationszeit um ca. 15 Tage nach vorn verlagert hat. Die Projektionen für die Zukunftszeiträume zeigen, dass sich die Spätfrostgefahr im Gegensatz zu vielen anderen Parametern zumindest für das 85. Perzentil in beiden Zukunftszeiträumen nahezu in einem Bereich bewegen, der bereits aus der Vergangenheit bekannt ist (Tabelle 11). Im 15. Perzentil nimmt die Spätfrostgefahr in allen Szenarien gegenüber der aktuellen Klimanormalperiode ab, je nach Klimaszenario und Zeitraum entsprechend geringfügig oder stärker. Im Szenario RCP8.5 ist die Spätfrostgefahr durch die stärkere Erwärmung deutlich geringer als im RCP2.6 mit einer weniger starken Erwärmung. Obwohl sich der Vegetationsbeginn zukünftig im RCP8.5-Szenario am deutlichsten von allen Szenarien nach vorn verschiebt, nimmt hier auch die Spätfrostgefahr am stärksten ab (Tabelle 11). Daher lässt sich schlussfolgern, dass zukünftig ein potenziell früherer Vegetationszeitbeginn durch die stärkere Erwärmung und den Rückgang der Frosttage insgesamt (vgl. Kapitel 3.1) kompensiert wird.

**Tabelle 11:** Durchschnittliches Auftreten von Spätfrost (Anzahl von Frosttagen zwischen Beginn der Vegetationszeit und 01.06.) in den Beobachtungszeiträumen 1951–1980, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 in NRW (Quelle: Klimaatlas NRW – BD\_SF, Veröffentlichung in Vorbereitung; Datengrundlage: DWD).

1951–1980	1961–1990	1971–2000	1991–2020		2031–2060			2071–2100		
Beobachtung				Perzentil	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
				15	2,6	1,7	1,9	2,0	2,1	0,8
4,5	3,6	3,9	5,8	50	4,1	3,0	3,0	3,3	3,2	1,8
				85	4,9	3,8	4,5	4,9	4,3	3,2

### 3.1.6 Gradtage

- Der Heizenergiebedarf nimmt ab, der Kühlenergiebedarf nimmt zu. Diese Entwicklung wird sich auch weiter fortsetzen.
- Der Heizenergiebedarf wird auch zukünftig deutlich über dem Kühlenergiebedarf liegen, dennoch fällt die Steigerung des Kühlenergiebedarfs deutlich höher aus als der Rückgang des Heizenergiebedarfs.

Der Rückgang der kältebedingten Kenntage bzw. allgemein der Anstieg der Lufttemperatur wirkt sich beispielsweise auch auf den Heizenergiebedarf aus. Da dieser für NRW nicht flächendeckend berechnet werden kann, insbesondere für die Zukunftszeiträume, wird hier stellvertretend der Parameter Gradtage betrachtet. Gradtage dienen im eigentlichen Sinne dazu, eine Außentemperaturbereinigung bei Betrachtungen von Gebäudeenergieverbräuchen durchzuführen. Ein Gradtag stellt die Differenz zwischen der mittleren Raumtemperatur von 20 °C und dem Tagesmittel der Außentemperatur dar. Betrachtet werden nur Tage mit einer Außentemperatur unter 15 °C. Die Gradtage werden hierbei nach den folgenden Formeln (VDI 2013) berechnet:

$$G = (20 \text{ °C} - t_m) \cdot 1 \text{ d für } t_m < 15 \text{ °C} \quad (1)$$

mit

$G = \text{Gradtag in Kelvin} \cdot \text{Tag (K} \cdot \text{d)}$

$t_m = \text{Tagemittel der Außentemperatur eines Heiztages (} t_m < 15 \text{ °C)}$ .

Dabei wurden als Auswertungszeiträume die Klimanormalperioden des Beobachtungszeitraums ab 1951 sowie der Klimaprojektionen für die Zeiträume 2031–2060 und 2071–2100 betrachtet. Dafür sind die Gradtage des Betrachtungszeitraums aufzuaddieren und durch die Anzahl der Jahre einer Klimanormalperiode (= 30 Jahre) zu teilen:

$$G_{KNP} = \frac{\sum_{n=1}^z (20 - t_{m,n})}{30} \quad (2)$$

mit

$z = \text{Anzahl der Tage mit } t_m < 15 \text{ °C}$ .

Da hierbei nur die Tage mit einer Außentemperatur unter 15 °C, sogenannte Heiztage, betrachtet werden, werden diese Gradtage auch als Heizgradtage bezeichnet. Ein hoher Wert bedeutet geringe Lufttemperaturen bzw. eine große Anzahl an Tagen unter der Heiztag-Temperatur, geringe Werte haben eine entsprechend umgekehrte Bedeutung. In Tabelle 12 werden die Heizgradtage im Mittel für NRW für die Beobachtungszeiträume und die Klimaprojektionszeiträume dargestellt. Die räumliche Verteilung entspricht wieder jener der Lufttemperatur: hohe Werte treten v. a. im Bereich der Mittelgebirge und Höhenlagen auf, während niedrigere Werte insbesondere entlang des Rheins und den Flachlandregionen verzeichnet werden (vgl. Klimaatlas NRW – PL\_HGT, Veröffentlichung in Vorbereitung). Betrachtet man den Beobachtungszeitraum, wobei für die Heizgradtage Daten ab 1951 vorliegen, zeigt der Vergleich der Klimanormalperioden 1991–2020 mit 1951–1980 einen deutlichen Rückgang um rund 10 %. Die Ergebnisse der Klimaprojektionen zeigen einen weiteren Rückgang der Heizgradtage (Tabelle 12). Somit wird auch der Heizenergieverbrauch in Zukunft abnehmen. Wie stark,

hängt vom Erfolg des Klimaschutzes und dem entsprechenden Klimaszenario ab: Die Spannweite liegt hier in der fernen Zukunft bei einem Rückgang zwischen ~10 % (RCP2.6, 85. Perzentil) und ~38 % (RCP8.5, 15. Perzentil), jeweils im Vergleich zur Bezugsperiode 1971–2000. Die Abnahme erfolgt dabei in NRW annähernd gleichförmig, sodass die räumliche Verteilung mit hohen Werten in den Mittelgebirgsbereichen und niedrigen in den Tieflagen erhalten bleibt (vgl. Klimaatlas NRW – PL\_HGT, Veröffentlichung in Vorbereitung).

**Tabelle 12:** Mittlere Heizgradtage in K·d (nach VDI 2013) in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1951–1980, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie Änderung der Heizgradtage in Prozent relativ zur Bezugsperiode 1971–2000 in den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: Klimaatlas NRW – PL\_HGT, Veröffentlichung in Vorbereitung; Datengrundlage: DWD).

1951–1980	1961–1990	1971–2000	1991–2020		2031–2060			2071–2100		
Beobachtung				Perzentil	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
3915	3888	3777	3514	15	-15	-18	-22	-14	-25	-38
				50	-12	-12	-18	-11	-19	-33
				85	-10	-9	-14	-10	-15	-27

Welche Auswirkungen höhere Temperaturen für den Kühlbedarf haben, kann über die Kühlgradtage dargestellt werden. Die Berechnung wurde nach dem Verfahren von SPINONI et al. (2015) vorgenommen. Dabei werden die Kühlgradtage (KGT) nach den folgenden Formeln berechnet:

$$KGT = T_{avg} - T_{base} \quad \text{für} \quad T_{min} \geq T_{base} \quad (3)$$

$$KGT = \frac{(T_{max} - T_{base})}{4} \quad \text{für} \quad T_{avg} \leq T_{base} < T_{max} \quad (4)$$

$$KGT = \left[ \frac{(T_{max} - T_{base})}{2} \right] - \left[ \frac{(T_{base} - T_{min})}{4} \right] \quad \text{für} \quad T_{min} < T_{base} < T_{avg} \quad (5)$$

$$KGT = 0 \quad \text{für} \quad T_{max} \leq T_{base} \quad (6)$$

mit

$KGT =$  Kühlgradtag in Kelvin · Tag  $[K \cdot d]$

$T_{avg} =$  mittlere Tageslufttemperatur in °C

$T_{base} =$  Basistemperatur von 22 °C

$T_{min} =$  minimale Tageslufttemperatur in °C

$T_{max} =$  maximale Tageslufttemperatur in °C

Für den Jahreswert werden alle Tage eines Jahres mit den entsprechenden Temperaturdifferenzen aufsummiert.

Auswertungen zu den Kühlgradtagen liegen ab 1951 vor. Im ersten Erfassungszeitraum (1951–1980) lagen die Kühlgradtage bei 42 K•d im Schnitt für NRW; aktuell (1991–2020) liegen sie bei 73 K•d (Tabelle 13); somit hat sich der Kühlenergiebedarf bereits um ungefähr 74 % erhöht. Zukünftig könnten sich diese Werte vervielfachen. Die Spannweite der Erhöhung reicht hierbei von 21 % (RCP2.6, 15. Perzentil, 2031–2060) bis hin zu 350 % (RCP8.5, 85. Perzentil, 2071–2100) im Vergleich zur Bezugsperiode 1971–2000.

**Tabelle 13:** Mittlere Kühlgradtage in Kelvin •Tag nach Spinoni (vgl. [KFAM 14.2](#)) in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1951–1980, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie **Änderung der Kühlgradtage in Prozent** relativ zur Bezugsperiode 1971–2000 in den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: Klimaatlas NRW – PL\_KGT, Veröffentlichung in Vorbereitung; Datengrundlage: DWD).

1951–1980	1961–1990	1971–2000	1991–2020		2031–2060			2071–2100		
Beobachtung				Perzentil	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
42	45	52	73	15	+21	+38	+58	+35	+65	+167
				50	+44	+54	+83	+62	+94	+223
				85	+77	+87	+113	+79	+135	+350

Insgesamt gilt, dass auch in Zukunft der Heizenergiebedarf eine oder zwei Größenordnungen über dem Kühlenergiebedarf liegt (vgl. auch Beobachtungswerte in Tabelle 12 und Tabelle 13). Dennoch zeigt der Kühlenergiebedarf durch die im Klimawandel steigenden Lufttemperaturen eine enorme Steigerung.

Nach der Betrachtung des Themenfeldes „Temperatur“ werden im folgenden Abschnitt der Niederschlag und die Auswirkungen von Niederschlagsänderungen anhand der Parameter Niederschlag, Starkregen und Trockenheit genauer untersucht.

## 3.2 Niederschlag, Starkregen und Trockenheit

### 3.2.1 Niederschlagssumme

- Das Jahr 2023 war mit einer Niederschlagssumme von 1198 mm das niederschlagsreichste (und gleichzeitig das wärmste) Jahr seit Beginn der Aufzeichnungen.
- Der Jahresniederschlag bleibt voraussichtlich auch zukünftig im Rahmen des bereits Bekannten: Sommerniederschläge werden abnehmen, Winterniederschläge werden zunehmen.

Eine weitere wichtige klimatische Kenngröße stellt die Niederschlagssumme dar. Die mittlere Jahresniederschlagssumme für NRW betrug im Zeitraum 1991–2020 870 Millimeter (mm) (Tabelle 14). Zwar weisen die aktuelle Klimanormalperiode (1991–2020) und die Referenzperiode (1961–1990) annähernd gleiche Werte auf (Tabelle 14), aber vor der aktuellen KNP war der Zeitraum 1981–2010 mit 918 mm der mit Abstand regenreichste seit Beginn der Messungen in NRW im Jahr 1881 ([KFAM 2.1](#)). Der zwischenzeitliche Gesamtanstieg der Jahresniederschlagssumme ist demnach in der aktuellen KNP wieder rückläufig. Dies ist vor allem auf den deutlichen Trend zu trockeneren Jahren in der letzten Dekade zurückzuführen. Dabei kommen zusätzliche Faktoren ins Spiel, die sich auf die Niederschlagsverteilung auswirken und auch in Zukunft an Einfluss gewinnen werden. Die beobachtete Abschwächung des Jetstreams, einem dynamischen Starkwindband in der oberen Troposphäre bzw. unteren Stratosphäre in etwa 9 km Höhe (COUMOU et al. 2018), sorgt für länger anhaltende Trocken- oder Regenperioden. Hoch- und Tiefdruckgebiete werden stationärer, das heißt, sie ziehen langsamer voran und können mehrere Tage oder sogar Wochen an Ort und Stelle verweilen. Dies liegt an der im Vergleich zum Rest der Erde deutlich schnelleren Erwärmung in der Arktis und dem damit verbunden beschleunigten Abschmelzen des Meereises. Dadurch werden die Temperaturunterschiede zwischen den mittleren und hohen nördlichen Breiten verringert und somit auch die Luftdruckunterschiede, die dem Jetstream ihren Antrieb geben.

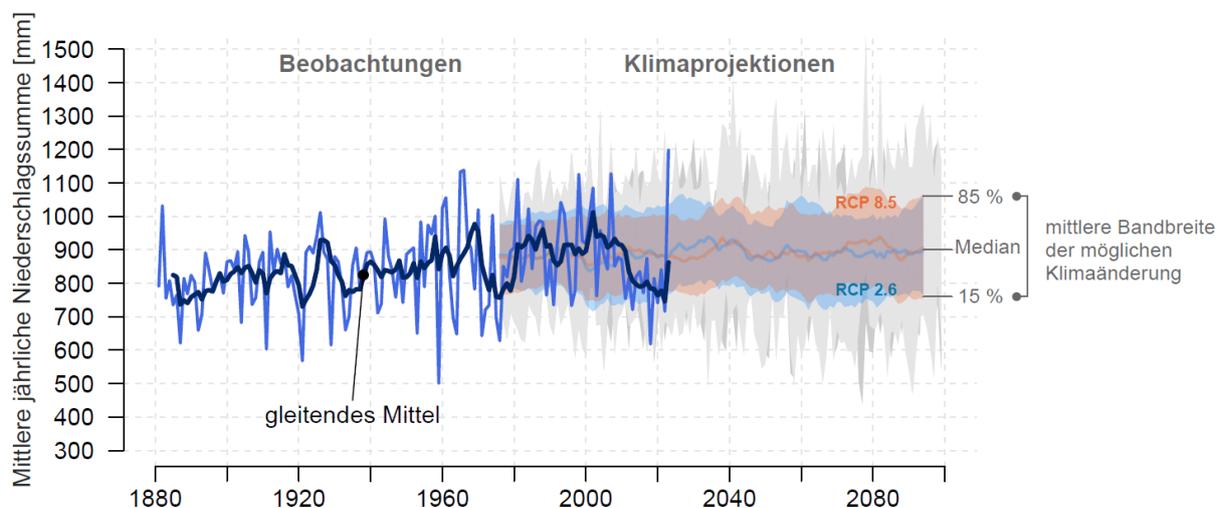
**Tabelle 14:** Mittlere jährliche Niederschlagssumme in mm in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1881–1910, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: [Klimaatlas NRW – NS NSM](#); Datengrundlage: DWD).

Beobachtung				Projektion						
1881–1910	1961–1990	1971–2000	1991–2020	Perzentil	2031–2060			2071–2100		
					RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
808	875	873	870	15	866	874	870	864	876	863
				50	879	881	882	877	883	884
				85	914	926	931	901	929	958

Die Niederschlagsmengen verteilen sich in Nordrhein-Westfalen regional durchaus unterschiedlich. Wie im Klimaatlas zu sehen ist, sind die Regionen des Flachlandes, insbesondere die Niederrheinische Bucht, das Niederrheinische Tiefland, die Westfälische Bucht und das Westfälische Tiefland, also die Regionen, die auch die höchsten Durchschnittstemperaturen aufweisen, auch die trockensten Regionen ([Klimaatlas NRW – NS NSM](#)). Das ist teilweise

auch durch die Lage im Windschatten der Mittelgebirge bedingt. Hier liegen die Jahresniederschlagssummen unterhalb des Landesdurchschnitts. Deutlich darüber liegen die Mittelgebirgsregionen Bergisches Land, Sauer- und Siegerland, die Eifel und das Weserbergland. Hier bleiben Regengebiete, die NRW aus Westen überqueren, an den Bergen hängen, was entsprechend zu Stauniederschlägen führt.

Abbildung 7 zeigt den Verlauf der Jahresniederschlagssumme in NRW für den Beobachtungszeitraum 1881–2023 sowie die mögliche Niederschlagsentwicklung bis zum Ende des Jahrhunderts (RCP2.6 und RCP8.5). Hier ist zu sehen, dass die Niederschläge im Laufe der Zeit stärker variieren als die Lufttemperatur. Die Jahre 2018 bis 2022 weisen Werte unter dem Durchschnitt der aktuellen KNP 1991–2020 (870 mm pro Jahr) auf: Sie schwanken etwa um einen Wert von 800 mm pro Jahr und liegen damit unter dem Mittel der Gesamtzeitreihe zwischen 1881 und 2022 (844 mm). Die Jahre 2018 und 2020 waren dabei mit Werten von unter 750 mm für NRW noch trockener. Nach einer kurzen Erholungsphase im Jahr 2021 setzten sich Hitze (Abbildung 4) und Trockenheit 2022 jedoch massiv fort. Gänzlich gegensätzlich ist das Jahr 2023 an dieser Stelle zu sehen. Trotz gleichbleibend hoher Temperaturen stellte sich im Jahr 2023 eine sehr feuchte Witterungsphase ein, sodass dieses Jahr mit einer Niederschlagssumme von 1198 mm als niederschlagsreichstes Jahr seit Beginn der Aufzeichnungen in die Statistik einging. Ein Grund hierfür ist in den großen Temperaturanomalien im nördlichen atlantischen Ozean zu sehen. Hier herrschten im Jahr 2023 teilweise über 3 °C höhere Wassertemperaturen als im Durchschnitt (hier 1982–2011) üblich (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION 2024). Durch diese enorme Erhöhung der Wassertemperaturen wurde immer wieder die Bildung von großen und niederschlagsreichen Tiefdruckgebieten angefacht, welche aufgrund der damit verbundenen ausgeprägten Westdrift auch regelmäßig NRW überquerten und hier zu besagten großen Niederschlagssummen führten. Aufgrund der dadurch entstehenden Stauniederschläge im Bergischen Land oder im Sauerland (siehe oben) wurden hier im Jahr 2023 teilweise Niederschlagssummen von weit über 1600 mm erreicht ([Klimaatlas NRW – NS NSM](#)). Dass NRW an dieser Stelle besonders betroffen war, zeigt auch die Tatsache, dass das Jahr 2023 bundesweit lediglich das sechsniederschlagsreichste seit Aufzeichnungsbeginn war (DWD 2023).



**Abbildung 7:** Mittlere jährliche Niederschlagssumme in mm in NRW: Beobachtung 1881–2023 und Projektionen 1971–2100 für die Szenarien RCP2.6 und RCP8.5. Dargestellt sind sowohl die Einzeljahre und das 10-jährig gleitende Mittel (Beobachtungen) als auch die Einzelläufe und gleitende Mittel des 15., 50., und 85. Perzentils der beiden Szenarien (Projektionen) (Datengrundlage: DWD).

Bei der Niederschlagssumme ist auch die zukünftige Entwicklung nicht so eindeutig wie bei der Lufttemperatur. Abbildung 7 zeigt bereits bei den Beobachtungsdaten, dass es eine enorme Variabilität von Jahr zu Jahr gibt; zukünftig könnte der Schwankungsbereich noch größer werden. Die zukünftige Niederschlagsentwicklung fällt bis zum Ende des Jahrhunderts 2071–2100 (ferne Zukunft) mit Werten von 863 mm bis 958 mm beim RCP8.5 (15. Perzentil bis 85. Perzentil) und 864 mm bis 901 mm beim RCP2.6 (15. Perzentil bis 85. Perzentil) relativ ähnlich aus und liegt meist in einem ähnlichen Bereich wie die Beobachtungsdaten (Tabelle 14). Betrachtet man aber insbesondere die letzten 20 bis 30 Jahre der beobachteten Niederschlagsentwicklung bis zum Jahr 2022, so zeigt der Verlauf des gleitenden Mittels einen deutlichen Rückgang der Niederschlagssumme (Abbildung 7). Das gänzlich gegensätzliche und sehr niederschlagsreiche Jahr 2023 stoppt diese Niederschlagsentwicklung. Interessant wird nun zu sehen sein, wie die Entwicklung weitergeht. Dabei stellen sich die Fragen: Bleibt 2023 ein Ausreißer und stabilisiert sich die Niederschlagssumme auf dem bis 2022 erreichten niedrigen Niveau oder sinkt sie gar weiter? Ändert sich die Richtung wieder hin zu steigenden Niederschlägen und einem Niveau, wie es z. B. im Zeitraum 1981–2010 vorherrschte, oder sogar darüber? Bei der Betrachtung der Niederschlagsentwicklung sollte insbesondere nicht außer Acht gelassen werden, dass sie immer mit stark steigenden Temperaturen einher geht, daher könnte bei geringen oder sinkenden Niederschlägen die Lücke bei der Wasserversorgung noch größer werden, als es beispielsweise in den niederschlagsarmen, heißen Jahren 2018 und 2019 der Fall war, und sich somit die Folgen für alle Bereiche nochmals verstärken (vgl. Kapitel 3.3).

Hierbei spielt insbesondere auch die jahreszeitliche Entwicklung der Niederschlagssummen eine Rolle. Im Vergleich der aktuellen Klimanormalperiode 1991–2020 mit der Referenzperiode 1961–1990 sind die Niederschläge sowohl im Frühling als auch im Sommer gesunken, während sie im gleichen Zeitraum im Herbst und im Winter gestiegen sind ([KFAM 2.2](#)). Die beobachtete Entwicklung zu trockeneren Sommern und niederschlagsreicheren Wintern wird in den Projektionen fortgeführt (Tabelle 15). Somit sind zusammen mit den möglichen Temperaturanstiegen Perioden mit Trockenstress in Zukunft wesentlich häufiger zu erwarten (siehe Abschnitt „Trockenheit“). Auf der anderen Seite halten die höheren Temperaturen in den Ozeanen und der Atmosphäre, gemeinsam mit stationären Wetterlagen infolge des abgeschwächten Jetstreams, alle Grundbedingungen bereit, um außergewöhnliche Niederschlagsereignisse zu generieren, wie etwa die Niederschlagsmenge 2023 in NRW oder auch die Hochwasserkatastrophe durch Tief „Bernd“ im Sommer 2021 zeigen.

**Tabelle 15:** Mittlere saisonale Niederschlagssummen in mm in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1881–1910, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: [Klimaatlas NRW – NS\\_NSM](#); Datengrundlage: DWD).

Jahres- abschnitt	1881– 1910	1961– 1990	1971– 2000	1991– 2020	2031–2060			2071–2100			
	Beobachtung				Perzentil	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
Frühling	172	205	197	177	15	198	204	200	193	208	198
					50	209	210	208	203	215	214
					85	220	220	218	215	230	232
Sommer	249	241	229	238	15	211	208	205	210	204	190
					50	225	226	225	224	221	217
					85	236	238	239	240	242	233
Herbst	196	208	221	219	15	209	213	208	211	212	207
					50	220	224	222	220	224	225
					85	228	239	236	230	236	244
Winter	190	223	226	237	15	227	230	227	219	228	234
					50	232	236	240	230	239	247
					85	245	246	264	243	254	276

### 3.2.2 Niederschlags-Kenntage – Starkniederschlag

- Die Anzahl der Starkniederschlags-Kenntage hat sich in der Vergangenheit kaum verändert. Zukünftig wird ein Anstieg erwartet.
- Mit den Starkniederschlags-Kenntagen werden vor allem großräumige zyklonale Ereignisse erfasst.
- Für die Anzahl von Starkregenereignissen mit Dauerstufen unter 12 Stunden hingegen, konnte die sogenannte ExUS-Studie (LANUV 2023) nachweisen, dass sie im Untersuchungszeitraum 1961–2018 signifikant angestiegen sind.
- Klimamodelle, die konvektive Starkregen-Ereignisse abbilden können, sind zurzeit noch in der Entwicklung.

Als Starkniederschlag werden im Allgemeinen Niederschlagsereignisse bezeichnet, bei denen innerhalb eines kurzen Zeitraumes verhältnismäßig viel Niederschlag fällt. Die Starkniederschlagstage beziehen sich dabei auf das Überschreiten einer bestimmten Tagesniederschlagssumme. In Tabelle 16, Tabelle 17 und Tabelle 18 sind jene Starkniederschlagstage für NRW dargestellt, die eine Tagesniederschlagssumme (TNS) von jeweils 10 mm, 20 mm und 50 mm überschreiten (DWD 2024). Auf regionaler Ebene lassen sich dabei Aussagen zur räumlichen Verteilung treffen. So treten die meisten Niederschlagstage der hier betrachteten Stufen in den Regionen auf, in denen ohnehin am meisten Niederschlag fällt. Dies sind vor allem die Weststaulagen des Bergischen und des Sauer- und Siegerlandes, also die Mittelgebirgslagen (vgl. [Klimaatlas NRW – NS](#)).

**Tabelle 16:** Mittlere Anzahl der Starkniederschlagstage mit einer Tagesniederschlagssumme (TNS) >10 mm in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1951–1980, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: [Klimaatlas NRW – NS SNS10](#); Datengrundlage: DWD).

Beobachtung				Projektion						
1951–1980	1961–1990	1971–2000	1991–2020	Perzentil	2031–2060			2071–2100		
					RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
23	24	24	24	15	23	23	24	22	24	24
				50	25	25	26	24	25	26
				85	26	26	27	26	28	29

**Tabelle 17:** Mittlere Anzahl der Starkniederschlagstage mit einer Tagesniederschlagssumme (TNS) >20 mm in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1951–1980, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: [Klimaatlas NRW – NS\\_SNS20](#); Datengrundlage: DWD).

Beobachtung				Projektion						
1951–1980	1961–1990	1971–2000	1991–2020	Perzentil	2031–2060			2071–2100		
					RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
5,0	5,2	5,4	6,1	15	4,7	4,9	5,0	4,6	4,9	5,7
				50	5,4	5,4	5,8	5,2	5,8	6,6
				85	5,9	6,1	6,6	6,0	6,9	7,8

**Tabelle 18:** Mittlere Anzahl der Starkniederschlagstage mit einer Tagesniederschlagssumme (TNS) >50 mm in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1951–1980, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: Klimaatlas NRW – NS\_SNS50, Veröffentlichung in Vorbereitung; Datengrundlage: DWD).

Beobachtung				Projektion						
1951–1980	1961–1990	1971–2000	1991–2020	Perzentil	2031–2060			2071–2100		
					RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
0,1	0,1	0,1	0,1	15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
				50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
				85	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,2

Wie die Werte in Tabelle 16, Tabelle 17 und Tabelle 18 zeigen, veränderte sich die durchschnittliche Anzahl der Starkniederschlagskenntage bisher kaum. Hinsichtlich der projizierten Mittelwerte für die Zeiträume 2031–2060 und 2071–2100 ist in den beiden Starkniederschlagsklassen TNS >10 mm und TNS >20 mm ein Anstieg der Starkregentage bis zum Ende des Jahrhunderts zu erkennen. Die Bandbreite der Modellergebnisse beläuft sich im RCP2.6 bis zum Ende des Jahrhunderts auf 22 bis 26 Starkniederschlagstage >10 mm TNS (15. und 85. Perzentil; Tabelle 16). Auch unter der Annahme von RCP8.5 wird eine Zunahme auf 24 bis 29 Starkregentage erwartet. Bei den Starkregentagen >20 mm TNS liegen die errechneten Werte im selben Zeitraum zwischen 4,6 und 6,0 (RCP2.6, 15. und 85. Perzentil) bzw. 5,7 und 7,8 (RCP8.5, 15. und 85. Perzentil; Tabelle 17). Folglich muss in Zukunft nicht nur mit intensivieren, sondern auch mit häufiger auftretenden Niederschlagsereignissen dieser noch nicht warnwürdigen Größenordnung gerechnet werden. Zu den Tagen mit einer Tagesniederschlagssumme >50 mm lassen sich anhand der vorliegenden Daten kaum Aussagen treffen. Das liegt insbesondere daran, dass solche Ereignisse nur sehr selten (wie bei Tief „Bernd“) flächendeckend im ganzen Land auftreten. Eine signifikante Zunahme dieser Ereignisse ist auch mit fortschreitendem Klimawandel nicht flächendeckend zu erwarten. Das bedeutet jedoch nicht, dass solche Ereignisse nicht auf lokaler oder regionaler Ebene durch konvektive Niederschläge zunehmen werden.

Die hier verwendete Definition der Starkregen-Kenntage liegt deutlich unter den Stark- bzw. Dauerregenwarnstufen des Deutschen Wetterdienstes, die sich im Schnitt auf Stundenwerte von 35 bis 40 mm beziehen. In der Regel treten Starkniederschlagsereignisse räumlich stark begrenzt auf. Eine Aussage zur Veränderung der Starkniederschlagsereignisse auf der lokalen Ebene lässt sich aus den Auswertungen der Mittelwerte für NRW nicht ableiten. Generell sind die Flächenmittel der Starkniederschlagstage eher für die Erfassung großräumiger, durch horizontale Luftmassenbewegung resultierender, lang andauernder und intensiver Niederschläge geeignet, die in Verbindung mit größeren Frontensystemen stehen (zyklonal). Dies steht im Gegensatz zu Niederschlägen, die durch Hebungsprozesse von Luftmassen eher kleinräumiger, aber auch intensiver ausfallen können (konvektiv). Ein Beispiel hierfür sind Gewitterereignisse, bei denen das vertikale Temperaturgefälle zu Wolkenbildung durch Kondensation beim Aufstieg feuchtwarmer Luft führt. Konvektionserlaubende Klimamodelle werden erst nach und nach eingeführt. Die bisherigen Klimamodelle berücksichtigen diese nicht und sind daher auch nicht in der Lage, diese Ereignisse sinnvoll abzubilden. Für die Anzahl von Starkregenereignissen mit Dauerstufen unter 12 Stunden hingegen, konnte die sogenannte ExUS-Studie (LANUV 2023) nachweisen, dass sie im Untersuchungszeitraum 1961–2018 signifikant angestiegen sind. Demnach sind die kürzeren Starkniederschlagsereignisse häufiger geworden, während die länger andauernden Ereignisse unverändert blieben.

Zyklonale Niederschläge in Form von Fronten entlang eines Tiefdruckgebietes können sich allerdings durch eingelagerte konvektive Hebungsvorgänge deutlich in ihrer Intensität steigern. Neben typischen Kaltfronten mit räumlich eher begrenzten Schauern und Gewittern, die unter Umständen auch zu Unwettern führen können, können sich auch flächendeckende Regengebiete durch dynamische und auch orographische Hebungseffekte erheblich verstärken. Ein eindrückliches Beispiel eines auf diese Art verstärkten Niederschlagsereignisses stellt die durch das Tief „Bernd“ ausgelöste Flutkatastrophe im Jahr 2021 dar, die sturzflutbedingt zahlreiche Nebenflüsse des Rheins über ihre Ufer treten ließ und viele Städte und Kreise in NRW mit Hochwasser überschwemmte. Zwei unabhängige Attributionsstudien für dieses Ereignis belegen, dass in einer Welt ohne anthropogenen Klimawandel die Regenmengen geringer und weniger wahrscheinlich gewesen wären (WORLD WEATHER ATTRIBUTION 2021; LUDWIG et al. 2022). Eine Analyse des Deutschen Wetterdienstes (JUNGHÄNEL et al. 2021) ergab, dass in einem Gebiet zwischen Dortmund und Trier flächendeckend ergiebiger Dauerregen mit eingelagerten Regenschauern für Niederschlagsmengen sorgte, die 150 mm am Tag übertrafen. Da sich das Tief „Bernd“ nur langsam bewegte, konnte es zu solchen flächendeckenden Niederschlagsmengen kommen. Die Folgen von der Flutkatastrophe des 13.–15. Juli 2021 sind in den betroffenen Gebieten immer noch sichtbar.

Generell gilt nach der Clausius-Clapeyron-Gleichung, dass Luft bei einem Grad Temperaturerwärmung 7 % mehr Wasserdampf aufnehmen und in den Wasserkreislauf hinzufügen kann. Dies bedeutet nicht nur potenziell höhere Niederschlagsmengen, sondern auch mehr Energie für konvektive Ereignisse wie Gewitter und schwere Regenschauer, weil im Wasserdampf auch Energie in Form von sogenannter latenter Wärme gespeichert wird, die durch Kondensation in den Wolken wieder frei wird und dynamische Hebungsprozesse somit weiter verstärkt. Zusammen mit den stetig steigenden Ozeantemperaturen und einem sich voraussichtlich weiter abschwächenden Jetstream können zukünftig deutlich extremere Niederschlagsereignisse nicht ausgeschlossen werden. Das Gegenteil ist der Fall: das Risiko wird ansteigen, auch wenn es in den aktuell verfügbaren Projektionen noch nicht dargestellt werden kann.

### 3.2.3 Niederschlags-Kenntage – Trockenheit

- Bei der Anzahl der Trockentage gab es in der Vergangenheit kaum Veränderung; in Zukunft ist die Spannweite so hoch, dass sowohl Zu-, als auch Abnahme möglich sind.
- In der Vergangenheit haben die Trockenperioden den Andauerklassen 1, 4 und 5 zugehört.
- In Zukunft wird v. a. eine Zunahme von Trockenperioden mit langer Dauer (Andauerklassen 5 und 6) erwartet.

Die Betrachtung von sogenannten Trockentagen, definiert als Tage mit einer Tagesniederschlagssumme (TNS) <1 mm, kann die Auswertung zu Starkregentagen sinnvoll ergänzen, da die Auswirkungen von Starkregen meist noch deutlich gravierender sind, wenn die Böden zuvor trocken sind und daher kein bzw. kaum Niederschlagswasser bei Starkregenereignissen aufnehmen können. Darüber hinaus geben die Trockentage auch einen Anhaltspunkt zur Wasserversorgung für die Land- und Forstwirtschaft sowie viele andere Nutzungsbereiche. Die Wasserversorgung kann zusätzlich durch die Wasserhaushaltsparameter (vgl. Kapitel 3.3) – insbesondere durch die Grundwasserneubildung – beschrieben werden.

Die durchschnittliche Anzahl der Trockentage blieb seit Beginn des Beobachtungszeitraumes nahezu unverändert (Tabelle 18). Ein Blick in die projizierte Zukunft zeigt, dass sich die Entwicklungen der Trockentage zwischen den RCP-Szenarien 2.6 und 8.5 langfristig unterscheiden werden. Bewegen sich in der fernen Zukunft die ermittelten Werte für RCP2.6 noch zwischen 212 und 224 Trockentagen, steigt die Anzahl der Trockentage im RCP8.5-Szenario auf Werte von 211 bis 237 an (15. und 85. Perzentil; Tabelle 19). Insgesamt wird ein leichter Rückgang der Anzahl der Trockentage erwartet. Da sich jedoch die Lufttemperaturen weiterhin stark erhöhen werden, dürfte sich auch die Verdunstung erhöhen und die Vegetationszeit (vgl. Kapitel 3.1.5) verlängern. Dies hat zur Folge, dass Trockenstress für Pflanzen dennoch wahrscheinlicher wird und die Grundwasserneubildung geringer ausfallen kann.

**Tabelle 19:** Mittlere Anzahl der Trockentage mit einer Tagesniederschlagssumme (TNS) <1 mm in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1951–1980, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: Klimaatlas NRW – NS\_TT, Veröffentlichung in Vorbereitung; Datengrundlage: DWD).

Beobachtung				Projektion						
1951–1980	1961–1990	1971–2000	1991–2020	Perzentil	2031–2060			2071–2100		
					RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
227	226	227	228	15	209	208	210	212	209	211
				50	213	211	215	216	214	218
				85	223	217	228	224	218	237

Neben der Betrachtung von Trockentagen lohnt sich auch die Betrachtung von Trockenperioden, da insbesondere länger andauernde Phasen der Trockenheit Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und mittel- bis langfristig auf die Wasserverfügbarkeit haben können. Als Trockenperiode wird ein Zeitraum von mindestens vier aufeinanderfolgenden Tagen bezeichnet, an

denen die Tagesniederschlagssumme weniger als ein Millimeter beträgt (= Trockentag). Je nach Anzahl der aufeinanderfolgenden Trockentage ergeben sich somit Trockenperioden mit längeren oder kürzeren Andauerzeiten. Eine Übersicht über die Andauerklassen der beobachteten und projizierten Trockenperioden ist in den Tabelle 20 bis Tabelle 22 zu finden. Seit dem ersten Beobachtungszeitraum (1951–1980) bis zur aktuellen Klimanormalperiode (1991–2020) haben die Andauerklassen 1 (4 bis 5 Tage), 4 (10 bis 11 Tage) und 5 (12 bis 13 Tage) eine relative Zunahme erfahren; in den Andauerklassen 2 (6 bis 7 Tage) und 3 (8 bis 9 Tage) gab es jeweils eine leichte Abnahme und Andauerklasse 6 ( $\geq 14$  Tage) zeigte bislang keine Veränderung (Tabelle 20). Die projizierte Entwicklung der Trockenperioden zeigt für das Szenario RCP2.6 einen leichten Rückgang sehr kurzer Trockenperioden (Andauerklasse 1) und gleichzeitig eine Zunahme sehr langer Trockenperioden (Andauerklassen 5 und 6, Tabelle 21 und Tabelle 22). Im Szenario RCP8.5 wurde ein leichter Anstieg in allen Andauerklassen außer in Andauerklasse 1 ermittelt (Tabelle 21 und Tabelle 22). Somit kann angenommen werden, dass Trockenperioden zukünftig immer länger andauern werden. Betrachtet man die hier festgestellten Verlängerungen der Trockenperioden bei abnehmenden Trockentagen (siehe Tabelle 19), so lässt sich daraus schließen, dass trockenere Sommer mit stationären Hochdrucklagen häufiger werden.

**Tabelle 20:** Mittlere Anzahl der Trockenperioden in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1951–1980, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020, angegeben in den Andauerklassen 1 (4–5 Tage), 2 (6–7 Tage), 3 (8–9 Tage), 4 (10–11 Tage), 5 (12–13 Tage) und 6 ( $\geq 14$  Tage). Quelle: LANUV NRW; Datengrundlage: DWD.

Beobachtung																							
1951–1980						1961–1990						1971–2000						1991–2020					
Andauerklasse						Andauerklasse						Andauerklasse						Andauerklasse					
1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
8,0	4,2	2,6	1,2	0,7	1,6	8,2	4,1	2,7	1,3	1,0	1,6	8,5	3,8	2,8	1,4	0,8	1,8	8,9	4,1	2,3	1,7	0,8	1,6

**Tabelle 21:** Mittlere Anzahl der Trockenperioden in NRW im Projektionszeiträumen 2031–2060, angegeben in den Andauerklassen 1 (4–5 Tage), 2 (6–7 Tage), 3 (8–9 Tage), 4 (10–11 Tage), 5 (12–13 Tage) und 6 ( $\geq 14$  Tage). Quelle: LANUV NRW; Datengrundlage: DWD.

	2031–2060																	
	RCP2.6						RCP4.5						RCP8.5					
	Andauerklasse						Andauerklasse						Andauerklasse					
Spannweite	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
15. Perzentil	7,2	3,7	2,3	1,5	1,3	1,6	7,0	3,8	2,2	1,5	1,4	1,6	7,2	3,7	2,0	1,7	1,3	1,5
50. Perzentil	7,8	4,0	2,5	1,7	1,5	1,8	7,65	3,9	2,3	1,7	1,5	1,9	7,7	4,0	2,5	1,8	1,4	1,8
85. Perzentil	8,3	4,4	2,8	2,2	1,8	1,9	7,8	4,3	2,6	2,0	1,6	2,3	8,2	4,4	2,8	2,0	1,6	2,4

**Tabelle 22:** Mittlere Anzahl der Trockenperioden in NRW im Projektionszeiträumen 2071–2100, angegeben in den Andauerklassen 1 (4–5 Tage), 2 (6–7 Tage), 3 (8–9 Tage), 4 (10–11 Tage), 5 (12–13 Tage) und 6 ( $\geq 14$  Tage). Quelle: LANUV NRW; Datengrundlage: DWD.

	2071–2100																	
	RCP2.6						RCP4.5						RCP8.5					
	Andauerklasse						Andauerklasse						Andauerklasse					
Spannweite	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
15. Perzentil	7,0	3,9	2,5	1,7	1,3	1,6	7,1	3,3	2,3	1,7	1,4	1,7	6,9	3,8	2,2	1,7	1,3	1,6
50. Perzentil	7,7	4,1	2,6	1,8	1,5	1,9	7,7	3,8	2,5	1,8	1,5	1,9	7,8	4,0	2,5	1,8	1,4	2,1
85. Perzentil	8,2	4,3	2,7	2,0	1,6	2,1	8,4	4,2	2,7	1,9	1,7	2,1	8,3	4,3	2,9	2,0	1,6	2,6

### 3.2.4 Auswirkungen von Trockenheit – Waldbrandgefahr und Waldbrände

- Das Jahr 2018 war mit 63 Tagen bisher das Jahr mit den meisten Tagen mit einem Waldbrandindex von 4 und 5.
- 2020 war das Jahr mit den meisten Waldbränden in NRW: in diesem Jahr wurden 227 Waldbrände registriert.
- Die Anzahl der Tage mit Waldbrandgefahr der Stufe 4 und 5, die in der aktuellen KNP 1991–2020 verzeichnet wurde (15), wird nur durch den Wert des RCP8.5, 85. Perzentil, in der fernen Zukunft noch überboten (24).

Klimatische Veränderungen, wie etwa erhöhte Temperaturen und stagnierende Niederschläge in den Frühjahrs- und Sommermonaten ([KFAM 2.2](#)) sowie die dadurch verstärkte Verdunstung und Trockenheit, können die Waldbrandgefahr in NRW erhöhen. Die Kombination von steigenden Lufttemperaturen mit der deutlich verlängerten Vegetationsperiode führt zu einem wesentlich höheren Wasserbedarf und zu einer verminderten Grundwasserneubildung. Der höhere Wasserbedarf wird in den zukünftig voraussichtlich häufiger vorkommenden, sehr trockenen und warmen Jahren nicht mehr gänzlich gedeckt werden können. Dadurch entstehende Schadh Holzflächen mit hohem Totholzanteil bieten Feuern zusätzliche Nahrung.

Die in der Waldbrandsaison (Anfang März bis Mitte Oktober) tagesaktuellen Information zur Waldbrandgefahr werden üblicherweise in Form des Waldbrandindex (*Fire Weather Index*; VAN WAGNER 1987) dargestellt. Berechnet wird dieser aus der relativen Luftfeuchte, der Niederschlagssumme und der Windgeschwindigkeit und reicht von Stufe 1 (sehr geringe Gefährdung) bis Stufe 5 (sehr hohe Gefährdung). Für die Darstellung der Waldbrandgefährdung wird im Folgenden die Anzahl der Tage pro Jahr angegeben, an denen die Gefährdungsstufe 4 erreicht oder überschritten wird.

In der aktuellen Klimanormalperiode 1991–2020 kommen zwischen März und Oktober durchschnittlich rund 15 Tage pro Jahr mit der Waldbrandindexstufe 4 oder höher vor (Tabelle 23). Im Vergleich zur ersten verfügbaren KNP 1961–1990 ist die Anzahl der Tage dieser Waldbrandindexstufen um 10 Tage angestiegen.

**Tabelle 23:** Mittlere Anzahl der Tage mit Waldbrandgefahrenstufe 4 + 5 in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1961–1990, 1971–2000, 1981–2010 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: LANUV NRW; Datengrundlage: DWD).

Beobachtung				Projektion						
1961–1990	1971–2000	1981–2010	1991–2020	Perzentil	2031–2060			2071–2100		
					RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
5	7	9	15	15	3	6	8	5	7	8
				50	7	9	10	10	10	14
				85	14	14	14	13	14	24

Mit Hilfe der Daten des Klimafolgen- und Anpassungsmonitorings (KFAM) können auch Aussagen zu Einzeljahren und der Anzahl der Waldbrände getroffen werden ([KFAM 7.4](#)). Wichtig ist, dass diese Daten nicht wie die Karten und Werte in Tabelle 23 auf den dafür verwendeten Rasterdaten beruhen, sondern aus einer Mittelung über mehrere Stationsdaten in NRW resultieren. Daher können diese Werte leicht von den Kartenwerten abweichen. Das Jahr 2018 war bisher das Jahr mit den meisten Tagen (63) mit einem Waldbrandindex von 4 und 5 ([KFAM 7.4](#)). Über die gesamte Zeitreihe hinweg (1961–2022) liegt der Mittelwert der Tage mit Waldbrandindex 4 und 5 bei 16 Tagen im Jahr. Nach einer relativ waldbrandarmen Zeit nach 1996 (174 Brände) – mit Ausnahme von 2003 (165 Brände) – markieren die Jahre 2018, 2020 und 2022 mit 159, 227 und 203 Bränden neue Höchststände bei der Anzahl an Waldbränden ([KFAM 7.4](#)). Der Mittelwert 1991–2020 beträgt 55 Waldbrände pro Jahr.

Hinsichtlich der möglichen zukünftigen Entwicklung der Anzahl der Tage pro Jahr mit einem Waldbrandindex der Stufen 4 und 5 zeigt sich im Vergleich zur aktuellen Klimanormalperiode 1991–2020, dass hier die Projektionen für die Zukunft bereits heute weitgehend eingeholt oder überboten werden (Tabelle 23). Lediglich beim 85. Perzentil des Szenarios RCP8.5 im Zeitraum 2071–2100 wird noch einmal eine klare Verschlechterung gegenüber der aktuellen Situation dargestellt. Der untere Rand der Bandbreite der Klimaprojektionen liegt meist auf dem Niveau der Klimanormalperiode von 1971–2000 und teilweise leicht darunter. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass hier die projizierten zunehmenden Niederschlagsmengen die höheren Temperaturen hinsichtlich der Waldbrandgefahr kompensieren.

### 3.3 Wasserversorgung und Schiffbarkeit

#### 3.3.1 Wasserhaushaltsgrößen

- Die Grundwasserneubildung in der aktuellen KNP 1991–2020 war sehr gering: der jährliche Mittelwert der Grundwasserneubildung von 123 mm (1991–2020) wird in den Projektionsdaten nur durch das 15. Perzentil des Szenarios RCP8.5 am Ende des Jahrhunderts mit 119 mm unterschritten.
- Die Klimanormalperiode 1981–2010 liefert mit 415 mm mittleren jährlichen Gesamtabflusses analog zur bisher höchsten mittleren jährlichen Niederschlagsmenge die bisher höchste Abflussmenge im Beobachtungszeitraum und stellt somit einen deutlichen Kontrast zur aktuellen Klimanormalperiode (364 mm) dar.
- Die Klimaprojektionen deuten eine in der fernen Zukunft größere Spannweite für den Gesamtabfluss an, in welcher der Median und das 85. Perzentil in allen Szenarien über und das 15. Perzentil unter den Werten des gesamten Beobachtungszeitraumes liegen. Somit ergibt sich eine mögliche Tendenz hin zu künftig steigenden Gesamtabflüssen.
- Die Evapotranspiration ist im Beobachtungszeitraum bereits deutlich angestiegen. Dabei ist es wahrscheinlich, dass die tatsächliche Evapotranspiration 1991–2020 bereits durch das Niederschlagsdargebot limitiert wurde und aufgrund der hohen Lufttemperaturen noch deutlich höher hätte ausfallen können. Zukünftig könnte sie noch deutlich ansteigen (85. Perzentil alle Szenarien).

In diesem Abschnitt werden die beobachteten und möglichen zukünftigen Entwicklungen der für den Wasserhaushalt relevanten Größen dargestellt. Durch die außergewöhnlichen Trockenjahre 2018 bis 2022 in Nordrhein-Westfalen stieg das Interesse an hochaufgelösten Daten zur Lage der Wasserversorgung sehr deutlich an. Dazu wurden im Kooperationsprojekt „GROWA+ NRW 2021“ zwischen dem Forschungszentrum Jülich und dem LANUV NRW umfangreiche Studien zu den Wasserhaushaltsgrößen Grundwasserneubildung, Netto-Gesamtabfluss und Tatsächliche Evapotranspiration in NRW mit einer räumlichen Auflösung von 100 m x 100 m erstellt. Die Grundwasserneubildung beschreibt den Teil des Wasserkreislaufes, der in das Grundwasser versickert und den Grundwasserleiter speist. Mit dem Begriff Gesamtabfluss werden alle ober- und unterirdischen Abflusskomponenten zusammengefasst. Die Evapotranspiration fasst die Wasserhaushaltsgrößen Verdunstung (Evaporation) und Wasserabgabe über Poren von Pflanzen (Transpiration) zusammen. Mit Hilfe des vom Forschungszentrum Jülich entwickelten Modells mGROWA (LANUV 2021b, HERMANN et al. 2014 und HERRMANN et al. 2015) kann die Entwicklung dieser Wasserhaushaltsparameter sowohl für den Beobachtungszeitraum ab 1961 bis zur Gegenwart (vgl. LANUV-Fachbericht 110, Teilbericht IIa, LANUV 2021b) als auch die mögliche zukünftige Zustände der Grundwasserneubildung und der anderen bereits genannten Wasserhaushaltsgrößen betrachtet werden (vgl. LANUV-Fachbericht 110, Teilbericht IX, LANUV 2021c).

Das räumliche Muster der Grundwasserneubildung ist in Nordrhein-Westfalen eher heterogen. Hierfür sind zum einen die Landnutzung und Untergrundverhältnisse und zum anderen die Niederschläge und Verdunstungsprozesse ausschlaggebend. Betrachtet man den Beobachtungszeitraum 1961–2020, kann man erkennen, dass sich die Grundwasserneubildung in der aktuellen Klimanormalperiode 1991–2020 mit 123 mm auf dem bisher niedrigsten Niveau befindet (Tabelle 24). Demgegenüber liegt der Mittelwert 1961–1990 mit 136 mm auf einem höheren Niveau. Bei den jährlichen Niederschlagsmittelwerten (vgl. Kapitel 3.2) sind beide Klimanormalperioden vergleichbar, wobei 1991–2020 noch etwas niederschlagsärmer war. Allerdings sorgt die Steigerung der mittleren jährlichen Lufttemperatur 1991–2020 um fast ein Grad Celsius im Vergleich der beiden Zeiträume (vgl. Kapitel 3.1) für wesentlich höhere Evapotranspirationen (siehe tatsächliche Evapotranspiration in Tabelle 26), sodass deutlich weniger Niederschlag für die Grundwasserneubildung zur Verfügung steht. Der Niederschlagseinfluss wird im Zeitraum 1981–2010 besonders prägnant. Hier wurde die höchste Niederschlagssumme aller Klimanormalperioden erreicht; dies führte trotz relativ hoher Temperaturen (vgl. Kapitel 3.1) und somit Verdunstung zu einem sehr hohen Niveau der Grundwasserneubildung mit einem jährlichen Mittelwert von 147 mm.

Tabelle 24 zeigt neben den jährlichen Mittelwerten des Beobachtungszeitraums 1961–2020 auch mögliche jährliche Grundwasserneubildungsmittelwerte für die Zukunftszeiträume 2031–2060 und 2071–2100 an. Die vom Forschungszentrum Jülich mit Hilfe des ReKliEs-De Klimaensembles (HÜBENER et al. 2017) berechneten Mittelwerte ergaben in der Summe keine signifikanten Veränderungen bei der Grundwasserneubildung (LANUV 2021c). Bemerkenswert ist jedoch die Tatsache, dass der jährliche Mittelwert der Grundwasserneubildung von 123 mm 1991–2020 nur durch den unteren „trockenen“ Rand der Bandbreite (15. Perzentil) des Szenarios RCP8.5 am Ende des Jahrhunderts mit 119 mm unterboten wird, während beim 85. Perzentil (= „feuchter, oberer Rand der Bandbreite“) aller Szenarien für beide Zukunftszeiträume nochmals höhere jährliche Mittelwerte möglich erscheinen, als sie im bisher niederschlagsreichsten Zeitraum 1981–2020 erreicht wurden. Der Median (50. Perzentil) hingegen

spiegelt in beiden Zukunftszeiträumen und über alle Szenarien hinweg mehr oder weniger die bisherigen Erfahrungswerte des Beobachtungsraumes wieder.

Angesichts des durch die außergewöhnlichen Trockenjahre und bisher unbekannt hohen Temperaturen geprägten jährlichen Grundwasserneubildungswertes 1991–2020 stellt sich die Frage, ob dieser geringe 30-jährige Mittelwert noch im Rahmen der Klimavariabilität liegt und die Grundwasserneubildung wieder ansteigen wird oder ob man sich für die Zukunft mit nochmals niedrigeren jährlichen Mittelwerten der Grundwasserneubildung auseinandersetzen sollte. Angesichts der erlebten Trockenjahre und den voraussichtlich nochmals deutlich ansteigenden Temperaturen kann nicht ausgeschlossen werden, dass selbst das 15. Perzentil des RCP8.5 Szenarios 2071–2100 noch unterboten werden kann. Andererseits zeigen das Jahr 2023 mit seinen Niederschlagsrekorden und das fortschreitende Jahr 2024, dass deutlich höhere Niederschläge und somit deutlich höhere Grundwasserneubildungsraten ebenfalls plausibel sind. Inwiefern die möglicherweise ansteigenden Niederschlagsmengen die potenziell schneller steigenden Temperaturen und Evapotranspirationsraten ausgleichen können, bleibt eine spannende Frage. Es ist auf jeden Fall ratsam, bei der Grundwasserneubildung auch mit dem unteren, „trockenen“ Bandbreitenrand der Klimaprojektionen zu rechnen und sich zusätzlich an den Beobachtungswerten zu orientieren. Ergänzend hierzu liefert die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Ihrem im April 2024 gestarteten Onlineportal GRUVO (BGR 2024) erstmalig Klimaprojektionen für bundesweite Grundwasser-Pegel, wovon auch einige in NRW liegen. Eine begleitende Studie (WUNSCH et al. 2022) kommt dabei zum Ergebnis, dass insbesondere im RCP8.5 Szenario mit fallenden Grundwasser-Pegeln gerechnet werden muss.

**Tabelle 24:** Mittlere jährliche Grundwasserneubildung in mm in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: [Klimaatlas NRW – WS GWN](#); Datengrundlage: Forschungszentrum Jülich, DWD).

1961–1990	1971–2000	1991–2020		2031–2060			2071–2100		
Beobachtung			Perzentil	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
136	135	123	15	128	129	129	125	129	119
			50	140	145	145	136	143	146
			85	159	161	160	148	167	180

Der Gesamtabfluss wird maßgeblich durch den Niederschlag beeinflusst, sodass der Gesamtabfluss ein ähnliches räumliches Muster wie die Niederschlagssumme aufweist. Wie bei der Grundwasserneubildung zeigt die Klimanormalperiode 1991–2020 mit 364 mm innerhalb des gesamten Beobachtungszeitraums 1961–2020 den geringsten jährlichen Mittelwert beim Gesamtabfluss (Tabelle 25). Die Klimanormalperiode 1981–2010 liefert mit 415 mm mittleren jährlichen Gesamtabflusses analog zur bisher höchsten mittleren jährlichen Niederschlagsmenge (vgl. Kapitel 3.2) die bisher höchste Abflussmenge im Beobachtungszeitraum und stellt somit einen deutlichen Kontrast zur aktuellen Klimanormalperiode dar. Tabelle 25 zeigt ebenfalls, dass der jährliche Mittelwert des Gesamtabflusses 1991–2020 knapp unterhalb des 15.

Perzentils („trockener Bandbreitenrand“) der Zukunftsprojektionen für das Ende des Jahrhunderts (2071–2100) liegt. Die für die Einordnung des aktuellen jährlichen Mittelwertes der Grundwasserneubildung durchgeführten Interpretationsversuche können eins zu eins auch für den Gesamtabfluss 1991–2020 übernommen werden. Es wird sich zeigen, ob die Projektionen zu optimistisch sind oder ob die zukünftigen jährlichen Mittelwerte des Gesamtabflusses sich tatsächlich in der in Tabelle 25 gezeigten Bandbreite der Zukunftsprojektionen bewegen werden. Auch hier ist es aus Vorsorgegründen geboten, mit noch niedrigeren Mittelwerten in der Zukunft zu rechnen bzw. sich an den Beobachtungswerten zu orientieren. Auf der anderen Seite dürfen aus Vorsorgegründen auch die Projektionsergebnisse für das 85. Perzentil („feuchterer Bandbreitenrand“) mit möglichen, zum Teil ähnlich gravierenden Folgen, wie beispielsweise häufigere Hochwasserereignisse (auch, wenn diese nicht aus den jährlichen Mittelwerten abgelesen werden können), nicht außer Acht gelassen werden.

**Tabelle 25:** Mittelwerte des jährlichen Gesamtabfluss in mm in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: [Klimaatlas NRW – WS\\_AF](#); Datengrundlage: Forschungszentrum Jülich, DWD).

1961–1990	1971–2000	1991–2020		2031–2060			2071–2100		
Beobachtung			Perzentil	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
384	384	364	15	372	382	380	366	382	366
			50	398	410	412	388	402	422
			85	436	442	445	412	458	495

Die tatsächliche Evapotranspiration ist limitiert durch das Wasserdargebot, während die potenzielle Evapotranspiration in der Theorie ein stets ausreichendes Wasserdargebot annimmt. Die räumliche Struktur der tatsächlichen Evapotranspiration unterscheidet sich deutlich von der des Niederschlages. Die Landbedeckung (Wasser, Bewuchs, versiegelte Fläche etc.) spielt hier die dominante Rolle. Tabelle 26 stellt die jährlichen Mittelwerte der tatsächlichen Evapotranspiration im Beobachtungszeitraum 1961–2020 mit den möglichen, zukünftigen jährlichen Mittelwerten der Klimaprojektionen für die Zeiträume 2031–2060 und 2071–2100 gegenüber. Ausgehend von dem sehr ähnlichen Niveau der Niederschlagsmengen 1961–1990 und 1991–2020 (vgl. Kapitel 3.2) wird in Tabelle 26 ersichtlich, dass die tatsächliche Evapotranspiration im Beobachtungszeitraum angestiegen ist. Durch die um annähernd 1 °C höheren jährlichen Mitteltemperaturen in der Klimanormalperiode 1991–2020 (vgl. Kapitel 3.1) wurde diese Steigerung erst ermöglicht. 1981–2020 stand zwar am meisten Niederschlagswasser für die tatsächliche Evapotranspiration zur Verfügung, jedoch waren die Lufttemperaturen noch nicht ganz so hoch wie in der aktuellen Klimanormalperiode. Es ist wahrscheinlich, dass die tatsächliche Evapotranspiration 1991–2020 bereits durch das Niederschlagsdargebot limitiert wurde und aufgrund der hohen Lufttemperaturen noch deutlich höher hätte ausfallen können. Die in Tabelle 26 ebenfalls dargestellte Übersicht der Zukunftsprojektionen zeigt die möglichen Entwicklungen bei der mittleren jährlichen tatsächlichen Evapotranspiration. Die Ergebnisse des 15. Perzentils aller drei Klimaszenarien und beider Zukunftszeiträume deuten an, dass der beobachtete jährliche Mittelwert von 488 mm tatsächlicher Evapotranspiration 1971–2000, wo noch kein allzu großes Klimawandelsignal zu erkennen ist und auch einige

trockene Jahre vorkamen, noch leicht unterboten werden kann. Dies kann primär mit einem in Zukunft noch begrenzteren Niederschlagsangebot und einem halbwegs begrenzten Temperaturanstieg erklärt werden. Das 50. Perzentil spiegelt über alle Szenarien und Zeiträume hinweg den bisherigen Erfahrungshorizont der Evapotranspiration wider. Beim 85. Perzentil sind bei allen Szenarien und Zeiträumen – zum Teil deutlich – höhere jährliche Mittelwerte bei der tatsächlichen Evapotranspiration möglich, als sie bisher aufgetreten sind. Gerade gegen Ende des Jahrhunderts 2071–2100 zeigt sich der je nach Szenario deutlich verstärkte Strahlungsantrieb. Durch die Kombination von mittleren jährlichen Niederschlagshöhen in bisher noch nie da gewesener Höhe (vgl. Kapitel 3.2) bei gleichzeitig nochmals sehr stark angestiegenen mittleren Lufttemperaturen im Szenario RCP4.5 und vor allem RCP8.5 (vgl. Kapitel 3.1) werden deutlich höhere jährliche Mittelwerte der tatsächlichen Evapotranspiration ermöglicht. Eine direkte Folge von so hohen tatsächlichen Evapotranspirationswerten können Gewitter in bislang unbekannter Intensität sein, denn neben der eigentlichen spürbaren (sensiblen) Wärme, die deutlich ansteigen wird, liefert die im Wasserdampf gebundene Energie (latente Wärme) zusätzlich Treibstoff für Gewitter.

**Tabelle 26:** Mittlere jährliche Evapotranspiration in mm in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: [Klimaatlas NRW – WS\\_EVA](#); Datengrundlage: Forschungszentrum Jülich, DWD).

1961–1990	1971–2000	1991–2020		2031–2060			2071–2100		
Beobachtung			Perzentil	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
491	488	508	15	484	481	484	488	489	486
			50	500	497	499	498	504	511
			85	513	510	520	516	523	533

### 3.3.2 Klimatische Wasserbilanz

- Im gesamten Beobachtungszeitraum 1961–2020 verfügt die aktuelle Klimanormalperiode 1991–2020 mit 289 mm über die bisher geringste klimatische Wasserbilanz.
- Der bisher aufgetretene geringste Wert der klimatischen Wasserbilanz im Frühjahr der aktuellen KNP 1991–2020 von -1 mm wird auch in den Projektionen nicht unterboten. Im Sommer werden voraussichtlich noch trockenere Bedingungen als im gesamten Beobachtungszeitraum auftreten, mit teilweise erheblichen negativen Abweichungen der klimatischen Wasserbilanz.

Die klimatische Wasserbilanz (in Millimeter), als Differenz zwischen Niederschlag und Verdunstung (genauer der potenziellen Evapotranspiration), wird direkt durch Veränderungen von Temperatur und Niederschlag beeinflusst. Sie weist sowohl eine hohe regionale als auch zeitliche Variabilität auf. Für die klimatische Wasserbilanz stehen sowohl die jährlichen als auch saisonalen Mittelwerte der Klimanormalperioden innerhalb des Beobachtungszeitraumes 1961–2020 sowie für die Zukunftszeiträume 2031–2060 und 2071–2100 zur Verfügung, wie in Tabelle 27 und Tabelle 28 zu sehen ist. Diese Daten stammen im Gegensatz der bisher in

diesem Kapitel 3.3 dargestellten Größen vom Deutschen Wetterdienst. Ähnlich wie bereits schon bei den Wasserhaushaltsgrößen Grundwasserneubildung und Gesamtabfluss zeigt sich, dass im gesamten zur Verfügung stehenden Beobachtungszeitraum 1961–2020 die aktuelle Klimanormalperiode 1991–2020 mit 289 mm über die bisher geringste klimatische Wasserbilanz verfügt. Auch hier macht sich bei ähnlichen mittleren jährlichen Niederschlagssummen (vgl. Kapitel 3.2) die stark gestiegene mittlere jährliche Lufttemperatur bemerkbar (vgl. Kapitel 3.1). Betrachtet man die klimatische Wasserbilanz 1991–2020 für das Frühjahr, so ist der Mittelwert von -1 mm erheblich geringer als die Frühjahrs-Mittelwerte der anderen Klimanormalperioden im Beobachtungszeitraum. Beim Vergleich mit dem 15. Perzentil der drei Szenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 für die Mitte des Jahrhunderts 2031–2060 und die ferne Zukunft 2071–2100 wird deutlich, dass das Frühjahr 1991–2020 selbst die trockensten Mittelwerte des Szenarios RCP8.5 knapp unterbietet. Dies ist bei den jährlichen Mittelwerten und auch den Mittelwerten der anderen Jahreszeiten für 1991–2020 nicht der Fall. Hier zeigen die Projektionsergebnisse des 15. Perzentils zum Teil mögliche, nochmals erheblich geringere klimatische Wasserbilanzen, als sie bisher erlebt wurden. Auf der anderen Seite übertreffen nur einige Szenarien im 85. Perzentil die Jahresmittelwerte der klimatischen Wasserbilanz von 343 mm, wie sie im bisher niederschlagsreichsten Abschnitt 1981–2010 registriert wurde. Im Vergleich zur Grundwasserneubildung und zum Gesamtabfluss liefern die Zukunftsprojektionen der klimatischen Wasserbilanz, abgesehen vom Mittelwert des Frühjahrs 1991–2020, deutlich trockenere mögliche Mittelwerte. Angesichts der Tatsache, dass die mittlere klimatische Wasserbilanz im Frühjahr 1991–2020 bereits geringer war als alle Projektionsergebnisse und auch, dass bei der Grundwasserneubildung und beim Netto-Gesamtabfluss (Tabelle 24 und Tabelle 25) der Zeitraum 1991–2020 bereits die Mittelwerte des 15. Perzentils der Projektionen zum Teil unterschritten hat, sind die übrigen Mittelwerte der klimatischen Wasserbilanz durchaus plausibel. Daher empfiehlt es sich, auch die extrem niedrigen klimatischen Wasserbilanzen für den Sommer und das gesamte Jahr in Klimaanpassungsstrategien zu berücksichtigen.

**Tabelle 27:** Mittlere jährliche Klimatische Wasserbilanz in mm in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: [Klimaatlas NRW – WS\\_KWB](#); Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst).

1961–1990	1971–2000	1991–2020		2031–2060			2071–2100		
Beobachtung			Perzentil	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
316	303	289	15	232	245	236	219	243	163
			50	303	311	300	284	293	259
			85	348	345	339	331	349	336

**Tabelle 28:** Mittlere saisonale Klimatische Wasserbilanz in mm in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: [Klimaatlas NRW – WS KWB](#); Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst).

Jahres- abschnitt	1961– 1990	1971– 2000	1991– 2020	2031–2060			2071–2100			
	Beobachtung			Perzentil	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
Frühling	38	26	-1	15	19	23	19	8	28	3
				50	38	35	31	29	40	31
				85	50	47	43	45	54	48
Sommer	-13	-30	-27	15	-81	-91	-84	-77	-97	-131
				50	-49	-46	-54	-54	-65	-94
				85	-17	-23	-28	-21	-26	-59
Herbst	108	123	121	15	97	97	93	99	92	78
				50	114	119	115	114	115	106
				85	128	146	133	134	133	138
Winter	183	185	197	15	178	185	181	165	183	187
				50	190	197	203	188	202	212
				85	211	210	229	206	215	239

Angesichts der zu erwartenden weiteren Temperaturerhöhung und der daraus resultierenden möglichen Konsequenzen sollte das bereits eingetretene Erreichen der „trockenen“ Bandbreitenränder, wie es bei der Grundwasserneubildung, beim Gesamtabfluss und bei der klimatischen Wasserbilanz der Fall ist, deutlich machen, dass durchaus noch extremere Trockenjahre als 2018 bis 2022 Realität werden können und entsprechende Vorkehrungen getroffen werden müssen. Andererseits können auch beispiellos hohe Mittelwerte bei den benannten Parametern auftreten, die dann als gegensätzliches Extrem auch wieder deutliche Nachteile und Folgen mit sich bringen können.

### 3.3.3 Beobachtete und mögliche zukünftige Abflüsse/Wasserstände und Auswirkungen auf die Schiffbarkeit am Rheinpegel-Standort Düsseldorf

- Die Projektionen für den mittleren Abfluss (MQ) zeigen in allen Zeiträumen und allen Szenarien eine Spannweite, die sowohl Abnahmen als auch Zunahmen zeigt, sodass die Entwicklung nicht eindeutig ist.
- Die Kennwerte, die auf trockene Situationen anspielen, wie der mittlere Niedrigwasserabfluss (MNQ) sowie der Abfluss, der im Mittel an 20 Tagen unterschritten wird (Q20), zeigen insbesondere zum Ende des Jahrhunderts eine Abnahme, d. h. eine Entwicklung zu niedrigeren Wasserständen in trockenen Situationen und „trockeneren Verhältnissen“.
- Die Summe der Unterschreitungstage des Gleichwertigen Wasserstands (GIW) als ein Indikator für die Schiffbarkeit zeigt, dass dieser in der fernen Zukunft häufiger unterschritten und somit die Schiffbarkeit eingeschränkt wird.

Nordrhein-Westfalen stellt den größten Anteil aller Bundesländer am Güterumschlag der Binnenschifffahrt Deutschlands: beinahe die Hälfte davon wird in NRW abgewickelt (DESTATIS 2024). Insbesondere der Rhein besitzt als wichtigste Binnenschifffahrtsstraße Deutschlands eine herausragende Bedeutung für den Güterverkehr. Er verbindet wichtige industrielle Zentren und ermöglicht einen kostengünstigen Warenaustausch.

Allerdings steht die Binnenschifffahrt vor großen Herausforderungen. Bereits der beobachtete Klimawandel beeinflusst die heutige Binnenschifffahrt auf dem Rhein und anderen Wasserstraßen auf vielfältige Weise: Veränderte Wasserstände in Flüssen und Kanälen führen immer häufiger zu Engpässen oder Unterbrechungen bei der Schifffahrt. Niedrigwasserphasen können Ladungsbeschränkungen verursachen, während erhöhte Wasserstände starke Strömungen und Überschwemmungen begünstigen. Die durch den allgemeinen Temperaturanstieg erhöhten Wassertemperaturen haben zudem Einfluss auf die Lebensbedingungen in aquatischen Ökosystemen und wirken sich gleichzeitig negativ auf die Schiffbarkeit von Gewässern aus, z. B. durch vermehrtes Algenwachstum oder Veränderungen der Wasserqualität. Ein signifikanter Anstieg der Gewässertemperatur des Rheins in den vergangenen fünfzig Jahren lässt sich durch das Klimafolgen- und Anpassungsmonitoring NRW nachweisen ([KFAM 4.7](#)). Weitere negative Auswirkungen des Klimawandels für die Schiffbarkeit sind ein erhöhtes oder intensiveres Auftreten von Extremwetterereignissen wie Stürmen, Starkregen oder Dürren, indem sie die Navigation erschweren oder die Infrastruktur beschädigen. Im Süden Deutschlands, wo Flüsse von Gletschern gespeist werden, trägt der Gletscherrückgang zudem zur Verringerung des Wasserflusses bei, was saisonale Wasserengpässe herbeiführen kann, insbesondere in trockenen oder wasserarmen Perioden.

Bei den projizierten Klimaveränderungen steigern sich all diese Einflussfaktoren wie auch deren Folgen noch einmal deutlich. Zur Ergebnisdarstellung der projizierten Pegelwerte standen als Datenquellen zum einen der DAS-Basisdienst und zum anderen der Kurzbericht „Restsee-Flutung“ der Bundesanstalt für Gewässerkunde (FLEISCHER & NILSON 2023) zur Verfügung. Um die Datenkonsistenz der beiden unterschiedlichen Datenquellen zu gewährleisten, wurden im Vorfeld alle Rheinpegel innerhalb des DAS-Basisdienstes geprüft. Da hierbei festgestellt wurde, dass sich die untersuchten Parameter aller aufgeführten Pegel zu den im oben genannten Kurzbericht dargestellten Ergebnissen für den Pegel Düsseldorf kongruent verhalten, werden somit im Folgenden beispielhaft für ganz NRW für den Rheinpegel-Standort Düsseldorf Projektionsdaten des Wasserhaushaltsmodells LARSIM-ME dargestellt und erläutert. Auf die Ergebnisse von FLEISCHER & NILSON (2023) wird zudem deshalb bevorzugt eingegangen,

da hier ein besonderer Fokus auf Niedrigwasser gelegt wurde. Das Flussgebiet der Weser wird in den folgenden Ausführungen nicht berücksichtigt, da dessen Dynamik durch Talsperren beeinflusst wird. Um auch die Hochwasser-Entwicklung abzubilden, werden zusätzlich die Projektionsergebnisse des mittleren Hochwasserabflusses aus dem DAS-Basisdienst Wasser und Klima für den Pegelstandort Düsseldorf ergänzt. Tabelle 29 und Tabelle 30 zeigen die wichtigsten Kennwerte des Pegels Düsseldorf als relative Abweichungen vom Referenzzeitraum 1971–2000 für die einzelnen Klimaszenarien. Diese sind wie folgt definiert:

**MNQ:** Langjähriges Mittel (30 Jahre) des niedrigsten Abflusses/Wasserstandes in einer Periode (hier: Wasserhaushaltsjahr, April bis März)

**Q20:** Abfluss/Wasserstand, der im langjährigen Mittel (30 Jahre) an 20 Tagen pro (Wasserhaushalts-)Jahr unterschritten wird

**MQ:** Mittlerer Abfluss/Wasserstand in einer Periode (hier: Hydrologisches Jahr, November bis Oktober)

**MHQ:** Langjähriges Mittel (30 Jahre) des höchsten Abflusses in einer Periode (hier: Hydrologisches Jahr, November bis Oktober)

**Q(GIW):** Abfluss, der sich bei gleichwertigem Wasserstand (GIW) einstellt. Der GIW ist ein offiziell festgelegter schiffahrtsbezogener Wasserstand, der im Mittel an 20 eisfreien Tagen pro Jahr unterschritten wird.

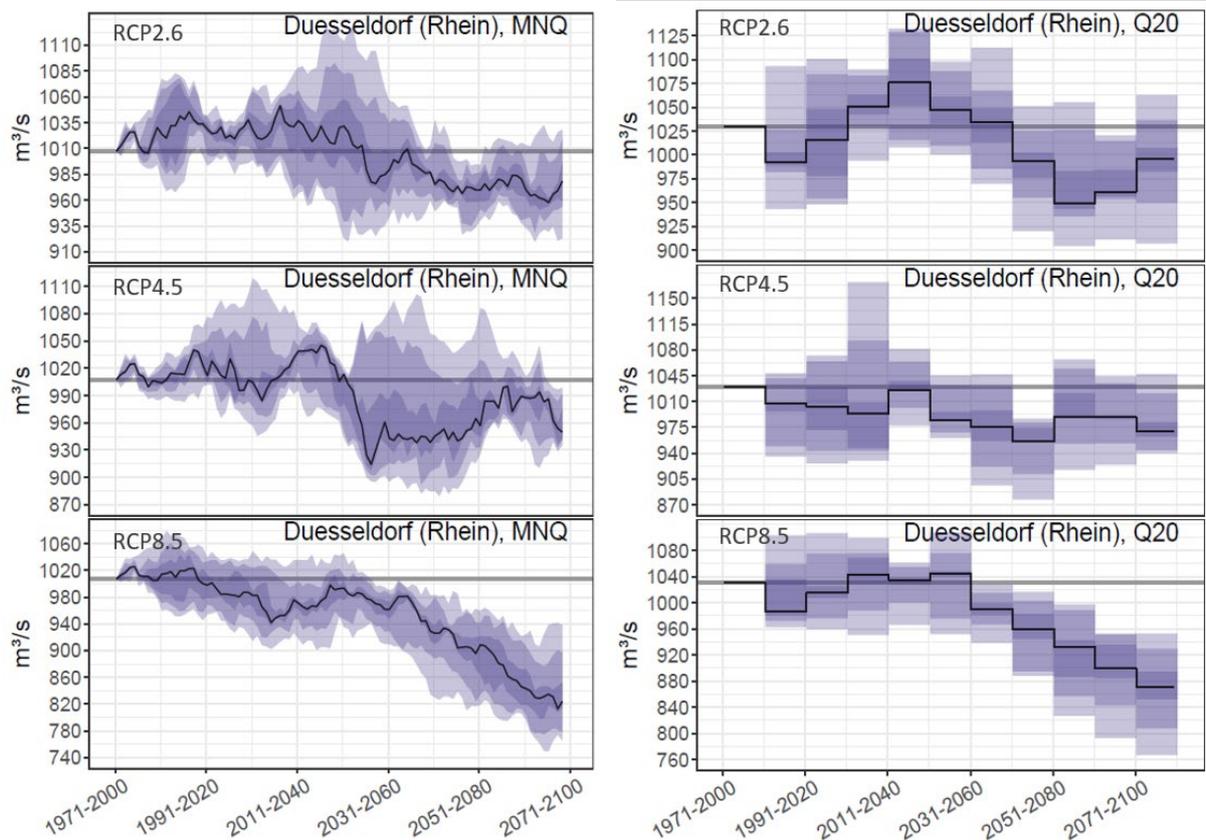
**Tabelle 29:** Übersicht über die Kennwerte MNQ, Q20, MQ und MHQ am Rheinpegel-Standort Düsseldorf im Beobachtungszeitraum 1971–2000 in m<sup>3</sup>/s sowie Änderungen für die den Beobachtungszeitraum 1993–2022 und die Projektionszeiträume 2031–2060 und 2071–2100 in % (Datenquelle (außer MHQ): FLEISCHER & NILSON 2023). \* Für MHQ liegt der letzte aktuelle Beobachtungszeitraum bei 1989-2018 (Datenquelle: DAS Basisdienst Klima und Wasser, BfG 2024).

Kennwert	1971–2000	1993–2022	Perzentil	2031–2060 [%]			2071–2100 [%]		
	[m <sup>3</sup> /s]	[%]		RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
MNQ	1007,3	0	15	-6	-11	-10	-8	-7	-24
			50	-2	-6	-5	-3	-6	-18
			85	+5	+8	-2	+2	-1	-7
Q20	1030,0	-1	15	-6	-13	-9	-12	-10	-23
			50	0	-5	-4	-7	-4	-13
			85	+8	+2	0	-1	+1	-8
MQ	2182,1	-2	15	-1	-1	0	-2	+3	-6
			50	+2	+4	+5	+3	+5	+6
			85	+12	+12	+8	+7	+14	+13
MHQ*	6522,7	-1	15	+1	+3	+2	-3	+8	+5
			50	+12	+5	+14	+6	+12	+18
			85	+15	+18	+20	+20	+19	+25

**Tabelle 30:** Übersicht über den Kennwert Q(GIW) in Tagen (hier als Summe der Unterschreitungstage des GIW (sumD(Q(GIW))) angegeben) im Beobachtungszeitraum 1971–2000 und Änderungen für die den Beobachtungszeitraum 1993–2022 und die Projektionszeiträume 2031–2060 und 2071–2100 in Tagen (Datenquelle: FLEISCHER & NILSON 2023).

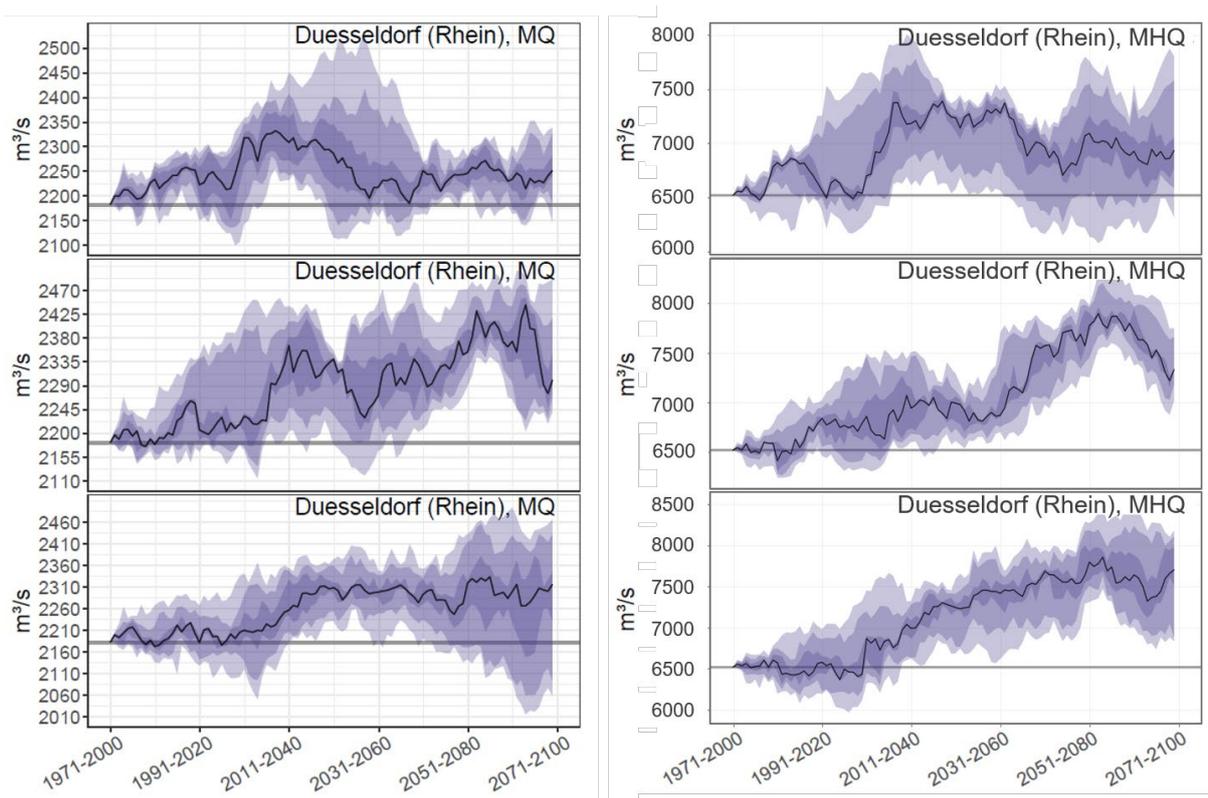
Kennwert	1971–2000 [Tage]	1993–2022 [Tage]	Perzentil	2031–2060 [Tage]			2071–2100 [Tage]		
	Beobachtung			RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
sumD(Q(GIW))	16	0	15	+6	+13	+9	+11	+8	+36
			50	-1	+4	+4	+3	+5	+17
			85	-5	-2	0	-3	-2	+7

Weist der mittlere Niedrigwasserabfluss (MNQ) für das Szenario RCP2.6 im Zeitraum 2031–2060 noch keine nennenswerten Veränderungen (um 5 %) auf, so sind jedoch in den anderen Szenarien teilweise deutliche Abnahmen zu erwarten, die sich vor allem im Szenario RCP8.5 zum Ende des Jahrhunderts hin noch einmal verstärken. Betrachtet man zudem die zeitliche Entwicklung (Abbildung 8, linke Spalte), so verlaufen die Mediane der Abflusswerte für RCP2.6 und RCP4.5 in der Zeitscheibe 2031–2060 noch innerhalb des positiven Bereichs; ab den 2050er Jahren fällt die projizierte Abweichung des MNQ von der Referenzperiode (hier: 1971–2000) ins Negative. Im RCP8.5 tritt die negative Abweichung des Medians bereits gegen Ende des Beobachtungszeitraumes auf und bleibt bis zum Ende des Jahrhunderts unter dem Wert der Referenzperiode bzw. sinkt noch einmal deutlich ab. Hier ist die prozentuale projizierte Abweichung des mittleren Niedrigwasserabflusses mit einer Spannweite von -7 bis -24 % (Median: -18 %) am größten (Tabelle 29). Eine ähnliche Entwicklung wurde für den Wasserstand/Abfluss, der an 20 Tagen im Jahr unterschritten wird (Q20), errechnet; auch hier liegen die größten negativen Abweichungen in der zweiten Hälfte des aktuellen Jahrhunderts (Tabelle 29, Abbildung 8, rechte Spalte). Somit fällt der an 20 Tagen im Jahr unterschrittene Wasserstand künftig zunehmend niedriger aus. Das heißt, dass v. a. zum Ende des Jahrhunderts in allen Szenarien mit einer Abnahme des mittleren Niedrigwasserabflusses gerechnet werden muss. Der MNQ stellt zwar nur einen Mittelwert über die Niedrigwasserstände und -abflüsse dar, aber auch der Q20 zeigt, dass Niedrigwasserphasen intensiver werden, daher ist zukünftig, wie oben bereits beschrieben, mit weiteren Einschränkungen der Schiffbarkeit und Wasserversorgung sowie ökologischen Auswirkungen zu rechnen.



**Abbildung 8:** 30-jährige Mittelwerte (Zeitraum gekennzeichnet durch x-Achse) des MNQ und des Q20 in  $\text{m}^3/\text{s}$  am Pegel Düsseldorf (Rhein), projiziert mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME auf Basis von 16 Klimaprojektionen unter Annahme der Szenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5. Unsicherheitsbereiche (von außen nach innen): 15/85%, 25/75%, 40/60%, 50% (schwarze Linie) (Quelle: FLEISCHER & NILSON 2023).

Der mittlere Abfluss unterliegt teils starken Schwankungen: so fallen die Unsicherheitsbereiche bzw. die Bandbreite bei den Szenarien RCP2.6 und RCP4.5 insbesondere in der Mitte des Jahrhunderts recht hoch aus. Zum Ende des Jahrhunderts nimmt die Spannweite der Projektionsergebnisse vor allem im Szenario RCP8.5 zu (Abbildung 9, linke Spalte). Insgesamt ist mit einer leichten Zunahme des MQ zu rechnen: im Zeitraum 2031–2060 liegt die Änderung zwischen -1 % und +12% und im Zeitraum 2071–2100 zwischen -6 % und +14 % (Tabelle 29; Abbildung 9, linke Spalte). Aufgrund der hohen Schwankungsbereiche der Ergebnisse, die ins Negative und Positive gehen, sind die Auswirkungen der Änderungen des MQ schwer abzuschätzen. Da die Niedrigwasserabflüsse jedoch zunehmen, ist damit zu rechnen, dass auch die Hochwasserabflüsse zunehmen, was sich im mittleren Abfluss wieder ausgleicht. Dadurch sind also sowohl Niedrigwasserphasen, also auch Hochwasserphasen mit den oben beschriebenen Auswirkungen zukünftig intensiver und ggf. auch häufiger zu erwarten.

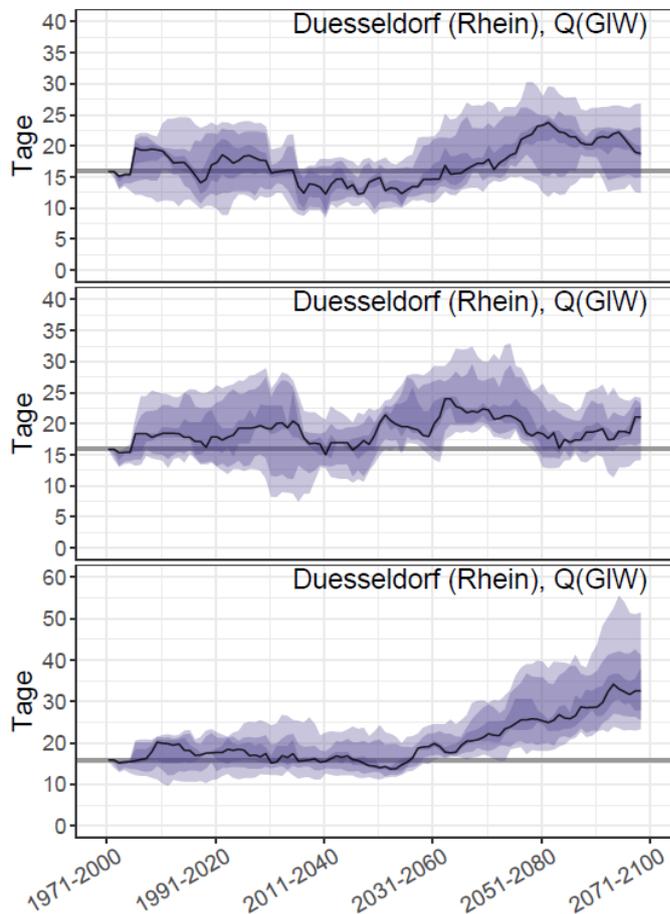


**Abbildung 9:** 30-jährige Mittelwerte (Zeitraum gekennzeichnet durch x-Achse) des MQ und des MHQ in  $\text{m}^3/\text{s}$  am Pegel Düsseldorf (Rhein), projiziert mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME auf Basis von 16 Klimaprojektionen unter Annahme der Szenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5. Unsicherheitsbereiche (von außen nach innen): 15/85%, 25/75%, 40/60%, 50% (schwarze Linie) (Quelle: FLEISCHER & NILSON 2023 für MQ, DAS Basisdienst Klima und Wasser, BFG 2024 für MHQ).

Der mittlere Hochwasserabfluss wird bei allen Klimaszenarien höher ausfallen (Abbildung 9, rechte Spalte). Dies passt sehr gut zusammen mit den sinkenden Niedrigwasserabflüssen bei gleichzeitig leicht ansteigenden mittleren Abflüssen. Die Änderung des MHQ (Tabelle 29) beträgt im Zeitraum 2031-2060 zwischen +1% bis +20 % gegenüber der Referenzperiode 1971-2000. In der fernen Zukunft beträgt die Änderung zwischen -3 % bis +25% gegenüber der Referenzperiode. Die Schwankungsbandbreite der mittleren Abflüsse ist somit in Zukunft größer, das Abflussregime wird also extremer (Abbildung 8 und Abbildung 9).

Der GIW stellt als offiziell festgelegter schiffahrtsbezogener Wasserstand, der im Mittel an 20 eisfreien Tagen pro Jahr unterschritten wird, die Auswirkungen des Klimawandels auf die Schiffbarkeit dar. Der Q(GIW) lag im Zeitraum 1971–2000 bei  $980 \text{ m}^3/\text{s}$ . Um die Entwicklung des Q(GIW) aufzuzeigen, wird nicht die Veränderung des Abflusswertes, sondern die Anzahl der Unterschreitungstage des GIW im Bezugszeitraum 1971–2000 ausgewertet. Die Summe der Unterschreitungstage des GIW zeigt ebenfalls eine sehr variable Entwicklung in den projizierten 30-Jahres-Mittelwerten (Tabelle 30) sowie über die beobachtete und projizierte Zeitreihe (Abbildung 10). Die größte (positive) Ergebnisspannweite weist über alle drei Szenarien hinweg das 15. Perzentil auf, die Höchstwerte von Zunahmen von bis zu 36 Tagen wurden für RCP8.5 errechnet. Im oberen Perzentilbereich (85. Perzentil) hingegen schwankt die Summe der Unterschreitungstage des GIW zwischen -5 Tagen und keiner Änderung in der Periode 2031–2060 und zwischen -3 Tagen und +7 Tagen im Zeitraum 2071–2100 (Tabelle 30). Somit ist in der fernen Zukunft in allen Szenarien mit einer erhöhten Einschränkung der Schiffbarkeit

durch niedrige Wasserstände zu rechnen, wie es auch schon die Auswertungen des MNQ und Q20 angedeutet haben.



**Abbildung 10:** 30-jährige Mittelwerte (Zeitraum gekennzeichnet durch x-Achse) des Q(GIW) in Tagen am Pegel Düsseldorf (Rhein), projiziert mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME auf Basis von 16 Klimaprojektionen unter Annahme der Szenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 Unsicherheitsbereiche (von außen nach innen): 15/85%, 25/75%, 40/60%, 50% (schwarze Linie) (Quelle: FLEISCHER & NILSON 2023 ).

Veränderte Wasserstände sowie verringerte Abflussraten können künftig verschiedene Auswirkungen auf Fließgewässer und deren Schiffbarkeit haben. Der Schiffsverkehr wird sich immer öfter auf Behinderungen durch saisonales Hoch- oder Niedrigwasser auf Schifffahrtsstraßen einstellen müssen, welche durch Dürren oder Starkregen meist noch zugespitzt werden. Sinkende Wasserstände, verringerte Fließgeschwindigkeiten, steigende Gewässertemperaturen und sinkende Sauerstoffgehalte, insbesondere in den Sommermonaten, sowie eine potenziell erhöhte Schadstofffracht bei Niedrigwassersituationen können die Lebensräume von Flora und Fauna nachhaltig beeinträchtigen, Tier- und Pflanzenarten gefährden oder sogar verschwinden lassen, wenn sich ihre Lebensbedingungen verschlechtern. Die Wasserversorgung wird in der Zukunft mit einem steigenden Risiko der Wasserknappheit konfrontiert werden. Dadurch werden sich Nutzungskonflikte um die Ressource Wasser erhöhen und die Verfügbarkeit von Trink-, Bewässerungs- oder Kühlwasser kann zunehmend eingeschränkt werden.

### 3.4 Zusammenfassung und Interpretation

Die Ergebnisse dieses Kapitels zeigen, dass **die Temperatur in NRW bereits deutlich angestiegen ist und – je nach Klimaszenario – noch weiter steigen wird**. Dies hat zur Folge, dass **Kälteperioden abnehmen und Hitzeperioden in Anzahl und Dauer zunehmen** werden. Bereits allein die Temperaturänderung hat weitreichende Folgen, wie beispielsweise eine eingeschränkte Leistungsfähigkeit von Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmern sowie insgesamt gesundheitliche Beeinträchtigungen der Bevölkerung während Hitzeepisoden bis hin zu deutlich erhöhten Sterblichkeitsraten infolge von Hitzewellen. Für die Vegetation und Landwirtschaft können Temperaturerhöhungen durch eine längere Wachstumsperiode und geringere Spätfrostgefahr positive Auswirkungen haben. Auch für jede Bürgerin oder jeden Bürger bedeuten höhere Temperaturen einen geringeren Heizenergiebedarf und somit positive Auswirkungen auf den Geldbeutel. Dementgegen stehen hier allerdings der Anstieg des Kühlenergiebedarfs bzw. die Folgen der Hitzebelastung auch der Bevölkerung in ihren Wohnräumen.

Betrachtet man neben der Temperatur auch die Veränderung des Niederschlags, werden die Auswirkungen auf Bevölkerung und Wirtschaft noch deutlich vielfältiger. **Extreme wie Starkniederschläge und langanhaltende Trockenheit werden häufiger bzw. intensiver**. Dies allein kann zu Schäden an der Infrastruktur (v. a. Starkregenereignisse und Hochwasser), Einschränkungen der Energieversorgung (Kühlwasserversorgung während Trockenperioden) und Lieferengpässen (z. B. bei Hoch-/Niedrigwasser etc.) führen.

Aber insbesondere die **Kombination aus den Temperatur- und Niederschlagsänderungen** haben **gravierende Auswirkungen auf viele Handlungsfelder und Lebensbereiche**. Höhere Temperaturen und Trockenheit führen neben direkt sichtbaren Auswirkungen wie beispielsweise Waldbränden oder Ernteeinbußen zu geringeren Wasserständen, Abflüssen und Grundwasserneubildung. Diese können sich langfristig auf die Ökosysteme, auf Gewässernutzungen sowie die Wasserversorgung auswirken. Bereits heute verschieben sich die Areale verschiedener Pflanzen und Tierarten ([KFAM 6.5](#) und [KFAM 6.7](#)) und neue, zum Teil invasive Arten kommen hinzu ([KFAM 6.6](#)). Auch der Wald und die Waldbewirtschaftung stehen vor großen Herausforderungen durch den Klimawandel. Zum einen gibt es bereits große Kalamitätsflächen, wo die einstigen Fichtenbestände durch Hitze, Trockenheit und Borkenkäfer ausgefallen sind, zum anderen muss bei der üblichen Lebenszeit von Bäumen und Wäldern weit in die Zukunft geplant werden, um diese während ihrer gesamten Lebensdauer klimastabil und resilient zu halten. Die Landwirtschaft hat es hierbei etwas leichter und kann ggf. im (Mehr-) Jahresturnus vor allem auf Witterungsveränderungen reagieren. Bei sinkenden Grundwasserständen und Abflüssen muss aber auch hier und für alle weiteren Lebensbereiche und Handlungsfelder auch zukünftig ausreichend Wasser zur Verfügung stehen. Zukünftig könnte es zu Einschränkungen in der Wasserversorgung und Konflikten bei der gerechten Verteilung der Ressource kommen – auch in einem eigentlich recht regenreichen Land wie Deutschland und NRW.

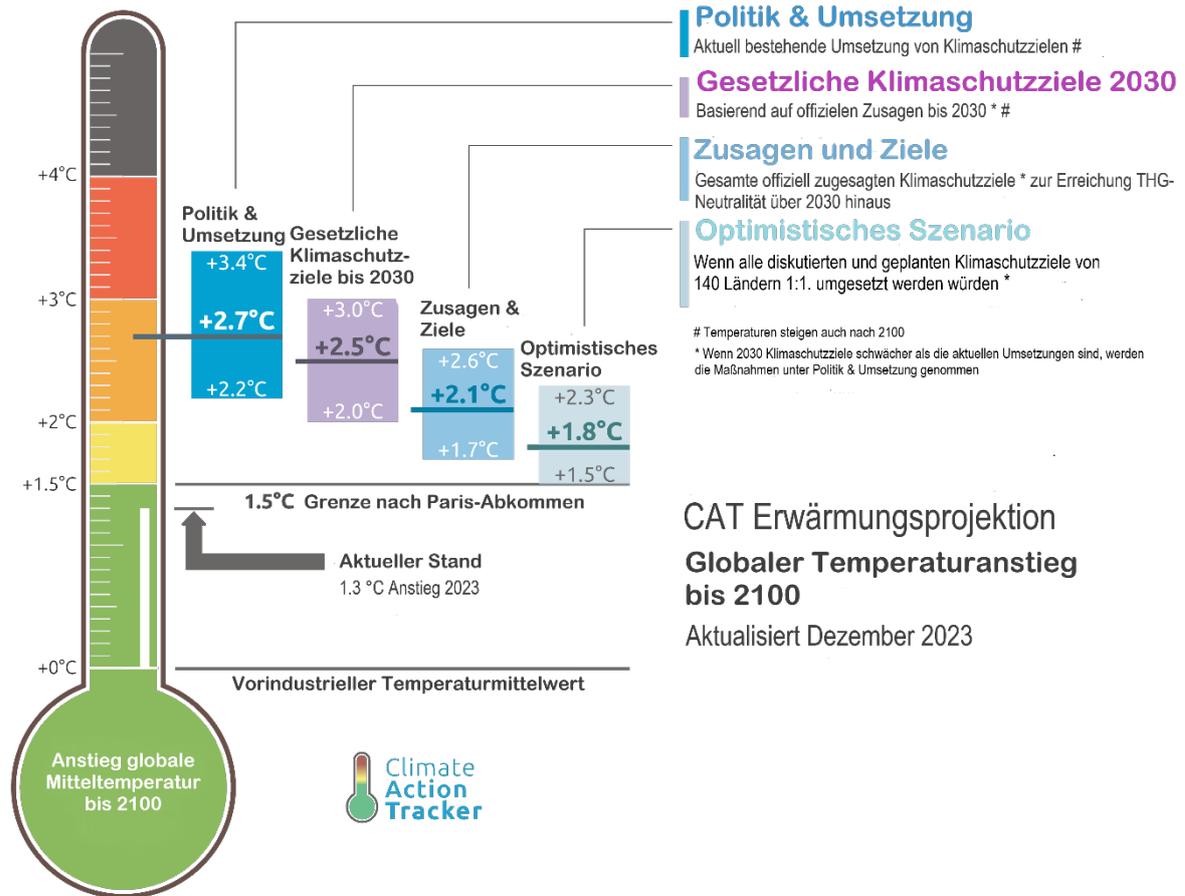
## 4 Stand der globalen Klimaschutzbemühungen und Empfehlung zur Szenarienwahl

Die Ergebnisse, die im vorangegangenen Kapitel vorgestellt wurden, zeigen, dass insbesondere beim „Weiter-wie-bisher“-Szenario mit schwerwiegenden Folgen des Klimawandels für NRW zu rechnen ist. Neben der Planung von entsprechenden Anpassungsmaßnahmen an diese Folgen, muss alles dafür getan werden, um die Auswirkungen des Klimawandels möglichst gering zu halten.

Um nachzuvollziehen, auf welchem Erwärmungspfad wir uns global befinden, wertet die Denkfabrik Climate Action Tracker die bereits verabschiedeten Klimaschutzziele und -maßnahmen entsprechend aus. Dabei unterscheidet die Denkfabrik zwischen unterschiedlichen Kategorien der Klimaschutzziele:

- **Politik und Umsetzung:**  
Die aktuell von den Ländern als Gesetze in Kraft getretenen Klimaschutzmaßnahmen und deren tatsächliche Umsetzung.
- **Offiziell ratifizierte, gesetzliche Klimaschutzziele bis 2030:**  
Die offiziellen Klimaschutzziele (*Nationally determined contributions*, NDCs) der Nationen bis 2030, wie sie im Rahmen des Klimaschutzabkommens von Paris an die Vereinten Nationen (UN) übermittelt wurden.
- **Zusagen und Ziele:**  
Die gesamten offiziell zugesagten Klimaschutzziele, die im besten Fall zur frühen Treibhausgasneutralität führen und für den Zeitraum nach 2030 ebenfalls gelten.
- **Optimistisches Szenario:**  
Wenn alle diskutierten und geplanten Klimaschutzziele von 140 Ländern eins zu eins umgesetzt werden würden.
- **1,5 °C-Grenze nach Paris-Abkommen:**  
Alle notwendigen Klimaschutzmaßnahmen, um diese wichtige Grenze nicht dauerhaft zu überschreiten.

Basierend auf den vorgestellten Kategorien der Klimaschutzziele als Szenario kann die mögliche Erderwärmung mit einem wesentlich konkreteren Bezug zu aktuellen Bedingungen abgeschätzt werden. Die Denkfabrik Climate Action Tracker liefert somit einen wichtigen Datensatz zur Kontrolle der aktuellen, von den Ländern vereinbarten Klimaschutzziele und deren Umsetzung. Mit Hilfe des CAT-Thermometers (Abbildung 11) können den jeweiligen Klimakategorie bestimmten Erwärmungspfade zugeordnet werden.



**Abbildung 11:** Der globale Temperaturanstieg bis 2100 projiziert nach aktuellen Klimaschutzbemühungen (Quelle: CLIMATE ACTION TRACKER 2024, übersetzt ins Deutsche)

Bei den aktuell bestehenden Klimaschutzbemühungen nach der Kategorie **Politik & Umsetzung**, würde sich die globale Temperatur auf einem Niveau zwischen **2,2 °C bis 3,4 °C und einem Median von 2,7 °C** gegenüber der vorindustriellen Zeit einpendeln. Somit wäre die 2 °C-Grenze als obere Marke des Paris-Abkommens sehr deutlich verfehlt. Nach dieser Kategorie bewegt sich die Klimaerwärmung in der ungefähren Größenordnung des **RCP6.0-Szenarios** (Tabelle 1). Der hier modellierte Erwärmungspfad hätte kaum kontrollierbare Folgen für die globale Gesellschaft und die Natur.

Die nur bis zum Jahr 2030 zugesagten Maßnahmen der **gesetzlichen Klimaschutzziele** würden für eine globale Erwärmung zwischen **2,0 °C und 3,0 °C und einem Median von 2,5 °C** gegenüber 1850–1900 sorgen. Diese Klimaschutzmaßnahmen werden als *National Determined Contributions* (NDCs) zum Weltklimarat bzw. der UN weitergeleitet. Der hier modellierte Bereich des Temperaturanstiegs liegt im Bereich von **Szenario RCP4.5** (Tabelle 1). Auf diesem Pfad wird sich die globale Erwärmung immer noch auf einem deutlich zu risikoreichen Niveau bewegen.

Werden sämtliche, offiziell dem Klimaabkommen von Paris zugesagten NDCs und vorhandene Langzeitziele zur Treibhausgasneutralität als **Zusagen & Ziele** tatsächlich eins zu eins umgesetzt, dann würde die globale Erwärmung im Vergleich zur vorindustriellen Zeit zwischen

**1,7 °C und 2,6 °C bei einem Median von 2,1 °C** im Jahr 2100 liegen. Als sicher und risikoarm kann diese Zukunftsaussicht noch nicht eingestuft werden.

Am weitesten bezüglich der betrachteten Klimaschutzkategorien geht das **optimistische Szenario**. Bei einer konsequenten und erfolgreichen Umsetzung aller in den jeweiligen Ländern vorgeschlagenen Klimaschutzmaßnahmen würde sich die globale Temperatur im Jahr 2100 in einem Bereich zwischen **1,5 °C bis 2,3 °C, mit einem Median von 1,8 °C** wärmer als 1850–1900 einpendeln. Dieses Niveau der Erwärmung entspricht ungefähr dem des **RCP2.6-Szenarios** (Tabelle 1), wobei hier der Median höher liegt als beim RCP2.6-Szenario. Der Medianwert von 1,8 °C Erwärmung gegenüber vorindustrieller Zeit liegt zwar unterhalb der im Pariser Klimaabkommen genannten Höchstgrenze von 2 °C globaler Erderwärmung, jedoch sollte auch die obere Bandbreite der modellierten Erwärmung deutlich unter 2 °C liegen, um auf der sicheren Seite zu sein.

All den bisher genannten Klimaschutzkategorien und den damit modellierten, nicht abstrakten Erwärmungspfaden steht das **1,5 °C-Ziel des Paris-Abkommens** gegenüber. Diese Grenze steht fest und wird nicht modelliert, da sie so im Abkommen auf der Klimakonferenz in Paris 2015 als zentrales Ziel formuliert wurde und vielmehr als Referenz dienen sollte, bis wohin die Folgen der globalen Erderwärmung noch als halbwegs beherrschbar gelten:

*„The purpose is to hold the increase in global average temperature to well below 2 °C above pre-industrial levels and to ensure that efforts are pursued to limit the temperature increase to 1.5 °C.“*

Parallel zum Modell der Denkfabrik Climate Action Tracker projiziert auch das *United Nations Environment Programme* (UNEP) in seinem im November 2023 veröffentlichten *Emissions Gap Report 2023* ganz ähnliche Temperaturanstiege entsprechend der zuvor genannten Klimaschutzkategorien.

So besteht eine Wahrscheinlichkeit von 66 %, dass die Klimaschutzbemühungen nach der Kategorie **Politik & Umsetzung** im Jahr 2100 zu einer globalen Erderwärmung von im **Median 3,0 °C** gegenüber dem globalen Mittel 1850–1900 führen (**Spannweite: 1,9 °C bis 3,8 °C**). Verglichen mit den RCP-Szenarien aus Tabelle 1 ist die Spannweite höher als beim **Szenario RCP6.0**.

Im Vergleich dazu liegt das **Optimistische Szenario** bei einem Temperaturanstieg von **2,0 °C** im Median (**Spannweite: 1,8 °C bis 2,5 °C**) gegenüber dem vorindustriellen Mittelwert, ebenfalls unter Annahme einer Wahrscheinlichkeit von 66 %. Hier zeigt der Vergleich mit Tabelle 1, dass sich diese Klimaschutzkategorien oberhalb des Szenario RCP2.6 und unterhalb des Szenario RCP4.5 einordnen lassen.

Sowohl CLIMATE ACTION TRACKER (2024) als auch der *Emissions Gap Report 2023* zeigen eindeutig, dass die aktuellen globalen Klimaschutzmaßnahmen völlig unzureichend sind, um auch nur annähernd auf die noch einigermaßen sichere Grenze von 1,5 °C globaler Erderwärmung gegenüber vorindustrieller Zeit zu kommen. Selbst die deutlich risikoreichere 2 °C-Grenze, vergleichbar dem Szenario RCP2.6, ist noch in weiter Ferne.

Zwar lassen die exponentiell steigenden Zahlen z.B. von installierten Windenergie- und Photovoltaikanlagen sowie die Verkäufe von Elektroautos und Wärmepumpen etwas Zuversicht aufkommen (CLIMATE ANALYTICS 2023, LENTON et al. 2023), allerdings müssen solche aufkei-

menden, positiven Entwicklungen auch aktiv unterstützt werden, was oft schwierig durchsetzbar ist. Laut dem Bericht „*State of Climate Action 2023*“ von BOEHM et al. (2023) ist der 1,5 °C-Pfad noch außer Reichweite und wird voraussichtlich immer unrealistischer zu erreichen sein. Dennoch besteht theoretisch nach diesem Bericht noch die geringe Möglichkeit, das 1,5 °C-Ziel zu erreichen. Angesichts der drohenden Klimafolgen einer darüber hinaus gehenden Erderwärmung lohnt es sich auf jeden Fall, um jedes Zehntelgrad zu kämpfen, auch wenn das 1,5 °C-Ziel verfehlt werden sollte.

Für die Auswahl der Basis, auf welcher Klimaanpassungsmaßnahmen entwickelt und umgesetzt werden, sollten mehrere Faktoren berücksichtigt werden. Ein ganz wesentlicher Punkt ist dabei der eben beschriebene aktuelle Erwärmungspfad. Zurzeit entspricht dieser etwa einem Temperaturanstieg von 2,7 °C bis 3 °C gegenüber vorindustriellem Niveau, was am ehesten durch das RCP6.0-Szenario repräsentiert wird. Ob die Beschlüsse der Weltklimakonferenz in Dubai 2023, die immerhin eine „Abkehr“ von fossilen Brennstoffen beinhalten, sowie die kommenden Ergebnisse der nächsten Weltklimakonferenz 2024 in Aserbaidschan, den Weg für eine so drastische Reduktion von Treibhausgasemissionen ebnen können, wie es für den 1,5 °C-Pfad und auch den 2 °C-Pfad notwendig wäre, muss realistischer Weise bezweifelt werden.

Darüber hinaus sollte eine gewisse Sicherheitsreserve eingeplant werden, da weder die Klimamodelle in der Lage sind das Klimasystem bis ins kleinste Detail abzubilden, noch alle Zusammenhänge und Wechselwirkungen (wie zum Beispiel Kippelemente) ausreichend erforscht und verstanden sind, um diese fehlerfrei abzubilden.

Dies entspricht auch dem Vorsorgeprinzip: Im Rahmen des **Vorsorgeprinzips** (laut Definition [UBA 2021b](#)) gilt, dass der Staat die Verantwortung darüber hat, für künftige Generationen die natürlichen Lebensgrundlagen zu schützen, was neben Gefahrenabwehr auch Vorsorge bedeuten kann. Das Vorsorgeprinzip ist in Artikel 34 Absatz 1 des Einigungsvertrags als Selbstverpflichtung des Gesetzgebers ausdrücklich geregelt und damit geltendes Bundesrecht. Das Vorsorgeprinzip ist darüber hinaus in Artikel 20a des Grundgesetzes verankert.

Mangels Daten für das RCP6.0-Szenario wird, aus den oben genannten Gründen, empfohlen das RCP8.5-Szenario für die Planung und Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen in Nordrhein-Westfalen zu verwenden. Dies entspricht auch den Empfehlungen auf Bundesebene sowie von anderen Bundesländern: Beispielsweise arbeitet die Klimawirkungs- und Risikoanalyse (KWRA) des Bundes (UBA 2021a), die sich auf die Klimawirkungen für den Zeitraum 2031–2060 konzentriert, mit dem RCP8.5-Szenario, wobei der untere Rand der Bandbreite der Ergebnisse (15. Perzentil) und der obere Rand (85. Perzentil) in der Regel als optimistischer Fall und pessimistischer Fall bezeichnet werden. Beim ausgewählten Zukunftszeitraum 2031–2060 liegen die für alle RCP-Szenarien angenommenen Treibhausgaskonzentrationen und somit verstärkten Strahlungsantriebe noch relativ nah beieinander. Somit wären auch die übrigen Klimaszenarien ebenfalls mit abgedeckt und dem Vorsorgeprinzip Rechnung getragen.

Der Blick auf die Publikationen anderer Bundesländer, wie beispielsweise Brandenburg (MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, UMWELT UND KLIMASCHUTZ DES LANDES BRANDENBURG 2023), Bremen (DER SENATOR FÜR UMWELT, BAU UND VERKEHR BREMEN; UMWELTSCHUTZAMT – KLIMASTADTBÜRO BREMEN 2018) oder Thüringen (THÜRINGER MINISTERIUM FÜR UMWELT;

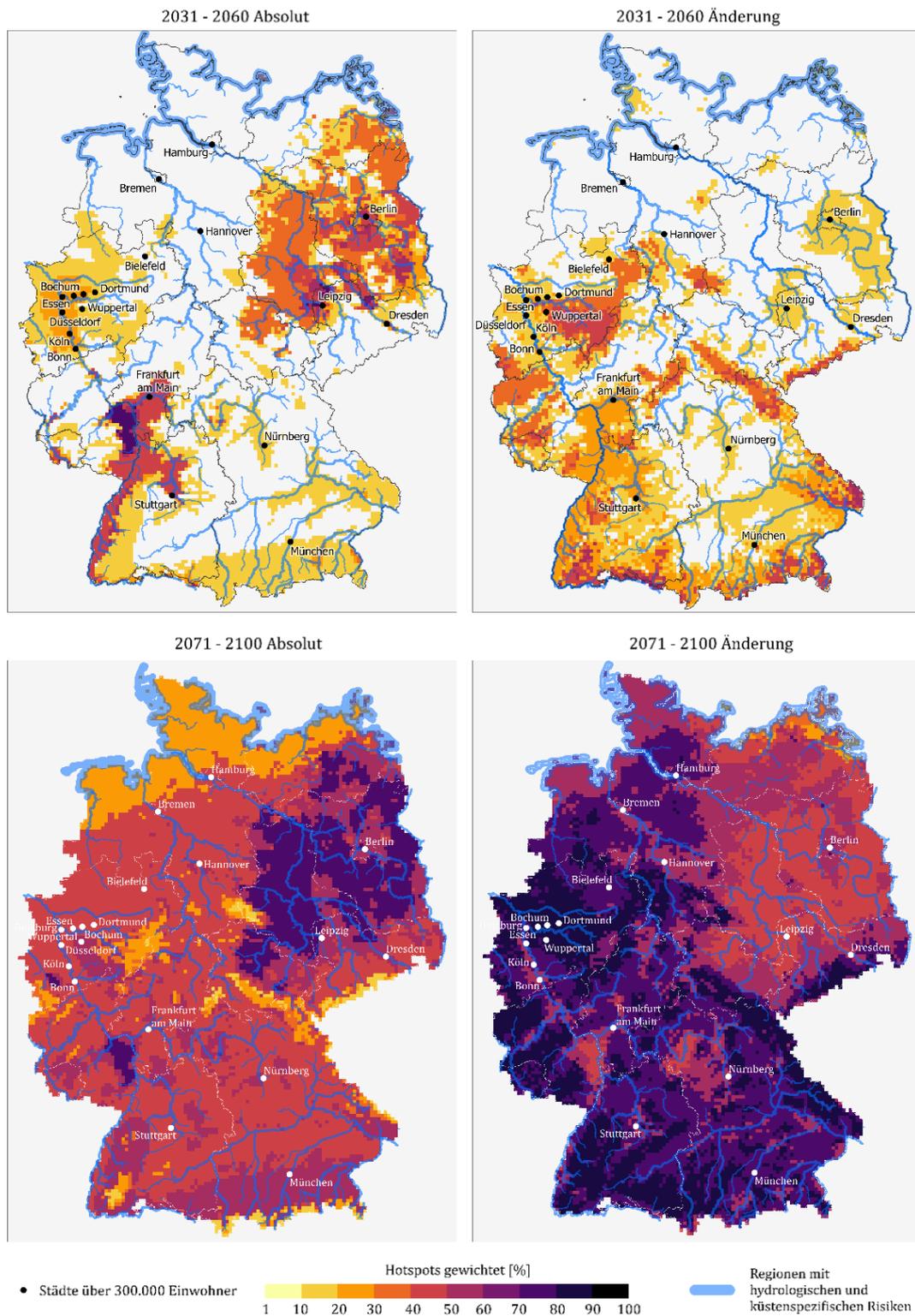
ENERGIE UND NATURSCHUTZ 2019) zeigt ebenfalls, dass dort mit dem RCP8.5-Szenario gerechnet wird, wenn es um Strategien zur Klimaanpassung sowie Veröffentlichungen zur Klimaentwicklung geht. In diesen Studien wird auch der Zeitraum 2071–2100 betrachtet, in dem sich das RCP8.5-Szenario deutlich stärker von den anderen RCP-Szenarien unterscheidet. Zum Vergleich wird zum Teil auch die mögliche Klimaentwicklung nach dem RCP2.6-Szenario berücksichtigt, um auch ein Szenario mit entsprechenden Klimaschutz-Bemühungen zu beleuchten. Eine Konzentration auf das RCP8.5-Szenario bedeutet letztendlich, sich nach Möglichkeit auf den schlimmsten berechneten Fall vorzubereiten und ist gleichzeitig Ansporn dafür, alles daran zu setzen, diese Klimazukunft durch systematischen und konsequenten Klimaschutz zu verhindern.

## 5 Fazit

Auch in Nordrhein-Westfalen zeigt die bereits erfolgte Klimaveränderung seit dem vorindustriellen Zeitalter deutliche Auswirkungen auf eine Vielzahl von Umwelt- und Lebensbereichen. Dies wird in NRW im [Klimafolgen- und Anpassungsmonitoring](#) (KFAM) ausführlich dokumentiert. Neben den seit Aufzeichnungsbeginn gestiegenen Lufttemperaturen und den Änderungen der Niederschlagsmuster (siehe Kapitel 3.1 und 3.2) haben die heißen und trockenen Sommer 2018, 2019, 2020 und 2022 samt der 2019 in NRW gemessenen Hitzerekorde von über 40 °C sowie die Starkregenereignisse in den Jahren 2014, 2016, 2021 und 2023 den Klimawandel stärker ins öffentliche Bewusstsein gerückt. Folgen des Klimawandels für die menschliche Gesundheit, die Land- und Forstwirtschaft sowie für private und öffentliche Gebäude und Infrastruktur werden immer offensichtlicher. Es ist zu erwarten, dass die Durchschnittstemperaturen weiter ansteigen werden, was zu häufigeren Hitzewellen, Dürren und Trockenperioden führen kann. Zugleich werden Extremwetterereignisse wie Starkregen und Gewitterstürme in Häufigkeit und Intensität zunehmen, wodurch Überflutungen und Sturmschäden immer öfter auftreten können.

Das Umweltbundesamt (UBA) hat in der 2021 veröffentlichten Klimawirkungs- und Risikoanalyse (KWRA) für ganz Deutschland die Auswirkungen des Klimawandels untersucht und die Anpassungsmöglichkeiten und -kapazitäten bewertet. Die KWRA bildet somit die wesentliche Grundlage für die Weiterentwicklung der Anpassung an die Folgen des Klimawandels in Deutschland. Die KWRA des Bundes geht davon aus, dass die meisten Klimarisiken durch zusätzliche Anpassungsmaßnahmen zumindest bis zur Mitte des Jahrhunderts überwiegend „noch handhabbar“ sind. Dennoch darf nicht unterschätzt werden, dass in der Mitte des Jahrhunderts die RCP-Szenarien bei ihrer Wirkung noch halbwegs eng beieinanderliegen. Erst gegen Ende des Jahrhunderts entfaltet sich der gegebenenfalls stark veränderte Strahlungsantrieb ganz. Somit könnte das Klimarisiko nochmals deutlich verschärft und Grenzen der Anpassbarkeit erreicht werden.

Die KWRA zeigt auf, dass Nordrhein-Westfalen, auch im deutschlandweiten Vergleich, eine Region ist, die besonders durch Klimaveränderungen und den damit verbundenen Risiken betroffen sein kann (Abbildung 12). Für die am dichtesten besiedelten Bereiche NRWs entlang von Rhein und Ruhr, die bereits heute zu den wärmsten Regionen Deutschlands zählen, wird sowohl der Anstieg der Mitteltemperaturen als auch der Heißen Tage und Tropennächte als klimatischer Einfluss mit besonderer Bedeutung identifiziert (vgl. Abbildung 4; Tabelle 2, Tabelle 7 und Tabelle 8). Für die Mittelgebirgsregionen – insbesondere des Sauer- und Siegerlandes – spielt die Anzahl bzw. der Anstieg von Starkregentagen eine wesentliche klimatische Rolle (vgl. Tabelle 16 bis Tabelle 18).



**Abbildung 12:** Gewichtet-aggregierte Hotspot-Karten der Klimaindikatoren für Deutschland für Mitte und Ende des Jahrhunderts (Quelle: UBA 2021a; Datengrundlage nach BRIENEN et al. 2020). Berücksichtigte Klimaparameter: Jahresmitteltemperatur, Anzahl Heißer Tage, Anzahl Tropennächte, Jahresniederschlagssumme, Anzahl Trockentage, Anzahl Tage mit Starkregen sowie die Bedeutung dieser Parameter für alle untersuchten Klimawirkungen. Links (Absolutwerte): Regionen, die von besonders vielen klimatischen Extremen betroffen sein könnten. Rechts (Änderungswerte): Regionen, die von besonders starken Veränderungen der Klimaparameter betroffen sein könnten. 100 Prozent = maximale Betroffenheit (d. h. Schwellenwerte aller betrachteten Klimaparameter überschritten).

Daher müssen die Klimaschutzbestrebungen drastisch verstärkt werden, um die Folgen des Klimawandels möglichst gering zu halten und klimatische Verhältnisse, wie sie die Ergebnisse des RCP8.5-Szenarios beschreiben, zu vermeiden. Um den dennoch unvermeidbaren Auswirkungen und Herausforderungen des Klimawandels zu begegnen, sind Anpassungsmaßnahmen in verschiedenen Handlungsfeldern, wie z. B. im Bereich der Stadtentwicklung, in der Landwirtschaft und im Waldbau, unerlässlich. Dazu gehören die Verbesserung der Infrastruktur für den Hochwasserschutz sowie die Anpassung von Gebäuden und Grünflächen an die veränderten klimatischen Bedingungen – auch im Sinne des gesundheitlichen Hitzeschutzes. Anpassungsmaßnahmen in Land- und Forstwirtschaft beinhalten die Förderung des Anbaus klimaresilienter Pflanzenarten, die Förderung von Maßnahmen zur Bodenverbesserung und -erhaltung sowie den standortangepassten Waldumbau mit robusteren Baumarten oder Waldbrandprävention, um die Auswirkungen des Klimawandels abzumildern.

Die dringend notwendigen Klimaanpassungsmaßnahmen (sowie noch dringendere Klimaschutzmaßnahmen) werden viel Geld kosten und einen gesamtgesellschaftlichen Kraftakt benötigen. Die Alternative dazu wären, alleine in Deutschland, Klimafolgeschäden in einem Bereich von 280 bis 900 Mrd. € im Vergleich zu den kumulierten Änderungen des realen Bruttoinlandsproduktes im Zeitraum 2022 bis 2050 (FLAUTE et al. 2022). Bis zum Ende des Jahrhunderts werden entsprechend deutlich höhere Kosten möglich sein. Die meisten Klimaanpassungsmaßnahmen mindern nicht nur die Folgen der globalen Erderwärmung, sondern führen auch zu einem allgemein lebenswerteren Umfeld für Alle. Beispiele hierfür sind höhere Anteile von unversiegelten, grünen und blauen Flächen in den Siedlungsbereichen oder natürlicher Hochwasserschutz. Mehr Grün und mehr Platz bedeutet unabhängig von der Erderwärmung einfach mehr Lebensqualität. Solche, so oder so sinnvollen Maßnahmen – sogenannte „no-regret“ Maßnahmen – sollten zum Wohle aller forciert werden.

## 6 Literatur

- BOEHM, SOPHIE; JEFFERY, LOUISE; HECKE, JUDIT; SCHUMER, CLEA; JAEGER, JOEL; FYSON, CLAIRE et al. (2023): State of Climate Action 2023. Berlin and Cologne, Germany, San Francisco, CA, and Washington, DC, USA.
- BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (BGR) (2024): GRUVO – Bundesweite Grundwasserstände und Vorhersagen. <https://gruvo.bgr.de>
- BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (BfG) (2024): DAS Basisdienst Klima und Wasser. <https://ws-klimaportal.bafg.de>
- BURKE, K. D.; WILLIAMS, J. W.; CHANDLER, M. A.; HAYWOOD, A. M.; LUNT, D. J.; OTTO-BLIESNER, B. L. (2018): Pliocene and Eocene provide best analogs for near-future climates. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 115 (52), S. 13288–13293. DOI: 10.1073/pnas.1809600115
- CLIMATE ACTION TRACKER (2024). The CAT Thermometer. <https://climateaction-tracker.org/global/cat-thermometer/> (24.04.2024)
- CLIMATE ANALYTICS (2023): When will global emissions peak? Unter Mitarbeit von Claire Fyson, Neil Grant, Nandini Das, Victor Maxwell, Carley Reynolds, Joeri Rogelj, Carl-Friedrich Schleußner, Olivia Waterton. <https://climateanalytics.org/publications/when-will-global-greenhouse-gas-emissions-peak> (24.04.2024)
- COUMOU, D.; DI CAPUA, G.; VAVRUS, S.; WANG, L.; WANG, S. (2018): The influence of Arctic amplification on mid-latitude summer circulation. In: Nature communications 9 (1), S. 2959. DOI: 10.1038/s41467-018-05256-8.
- DER SENATOR FÜR UMWELT, BAU UND VERKEHR BREMEN; UMWELTSCHUTZAMT – KLIMASTADT-BÜRO BREMEN (2018): Klimaanpassungsstrategie Bremen – Bremerhaven. Bremen.
- DESTATIS – STATISTISCHES BUNDESAMT (2024): Güterverkehrsstatistik der Binnenschifffahrt – Februar 2024. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Gueterverkehr/Publikationen/Downloads-Schifffahrt/statistischer-be-richt-binnenschifffahrt-2080400241025.xlsx? blob=publicationFile> (10.06.2024).
- DWD – DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.) (2024): Climate Data Center, Jahresraster der Anzahl der Tage mit Niederschlag  $\geq 10$  mm/20 mm für Deutschland, Version v1.0.  
[https://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/grids\\_germany/annual/](https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/annual/)
- DWD – DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.) (2023): Pressemitteilung: Deutschlandwetter im Jahr 2023.  
[https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2023/20231229\\_deutschlandwetter\\_jahr2023\\_news.html](https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2023/20231229_deutschlandwetter_jahr2023_news.html) (24.04.2024)
- FLEISCHER, C. NILSON, E. (2023): Projizierte Änderungen des Wasserdargebotes am Pegel Düsseldorf – Kurzbericht Restseeplutung, basierend auf dem bis 2022 gültigen GIW, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.

- FLAUTE, MARKUS; REUSCHEL, SASKIA; STÖVER, BRITTA (2022): Volkswirtschaftliche Folgekosten durch Klimawandel: Szenarioanalyse bis 2050 - Studie im Rahmen des Projektes Kosten durch Klimawandelfolgen in Deutschland. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz. Hg. v. Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung (GWS) mbH. Osnabrück (GWS Research Report)
- FUSS, SABINE; CANADELL, JOSEP G.; PETERS, GLEN P.; TAVONI, MASSIMO; ANDREW, ROBBIE M.; CIAIS, PHILIPPE et al. (2014): Betting on negative emissions. In: *Nature Geosci* 7 (4), S. 850–852. DOI: 10.1038/ngeo2248.
- HERRMANN, FRANK; KELLER, LUISE; KUNKEL, RALF; VEREECKEN, HARRY; WENDLAND, FRANK (2015): Determination of spatially differentiated water balance components including groundwater recharge on the Federal State level – A case study using the mGROWA model in North Rhine-Westphalia (Germany). In: *Journal of Hydrology: Regional Studies* 4, S. 294–312. DOI: 10.1016/j.ejrh.2015.06.018.
- HERRMANN, FRANK; CHEN, SHAONING; KUNKEL, RALF; WENDLAND, FRANK (2014): Auswirkungen von Klimaänderungen auf das nachhaltig bewirtschaftbare Grundwasserdargebot und den Bodenwasserhaushalt in Nordrhein-Westfalen. Hg. v. Forschungszentrum Jülich. Forschungszentrum Jülich. Jülich.
- HÜBENER, H.; SPEKAT, A.; BÜLOW, K.; FRÜH, B.; KEULER, K.; MENZ, C.; RADTKE, K.; RAMTHUN, H.; RATHMANN, T.; STEGER, C.; TOUSSAINT, F. & WARRACH-SAGI, K. (2017): ReKliEs-De Nutzerhandbuch. doi: 10.2312/WDCC/ReKliEsDe\_Nutzerhandbuch
- IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2023): Sections. In: *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/AR6-978929169164.
- IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2022): *Climate Change 2022b: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.
- IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2022): *Climate Change 2022a: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.
- IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2021): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I.

- Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.
- IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (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.
- JUNGHÄNEL, T.; BISSOLLI, P.; DAßLER, J.; FLECKENSTEIN, R.; IMBERY, F.; JANSSEN, W., KASPAR, F et al. (2021): Hydro-klimatologische Einordnung der Stark- und Dauerniederschläge in Teilen Deutschlands im Zusammenhang mit dem Tiefdruckgebiet „Bernd“ vom 12. bis 19. Juli 2021. Hg. v. DWD, Abteilung Klima- und Umweltberatung. Deutscher Wetterdienst DWD. Offenbach a. Main.
- LANUV – LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (Hrsg.) (2024, in Vorbereitung): Wald und Klima in NRW – Ein Beitrag zur Klimaanpassungsstrategie für den Wald und die Waldbewirtschaftung.
- LANUV – LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (Hrsg.) (2023): ExUS 2020-Studie: Extremwertstatistische Untersuchung von Starkniederschlägen in NRW. Abschlussbericht zum Kooperationsprojekt zwischen aqua\_plan GmbH, dr. papadakis GmbH, hydro & meteo GmbH, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Prof. Dr. Markus Quirnbach. Unter Mitarbeit von Prof. Dr. Markus Quirnbach, aquaplan Ingenieurgesellschaft für Problemlösungen in Hydrologie und Umweltschutz mbH, hydro & meteo GmbH, LANUV NRW – FB37 & FB51, dr. papadakis GmbH. Recklinghausen.
- LANUV – LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (Hrsg.) (2021a): Klimabericht NRW 2021. Klimawandel und seine Folgen – Ergebnisse aus dem Klimafolgen- und Anpassungsmonitoring. LANUV-Fachbericht 120.
- LANUV – LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (Hrsg.) (2021b): Modellierung des Wasserhaushalts in Nordrhein-Westfalen mit mGROWA. LANUV-Fachbericht 110, Teil IIa.
- LANUV – LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (Hrsg.) (2021c): Projektionen der Grundwasserneubildung unter dem Einfluss des Klimawandels in Nordrhein-Westfalen mit dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA und dem Regionalen Klimaprojektionen Ensemble (ReKliEs) für Deutschland. LANUV-Fachbericht 110, Teil IX.
- LANUV – LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (Hrsg.) (2018): Klimanalyse Nordrhein-Westfalen. LANUV-Fachbericht 86.
- LENTON, T. M.; MCKAY, D. I. ARMSTRONG; LORIANI, S.; ABRAMS, J. F.; LADE, S. J.; DONGES, J. F. et al. (2023): Global Tipping Points Report 2023. Global Systems Institute (GSI), University of Exeter.
- LUDWIG, PATRICK; EHMELE, FLORIAN; FRANCA, MÁRIO J.; MOHR, SUSANNA; CALDAS-ALVAREZ, ALBERTO; DANIELL, JAMES E. et al. (2022): A multi-disciplinary analysis of the exceptional flood event of July 2021 in central Europe. Part 2: Historical context and relation

- to climate change. In: Nat. Hazards Earth Syst. Sci., S. 1–42. DOI: 10.5194/nhess-2022-225.
- LÜTHI, DIETER; LE FLOCH, MARTINE; BEREITER, BERNHARD; BLUNIER, THOMAS; BARNOLA, JEAN-MARC; SIEGENTHALER, URS et al. (2008): High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. In: Nature 453, 379 EP –. DOI: 10.1038/nature06949.
- MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, UMWELT UND KLIMASCHUTZ DES LANDES BRANDENBURG (2023): Strategie des Landes Brandenburg zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels. Potsdam.
- RIAHI, KEYWAN; VAN VUUREN, DETLEF P.; KRIEGLER, ELMAR; EDMONDS, JAE; O'NEILL, BRIAN C.; FUJIMORI, SHINICHIRO et al. (2017): The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. In: Global Environmental Change 42, S. 153–168. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009.
- SPINONI, J.; VOGT, J.; BARBOSA, P. (2015): European degree-day climatologies and trends for the period 1951–2011. In: Int. J. Climatol. 35 (1), S. 25–36. DOI: 10.1002/joc.3959.
- STEFFEN, WILL; ROCKSTRÖM, JOHAN; RICHARDSON, KATHERINE; LENTON, TIMOTHY M.; FOLKE, CARL; LIVERMAN, DIANA et al. (2018): Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. In: Proceedings of the National Academy of Sciences. DOI: 10.1073/pnas.1810141115.
- THÜRINGER MINISTERIUM FÜR UMWELT; ENERGIE UND NATURSCHUTZ (2019): Integriertes Maßnahmenprogramm zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels im Freistaat Thüringen – IMPAKT II. Hg. v. Thüringer Ministerium für Umwelt und Energie und Naturschutz. Erfurt.
- UBA – UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.) (2021a): Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland. Teilbericht 6: Integrierte Auswertung – Klimarisiken, Handlungserfordernisse und Forschungsbedarfe.
- UBA – UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.) (2021b): Vorsorgeprinzip. <https://www.umweltbundesamt.de/vorsorgeprinzip> (24.04.2024)
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (2023): Emissions Gap Report 2023: Broken Record – Temperatures hit new highs, yet world fails to cut emissions (again). Hg. v. United Nations Environment Programme. Nairobi, Kenya.
- VAN VUUREN, DETLEF P.; EDMONDS, JAE; KAINUMA, MIKIKO; RIAHI, KEYWAN; THOMSON, ALLISON; HIBBARD, KATHY et al. (2011): The representative concentration pathways. An overview. In: Climatic Change 109 (1–2), S. 5–31. DOI: 10.1007/s10584-011-0148-z.
- VAN WAGNER, C. E. (1987): Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Canadian Forestry Service, Headquarters, Ottawa. Forestry Technical Report 35. 35 Seiten.
- VDI – VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (2013): VDI-Richtlinie 3807, Blatt 1: Verbrauchskennwerte für Gebäude. Berlin, Beuth Verlag.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO) (2024): State of the Global Climate 2023. Geneva, Switzerland (1347).

WORLD WEATHER ATTRIBUTION (2021): Rapid attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021. Unter Mitarbeit von Frank Kreienkamp, Sjoukje Y. Philip, Jordis S. Tradosky, Sarah F. Kew, Philip Lorenz, Julie Arrighi et al. Hg. v. world weather attribution. London, UK.

WUNSCH, ANDREAS; LIESCH, TANJA; BRODA, STEFAN (2022): Deep learning shows declining groundwater levels in Germany until 2100 due to climate change. In: Nature communications 13 (1), S. 1221. DOI: 10.1038/s41467-022-28770-2.

ZEEBE, RICHARD E.; RIDGWELL, ANDY; ZACHOS, JAMES C. (2016): Anthropogenic carbon release rate unprecedented during the past 66 million years. In: Nature Geosci 9 (4), S. 325–329. DOI: 10.1038/ngeo2681.

## 7 Verzeichnis Karten und Daten aus dem Klimaatlas:

### 7.1 Klimaatlas NRW Karten

BD_VZ:	Vegetationszeit: [Tage/Jahr] <a href="https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-pluskarte?&amp;itnrw_layer=BD_VZ">https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-pluskarte?&amp;itnrw_layer=BD_VZ</a>
BD_SF:	Spätfröste [Anzahl/Jahr]: Veröffentlichung im Klimaatlas in Vorbereitung
KT_ET:	Eistage [Tage/Jahr]: <a href="https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-pluskarte?&amp;itnrw_layer=KT_ET">https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-pluskarte?&amp;itnrw_layer=KT_ET</a>
KT_FT:	Frosttage [Tage/Jahr]: <a href="https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-pluskarte?&amp;itnrw_layer=KT_FT">https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-pluskarte?&amp;itnrw_layer=KT_FT</a>
KT_HT:	Heiße Tage [Tage/Jahr]: <a href="https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-pluskarte?&amp;itnrw_layer=KT_HT">https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-pluskarte?&amp;itnrw_layer=KT_HT</a>
KT_ST:	Sommertage [Tage/Jahr]: <a href="https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-pluskarte?&amp;itnrw_layer=KT_ST">https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-pluskarte?&amp;itnrw_layer=KT_ST</a>
KT_TN:	Tropennächte [Tage/Jahr]: <a href="https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-pluskarte?&amp;itnrw_layer=KT_TN">https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-pluskarte?&amp;itnrw_layer=KT_TN</a>
KY:	Klimaanalyse: <a href="http://www.wms.nrw.de/umwelt/klimaanpassung_klimaanalyse?">http://www.wms.nrw.de/umwelt/klimaanpassung_klimaanalyse?</a>
LTM:	Lufttemperatur [°C]: <a href="https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-pluskarte?&amp;itnrw_layer=LT_LTM">https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-pluskarte?&amp;itnrw_layer=LT_LTM</a>
LT_HW:	Hitzewellen [Anzahl/Jahr]: Veröffentlichung im Klimaatlas in Vorbereitung
NS:	Handlungsfeld Niederschlag: <a href="https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-pluskarte?&amp;itnrw_layer=NS">https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-pluskarte?&amp;itnrw_layer=NS</a>
NS_NSM:	Niederschlagssumme [mm]: <a href="https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-pluskarte?&amp;itnrw_layer=NS_NSM">https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-pluskarte?&amp;itnrw_layer=NS_NSM</a>
NS_SNS10:	Starkniederschlagstag 10 mm [Tage/Jahr]: <a href="https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-pluskarte?&amp;itnrw_layer=NS_SNS10">https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-pluskarte?&amp;itnrw_layer=NS_SNS10</a>
NS_SNS20:	Starkniederschlagstag 20 mm [Tage/Jahr]: <a href="https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-pluskarte?&amp;itnrw_layer=NS_SNS20">https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-pluskarte?&amp;itnrw_layer=NS_SNS20</a>
NS_SNS50:	Starkniederschlagstag 50 mm [Tage/Jahr]: Veröffentlichung im Klimaatlas in Vorbereitung
NS_TT:	Trockentage [Tage/Jahr]: Veröffentlichung im Klimaatlas in Vorbereitung
PL_HGT:	Heizgradtage [Kelvin*Tag]: Veröffentlichung im Klimaatlas in Vorbereitung
PL_KGT:	Kühlgradtage [Kelvin*Tag]: Veröffentlichung im Klimaatlas in Vorbereitung

- WS\_AF: Netto-Gesamtabfluss [mm]:  
[https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-pluskarte?&itnrw\\_layer=WS\\_AF](https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-pluskarte?&itnrw_layer=WS_AF)
- WS\_EVA: Tatsächliche Evapotranspiration [mm]:  
[https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-pluskarte?&itnrw\\_layer=WS\\_EVA](https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-pluskarte?&itnrw_layer=WS_EVA)
- WS\_GWN: Grundwasserneubildung [mm]:  
[https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-pluskarte?&itnrw\\_layer=WS\\_GWN](https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-pluskarte?&itnrw_layer=WS_GWN)
- WS\_KWB: Klimatische Wasserbilanz [mm]:  
[https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-pluskarte?&itnrw\\_layer=WS\\_KWB](https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-pluskarte?&itnrw_layer=WS_KWB)

## 7.2 Klimafolgen- und Anpassungsmonitoring (KFAM) im Klimaatlas NRW

- KFAM 1.1: Indikator 1.1: Durchschnittliche Jahreslufttemperatur:  
<https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-monitoring/klimaentwicklung/lufttemperatur/durchschnittliche-jahreslufttemperatur>
- KFAM 1.2: Indikator 1.2 Durchschnittliche Jahreszeiten Lufttemperatur:  
<https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-monitoring/klimaentwicklung/lufttemperatur/durchschnittliche-jahreszeitenlufttemperatur>
- KFAM 1.3: Indikator 1.3. Temperatur Kenntage kalt:  
<https://www.klimaatlas.nrw.de/index.php/klima-nrw-monitoring/klimaentwicklung/lufttemperatur/temperaturkenntage-kalt-frosttage-eistage>
- KFAM 1.4: Indikator 1.4. Temperatur Kenntage warm:  
<https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-monitoring/klimaentwicklung/lufttemperatur/temperaturkenntage-warm-sommertage-heisse-tage>
- KFAM 2.1: Indikator 2.1: Durchschnittliche Jahresniederschlagssumme:  
<https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-monitoring/klimaentwicklung/niederschlag/durchschnittliche-jahresniederschlagssumme>
- KFAM 2.2: Indikator 2.2: Durchschnittliche Jahreszeitenniederschlagssumme:  
<https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-monitoring/klimaentwicklung/niederschlag/durchschnittliche-jahreszeitenniederschlagssumme>
- KFAM 4.7: Gewässertemperatur fließender Gewässer:  
<https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-monitoring/umwelt/wasserwirtschaft-und-hochwasserschutz/gewaessertemperatur-fluessender>
- KFAM 6.3: Indikator 6.3: Länge der Vegetationsperiode:  
<https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-monitoring/umwelt/biodiversitaet-und-naturschutz/laenge-der-vegetationsperiode>
- KFAM 6.5: Indikator 6.5: Klimasensitive Pflanzenarten:  
<https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-monitoring/umwelt/biodiversitaet-und-naturschutz/klimasensitive-pflanzenarten>

- KFAM 6.6: Indikator 6.6: Klimawandelbegünstigte invasive Pflanzenarten:  
<https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-monitoring/umwelt/biodiversitaet-und-naturschutz/klimawandelbeguenstigte-invasive>
- KFAM 6.7: Indikator 6.7: Temperaturindex der Vogelartengemeinschaften:  
<https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-monitoring/umwelt/biodiversitaet-und-naturschutz/temperaturindex-der>
- KFAM 7.4: Indikator 7.4: Waldbrandgefahr und Waldbrände:  
<https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-monitoring/umwelt/wald-und-forstwirtschaft/waldbrandgefahr-und-waldbraende>
- KFAM 14.2: Indikator 14.2: Jahreskühlgradtage:  
<https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-monitoring/planung-und-bau/bauen-und-wohnen/jahreskuehlgradtage>

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b>	Auswahl der repräsentativen Konzentrationspfade (RCP) aus einer Vielzahl an Szenarien, die je nach Treibhausgaskonzentration klassifiziert sind (Quelle: FUSS et al. 2014).....	6
<b>Abbildung 2:</b>	Globale Temperaturrekonstruktionen der letzten 66 Millionen Jahre (Quelle: BURKE et al. 2018). Zur Beachtung: die X-Achse enthält Skalensprünge, um der zeitlichen Auflösung der unterschiedlichen Datenarchive gerecht zu werden.....	8
<b>Abbildung 3:</b>	Die möglichen Erwärmungspfade nach den aktuellen SSP-RCP Szenarien-Kombinationen (Quelle: IPCC 2021). ....	10
<b>Abbildung 4:</b>	Mittlere jährliche Lufttemperatur in °C in NRW: Beobachtung 1881–2023 und Projektionen 1971–2100 für die Szenarien RCP2.6 und RCP8.5. Dargestellt sind sowohl die Einzeljahre und das 10-jährig gleitende Mittel (Beobachtungen) als auch die Einzelläufe und gleitende Mittel des 15., 50., und 85. Perzentils der beiden Szenarien (Projektionen) (Quelle: LANUV NRW, Datengrundlage: DWD).....	13
<b>Abbildung 5:</b>	Mittlere Anzahl der Hitzewellen in NRW in den Beobachtungszeiträumen von 1951–1980 bis 1991–2020 (Quelle: LANUV NRW, Datengrundlage: DWD).....	21
<b>Abbildung 6:</b>	Mittlere Anzahl der Hitzewellen in NRW in den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: LANUV NRW, Datengrundlage: DWD).....	22
<b>Abbildung 7:</b>	Mittlere jährliche Niederschlagssumme in mm in NRW: Beobachtung 1881–2023 und Projektionen 1971–2100 für die Szenarien RCP2.6 und RCP8.5. Dargestellt sind sowohl die Einzeljahre und das 10-jährig gleitende Mittel (Beobachtungen) als auch die Einzelläufe und gleitende Mittel des 15., 50., und 85. Perzentils der beiden Szenarien (Projektionen) (Datengrundlage: DWD).....	29
<b>Abbildung 8:</b>	30-jährige Mittelwerte (Zeitraum gekennzeichnet durch x-Achse) des MNQ und des Q20 in m <sup>3</sup> /s am Pegel Düsseldorf (Rhein), projiziert mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME auf Basis von 16 Klimaprojektionen unter Annahme der Szenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 Unsicherheitsbereiche (von außen nach innen): 15/85%, 25/75%, 40/60%, 50% (schwarze Linie) (Quelle: FLEISCHER & NILSON 2023).....	49
<b>Abbildung 9:</b>	30-jährige Mittelwerte (Zeitraum gekennzeichnet durch x-Achse) des MQ und des MHQ in m <sup>3</sup> /s am Pegel Düsseldorf (Rhein), projiziert mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME auf Basis von 16 Klimaprojektionen unter Annahme der Szenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5. Unsicherheitsbereiche (von außen nach innen): 15/85%, 25/75%, 40/60%, 50% (schwarze Linie) (Quelle: FLEISCHER	

	& NILSON 2023 für MQ, DAS Basisdienst Klima und Wasser, BFG 2024 für MHQ). .....	50
<b>Abbildung 10:</b>	30-jährige Mittelwerte (Zeitraum gekennzeichnet durch x-Achse) des Q(GIW) in Tagen am Pegel Düsseldorf (Rhein), projiziert mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME auf Basis von 16 Klimaprojektionen unter Annahme der Szenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 Unsicherheitsbereiche (von außen nach innen): 15/85%, 25/75%, 40/60%, 50% (schwarze Linie) (Quelle: FLEISCHER & NILSON 2023 ).....	51
<b>Abbildung 11:</b>	Der globale Temperaturanstieg bis 2100 projiziert nach aktuellen Klimaschutzbemühungen (Quelle: CLIMATE ACTION TRACKER 2024, übersetzt ins Deutsche) .....	54
<b>Abbildung 12:</b>	Gewichtet-aggregierte Hotspot-Karten der Klimaindikatoren für Deutschland für Mitte und Ende des Jahrhunderts (Quelle: UBA 2021a; Datengrundlage nach BRIENEN et al. 2020). Berücksichtigte Klimaparameter: Jahresmitteltemperatur, Anzahl Heißer Tage, Anzahl Tropennächte, Jahresniederschlagssumme, Anzahl Trockentage, Anzahl Tage mit Starkregen sowie die Bedeutung dieser Parameter für alle untersuchten Klimawirkungen. Links (Absolutwerte): Regionen, die von besonders vielen klimatischen Extremen betroffen sein könnten. Rechts (Änderungswerte): Regionen, die von besonders starken Veränderungen der Klimaparameter betroffen sein könnten. 100 Prozent = maximale Betroffenheit (d. h. Schwellenwerte aller betrachteten Klimaparameter überschritten).....	59

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b>	Überblick über die RCP-Szenarien globale Perspektive (Quelle: IPCC 2014, VAN VUUREN et al. 2011).....	7
<b>Tabelle 2:</b>	Mittlere Jahreslufttemperatur in °C in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1881–1910, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: Klimaatlas NRW – LTM, KFAM 1.1; Datengrundlage: DWD).....	14
<b>Tabelle 3:</b>	Mittlere Jahreszeitenlufttemperatur in °C in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1881–1910, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: Klimaatlas NRW – LTM, KFAM 1.2; Datengrundlage: DWD).....	15
<b>Tabelle 4:</b>	Mittlere Anzahl der Eistage (Tagesmaximumtemperatur < 0 °C) in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1891–1920, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: Klimaatlas NRW – KT_ET, KFAM 1.3; Datengrundlage: DWD).....	16
<b>Tabelle 5:</b>	Mittlere Anzahl der Frosttage (Tagesminimumtemperatur < 0 °C) in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1891–1920, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: Klimaatlas NRW – KT_FT, KFAM 1.3; Datengrundlage: DWD).....	16
<b>Tabelle 6:</b>	Mittlere Anzahl der Sommertage (Tagesmaximumtemperatur ≥ 25 °C) in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1891–1920, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: Klimaatlas NRW – KT_ST, KFAM 1.4; Datengrundlage: DWD).....	18
<b>Tabelle 7:</b>	Mittlere Anzahl der Heißen Tage (Tagesmaximumtemperatur ≥ 30 °C) in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1891–1920, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: Klimaatlas NRW – KT_HT, KFAM 1.4; Datengrundlage: DWD).....	18
<b>Tabelle 8:</b>	Mittlere Anzahl der Tropennächte in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1951–1980, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 (Quelle: KFAM 1.4; Datengrundlage: DWD) sowie Änderung der Anzahl der Tropennächte in den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 bezogen auf den Referenzzeitraum 1971–2000 in Tagen (Quelle: Klimaatlas NRW – KT_TN; Datengrundlage: DWD).....	19

<b>Tabelle 9:</b>	Mittlere Anzahl der Hitzewellen (Definition Hitzewelle: mindestens drei aufeinander folgende Heiße Tage) in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1951–1980, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: Klimaatlas NRW – LT_HW, Veröffentlichung in Vorbereitung; Datengrundlage: DWD).....	20
<b>Tabelle 10:</b>	Mittlere Dauer der Vegetationszeit in Anzahl der Tage >5 °C (berechnet nach dem Ansatz von Hübener et al. 2017) in den Beobachtungszeiträumen 1951–1980, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 in NRW (Quelle: Klimaatlas NRW – BD_VZ; Datengrundlage: DWD).....	23
<b>Tabelle 11:</b>	Durchschnittliches Auftreten von Spätfrost (Anzahl von Frosttagen zwischen Beginn der Vegetationszeit und 01.06.) in den Beobachtungszeiträumen 1951–1980, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 in NRW (Quelle: Klimaatlas NRW – BD_SF, Veröffentlichung in Vorbereitung; Datengrundlage: DWD).....	24
<b>Tabelle 12:</b>	Mittlere Heizgradtage in K•d (nach VDI 2013) in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1951–1980, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie Änderung der Heizgradtage in Prozent relativ zur Bezugsperiode 1971–2000 in den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: Klimaatlas NRW – PL_HGT, Veröffentlichung in Vorbereitung; Datengrundlage: DWD).....	26
<b>Tabelle 13:</b>	Mittlere Kühlgradtage in Kelvin •Tag nach Spinoni (vgl. KFAM 14.2) in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1951–1980, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie <b>Änderung der Kühlgradtage in Prozent</b> relativ zur Bezugsperiode 1971–2000 in den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: Klimaatlas NRW – PL_KGT, Veröffentlichung in Vorbereitung; Datengrundlage: DWD).....	27
<b>Tabelle 14:</b>	Mittlere jährliche Niederschlagssumme in mm in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1881–1910, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: Klimaatlas NRW – NS_NSM; Datengrundlage: DWD). .....	28
<b>Tabelle 15:</b>	Mittlere saisonale Niederschlagssummen in mm in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1881–1910, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: Klimaatlas NRW – NS_NSM; Datengrundlage: DWD). .....	31

<b>Tabelle 16:</b>	Mittlere Anzahl der Starkniederschlagstage mit einer Tagesniederschlagssumme (TNS) >10 mm in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1951–1980, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: Klimaatlas NRW – NS_SNS10; Datengrundlage: DWD).....	32
<b>Tabelle 17:</b>	Mittlere Anzahl der Starkniederschlagstage mit einer Tagesniederschlagssumme (TNS) >20 mm in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1951–1980, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: Klimaatlas NRW – NS_SNS20; Datengrundlage: DWD).....	33
<b>Tabelle 18:</b>	Mittlere Anzahl der Starkniederschlagstage mit einer Tagesniederschlagssumme (TNS) >50 mm in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1951–1980, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: Klimaatlas NRW – NS_SNS50, Veröffentlichung in Vorbereitung; Datengrundlage: DWD).....	33
<b>Tabelle 19:</b>	Mittlere Anzahl der Trockentage mit einer Tagesniederschlagssumme (TNS) <1 mm in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1951–1980, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: Klimaatlas NRW – NS_TT, Veröffentlichung in Vorbereitung; Datengrundlage: DWD).....	35
<b>Tabelle 20:</b>	Mittlere Anzahl der Trockenperioden in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1951–1980, 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020, angegeben in den Andauerklassen 1 (4–5 Tage), 2 (6–7 Tage), 3 (8–9 Tage), 4 (10–11 Tage), 5 (12–13 Tage) und 6 (≥14 Tage). Quelle: LANUV NRW; Datengrundlage: DWD.....	37
<b>Tabelle 21:</b>	Mittlere Anzahl der Trockenperioden in NRW im Projektionszeiträumen 2031–2060, angegeben in den Andauerklassen 1 (4–5 Tage), 2 (6–7 Tage), 3 (8–9 Tage), 4 (10–11 Tage), 5 (12–13 Tage) und 6 (≥14 Tage). Quelle: LANUV NRW; Datengrundlage: DWD.....	37
<b>Tabelle 22:</b>	Mittlere Anzahl der Trockenperioden in NRW im Projektionszeiträumen 2071–2100, angegeben in den Andauerklassen 1 (4–5 Tage), 2 (6–7 Tage), 3 (8–9 Tage), 4 (10–11 Tage), 5 (12–13 Tage) und 6 (≥14 Tage). Quelle: LANUV NRW; Datengrundlage: DWD.....	37
<b>Tabelle 23:</b>	Mittlere Anzahl der Tage mit Waldbrandgefahrenstufe 4 + 5 in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1961–1990, 1971–2000, 1981–2010 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: LANUV NRW; Datengrundlage: DWD).....	38

<b>Tabelle 24:</b>	Mittlere jährliche Grundwasserneubildung in mm in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: Klimaatlas NRW – WS_GWN; Datengrundlage: Forschungszentrum Jülich, DWD).....	41
<b>Tabelle 25:</b>	Mittewerte des jährlichen Gesamtabfluss in mm in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: Klimaatlas NRW – WS_AF; Datengrundlage: Forschungszentrum Jülich, DWD).....	42
<b>Tabelle 26:</b>	Mittlere jährliche Evapotranspiration in mm in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: Klimaatlas NRW – WS_EVA; Datengrundlage: Forschungszentrum Jülich, DWD).....	43
<b>Tabelle 27:</b>	Mittlere jährliche Klimatische Wasserbilanz in mm in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: Klimaatlas NRW – WS_KWB; Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst).....	44
<b>Tabelle 28:</b>	Mittlere saisonale Klimatische Wasserbilanz in mm in NRW in den Beobachtungszeiträumen 1961–1990, 1971–2000 und 1991–2020 sowie den Projektionszeiträumen 2031–2060 und 2071–2100 (Quelle: Klimaatlas NRW – WS_KWB; Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst).....	45
<b>Tabelle 29:</b>	Übersicht über die Kennwerte MNQ, Q20, MQ und MHQ am Rheinpegel-Standort Düsseldorf im Beobachtungszeitraum 1971–2000 in m <sup>3</sup> /s sowie Änderungen für die den Beobachtungszeitraum 1993–2022 und die Projektionszeiträume 2031–2060 und 2071–2100 in % (Datenquelle (außer MHQ): FLEISCHER & NILSON 2023). * Für MHQ liegt der letzte aktuelle Beobachtungszeitraum bei 1989-2018 (Datenquelle: DAS Basisdienst Klima und Wasser, BFG 2024). .....	47
<b>Tabelle 30:</b>	Übersicht über den Kennwert Q(GIW) in Tagen (hier als Summe der Unterschreitungstage des GIW (sumD(Q(GIW))) angegeben) im Beobachtungszeitraum 1971–2000 und Änderungen für die den Beobachtungszeitraum 1993–2022 und die Projektionszeiträume 2031–2060 und 2071–2100 in Tagen (Datenquelle: FLEISCHER & NILSON 2023). .....	48

# IMPRESSUM

Herausgeber	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) Leibnizstraße 10, 45659 Recklinghausen Telefon 02361 305-0 E-Mail: <a href="mailto:poststelle@lanuv.nrw.de">poststelle@lanuv.nrw.de</a>
Bearbeitung	Dr. Nicole Kauke, Dr. Tobias Kemper, Antje Kruse, Dr. Alessandra Kunzmann und Dr. Ingo Wolff (alle LANUV)
Veröffentlichung	August 2024
Titelbild	Adobe Stock / YODCHAI, Grafik: LANUV nach Daten des Deutschen Wetter- dienstes (DWD)
ISSN	1864-3930 (Print), 2197-7690 (Internet), LANUV-Fachberichte
Informationsdienste	Informationen und Daten aus NRW zu Natur, Umwelt und Verbraucherschutz unter • <a href="http://www.lanuv.nrw.de">www.lanuv.nrw.de</a> Aktuelle Luftqualitätswerte zusätzlich im • WDR-Videotext
Bereitschaftsdienst	Nachrichtenbereitschaftszentrale des LANUV (24-Std.-Dienst) Telefon 0201 714488

---

Landesamt für Natur, Umwelt und  
Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Leibnizstraße 10  
45659 Recklinghausen  
Telefon 02361 305-0  
poststelle@lanuv.nrw.de

[www.lanuv.nrw.de](http://www.lanuv.nrw.de)