



Klimawandel und Klimafolgen in Nordrhein-Westfalen

Ergebnisse aus den
Monitoringprogrammen 2016

LANUV-Fachbericht 74



**Klimawandel und Klimafolgen in Nordrhein-Westfalen
Ergebnisse aus den Monitoringprogrammen 2016
LANUV-Fachbericht 74**

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
Recklinghausen 2016

Impressum

Herausgeber

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV)
Leibnizstraße 10, 45659 Recklinghausen
Telefon 02361 305-0, Telefax 02361 305-3215
E-Mail: poststelle@lanuv.nrw.de

Autoren

Philippa Breyer, Dr. Joachim Gehrmann, Ellen Grothues, Dr. Andrea Hädicke, Dr. Silke Höke, Heinrich König, Dr. Walburga Lutz, Carla Michels, Dr. Nicole Müller, Dr. Michael Petrak, Christina Seidenstücker, Jutta Werking-Radtke, Ingrid Stempelmann, Christoph Ziegler (LANUV)

Fachredaktion

Dr. Nicole Müller, Christina Seidenstücker (LANUV)

Lektorat

Susanne Nickel

Gestaltung

dot.blue – communication & design

Bildnachweis

siehe Seite 103

Druck

Woeste Druck + Verlag GmbH & Co KG

Topografische Karten

Geobasisdaten der Kommunen und des Landes NRW © Geobasis NRW 2016

ISSN

ISSN 1864-3930 (Print), 2197-7690 (Internet), LANUV-Fachberichte

Informationsdienste

Informationen und Daten aus NRW zu Natur, Umwelt und Verbraucherschutz unter www.lanuv.nrw.de
Aktuelle Luftqualitätswerte zusätzlich im WDR-Videotext Tafeln 177 bis 179

Bereitschaftsdienst

Nachrichtenbereitschaftszentrale des LANUV
(24-Std.-Dienst): Telefon 0201 7144 88

Nachdruck – auch auszugsweise – ist nur unter Quellenangaben und Überlassung von Belegexemplaren nach vorheriger Zustimmung des Herausgebers gestattet. Die Verwendung für Werbezwecke ist grundsätzlich untersagt.

Sehr geehrte Leserin, sehr geehrter Leser,



wir alle wissen es: Der anthropogene Klimawandel ist Realität und seine Auswirkungen sind auch in Nordrhein-Westfalen deutlich zu spüren. Langjährige Messungen zeigen, dass die Temperaturen ansteigen, bei den Niederschlägen ändern sich die Intensität und die Verteilung. Das hat Folgen: So verschieben sich die Blühphasen heimischer Pflanzen, Gewässer- und Bodentemperaturen steigen und insbesondere in den Städten und Ballungsräumen steigt im Sommer die Hitzebelastung für die Bevölkerung.

Das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW hat im vorliegenden Fachbericht „Klimawandel und Klimafolgen in Nordrhein-Westfalen“ Trends aus dem ersten Klimabericht aktualisiert und fortgeschrieben. Hinzu kommen viele neue Erkenntnisse zum Klimawandel und seinen Folgen. Nordrhein-Westfalen ist das am dichtesten besiedelte Bundesland, viele Menschen leben in großen Metropolen und Ballungsräumen – daher haben wir eine besondere Verantwortung für die städtische Bevölkerung. Vor diesem Hintergrund widmen wir ein ganzes Kapitel den Auswirkungen des Klimawandels in Städten.

In dem Klimabericht wurden wichtige Erkenntnisse aus den Fachinformationssystemen des LANUV, dem Klimaatlas NRW (www.klimaatlas.nrw.de) und dem Klimafolgenmonitoring NRW (www.klimafolgenmonitoring.nrw.de) aufbereitet und ausgewertet. Hier finden Sie viele weitere Informationen. So gibt der Klimaatlas NRW auf mehr als 300 Flächenkarten einen umfassenden Überblick über das aktuelle Klima und seine zukünftige Entwicklung. Das Klimafolgenmonitoring NRW liefert zahlreiche Zeitreihen, um die Folgen des Klimawandels in NRW abzubilden.

Der vorliegende Bericht kann nur einen Ausschnitt der vielfältigen vorhandenen Informationen zeigen. Darum lohnt es sich, in regelmäßigen Abständen die neu veröffentlichten Daten in den oben genannten Fachinformationssystemen abzurufen. Die Nutzung ist für jeden Bürger frei und kostenlos.

Ich wünsche Ihnen eine informative Lektüre.

Ihr



Dr. Thomas Delschen

Inhalt

Impressum	2
Vorwort	3
Abkürzungsverzeichnis	7
1. Einleitung	8
1.1 Definition Klima	9
1.2 Daten und Statistik	10
1.3 Klimafolgenmonitoring NRW	10
1.4 Digitaler Klimaatlas NRW	11
1.5 Signifikanztest	11
2. Das aktuelle Klima in Nordrhein-Westfalen und seine Entwicklung	12
2.1 Lufttemperatur	13
2.2 Kenntage Temperatur	19
2.2.1 Heiße Tage	19
2.2.2 Eistage	22
2.3 Niederschlag	24
2.4 Kenntage Niederschlag	28
2.4.1 Trockene Tage	29
2.4.2 Starkniederschlagstage	30
2.5 Schnee	36
3. Auswirkungen des Klimawandels auf Städte	38
3.1 Die städtische Wärmeinsel	39
3.2 Hitze	45
3.3 Extremniederschläge und Stürme	50
4. Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt	52
4.1 Evapotranspiration	53
4.2 Klimatische Wasserbilanz	57
4.3 Grundwasserneubildung	60
4.4 Grundwasserstand	62
4.5 Gewässertemperatur	63
4.6 Mittlerer Abfluss	64
5. Auswirkungen des Klimawandels auf die Biodiversität	66
5.1 Phänologie	68
5.1.1 Beginn und Dauer verschiedener Phänophasen	68
5.1.2 Beobachtungen an der Buche	70
5.2 Tierpopulationen	74
5.2.1 Bestandsentwicklung beim Grünspecht	74
5.2.2 Bestandsentwicklung ausgewählter Brutvogelarten	75
5.2.3 Die Wintersituation für den Rothirsch	76
5.2.4 Fortpflanzungsrhythmus beim Rehwild	78
5.2.5 Lebensgemeinschaften bei Fischen	79
5.3 Lebensräume	81
5.4 Neobiota	84
5.5 Tierkrankheiten	87

6. Auswirkungen des Klimawandels auf den Boden	88
6.1 Potenzielle Wassererosionsgefährdung	91
6.2 Bodentemperatur	92
6.3 Bodenwasserhaushalt im Wald	93
6.4 Humusgehalte und -vorräte in den Böden	95
7. Fazit	96
Literaturverzeichnis	98
Abbildungsverzeichnis	100
Tabellenverzeichnis	102
Bildnachweise	103

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
BTV	Bluetongue virus – Blauzungenkrankheit
CTI	Community Temperature Index
DIN	Deutsches Institut für Normung
DTK	Digitale topographische Karte
DWD	Deutscher Wetterdienst
EEA	European Environment Agency – Europäische Umweltagentur
FFH-Richtlinie	Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie
FIS	Fachinformationssystem
GD	Geologischer Dienst NRW
GDV	Gesamtverband der deutschen Versicherungswirtschaft e.V.
GIS	Geo-Informationssystem
GIUB	Geographisches Institut der Universität Bonn
GW	Grundwasser
GWN	Grundwasserneubildung
GWS	Grundwasserstand
hPa	Hektopascal
IPCC	Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen – Intergovernmental Panel on Climate Change
K	Kelvin: Einheit zur Beschreibung von Temperaturdifferenzen. Dabei entspricht 1 K = 1 °C.
KFM	Klimafolgenmonitoring
KJ	Kalenderjahr (01. Januar bis 31. Dezember)
KNP	Klimanormalperiode
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes NRW
LRT	Lebensraumtyp nach FFH-Richtlinie
LWK	Landwirtschaftskammer NRW
MKULNV	Ministerium für Klima, Umwelt, Landwirtschaft, Natur und Verbraucherschutz
mm	Millimeter
m ü. NHN	Meter über Normalhöhennull
m ü. NN	Meter über Normalnull
NRW	Nordrhein-Westfalen
NS	Niederschlag
ÖFS	Ökologische Flächenstichprobe
RUB	Ruhr-Universität Bochum
Si	Signifikanzniveau
STI	Species Temperature Index
T	Temperatur
Tdiff	Transpirationsdifferenz
UHI	Urban Heat Island – städtische Wärmeinsel
WWJ	Wasserwirtschaftsjahr (01. November bis 31. Oktober)

1

Einleitung

Das Klima ist durch den stattfindenden Klimawandel zu einem weltweit aktuellen Thema geworden. Experten sind sich heute darüber einig, dass die globale Erwärmung anthropogen beeinflusst wird. So schreibt das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) in seinem fünften Sachstandbericht: „Der Einfluss des Menschen auf das Klimasystem ist klar und die jüngsten anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen sind die höchsten der Geschichte. Die jüngsten Klimaänderungen hatten weitverbreitete Folgen für menschliche und natürliche Systeme“ (IPCC 2014).



Auch in Nordrhein-Westfalen (NRW) sind bereits anhand meteorologischer Daten sowie Beobachtungen in Natur und Umwelt Veränderungen des Klimas und die daraus resultierenden Folgen zu erkennen. Diese Entwicklungen werden vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV) mit unterschiedlichen Methoden dokumentiert und untersucht. Bereits 2010 wurde mit dem LANUV Fachbericht 27 „Klima und Klimawandel in Nordrhein-Westfalen – Daten und Hintergründe“ eine solide Datengrundlage mit Stand 2008 veröffentlicht. Inzwischen konnten die Daten fortgeschrieben werden und es steht fest, dass sich der Erwärmungstrend in NRW weiter fortsetzt: Seit Beginn der Messungen 1881 war 2014 mit einer Jahresdurchschnittstemperatur von 11 Grad Celsius (°C) das wärmste Jahr in NRW und Deutschland. Darüber hinaus lagen von den 20 wärmsten Jahren allein elf im 21. Jahrhundert.

NRW hat 2011 als erstes deutsches Bundesland ein Monitoring zum Klima und seinen Folgen gestartet (www.klimafolgenmonitoring.nrw.de). Insgesamt wurden für sechs Umweltbereiche Indikatoren zusammengestellt, die den Einfluss des sich wandelnden Klimas auf Natur und Umwelt in NRW zeigen. Dafür werden Daten des LANUV sowie des Deutschen Wetterdienstes (DWD) ausgewertet. Das Klimafolgenmonitoring wird durch weitere LANUV-Monitoringprogramme ergänzt, wie beispielsweise die ökologische Flächenstichprobe (ÖFS). Abgerundet

wird die Thematik durch das internetbasierte Fachinformationssystem (FIS) Klimaatlas NRW, in dem auf etwa 300 Karten wichtige meteorologische Parameter des aktuellen Klimas und seine voraussichtliche zukünftige Entwicklung (Projektionen) dargestellt werden (www.klimaatlas.nrw.de). Der vorliegende Bericht fasst die Erkenntnisse aus diesen Fachanwendungen zusammen und bereitet sie anschaulich auf.

Im zweiten Kapitel des vorliegenden Berichtes wird das bisherige Klima in NRW und seine Entwicklung bis einschließlich 2015 beschrieben. Unterschiedliche Parameter wie Temperatur, Niederschlag und Kenntage werden in ihrer zeitlichen Entwicklung und dem Jahresverlauf untersucht. In den Kapiteln vier bis sechs werden die Auswirkungen der Veränderungen auf die Umwelt und die Natur in NRW beschrieben. Da NRW das am dichtesten besiedelte Bundesland ist und durch die Rhein-Ruhr-Region die Ballungsräume besonders im Fokus stehen, wird diesem Thema im dritten Kapitel ein Schwerpunkt gewidmet.

Insgesamt bereitet der zweite Klimabericht des LANUV alle neuen und relevanten Daten zum Klimawandel in NRW auf und bietet damit sowohl Experten und Expertinnen als auch Laien einen guten Überblick über die im LANUV vorliegenden Erkenntnisse.

1.1 Definition Klima

Der Begriff Klima ist als Zusammenfassung von Wettererscheinungen definiert und gibt den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort oder für ein Gebiet an. Das Klima kann durch statistische Auswertung der meteorologischen Größen einer Mindestperiode von 30 Jahren beschrieben werden. Es wird in der Regel durch Mittelwerte und Jahressummen (beispielsweise bei Temperatur und Niederschlag), Häufigkeiten (zum Beispiel Sommer- und Frosttage) und Andauerzeiten (zum Beispiel Sonnenscheindauer) charakterisiert.

Das Klima an einem bestimmten Ort wird insbesondere durch die geographische Breite, die Höhe des Standortes, die Entfernung zum Meer sowie die Geländeform und die Landnutzung beeinflusst. Der Begriff ist klar von dem des Wetters abzugrenzen: Das Wetter beschreibt den augen-

blicklichen physikalischen Zustand der unteren Atmosphäre (Troposphäre) zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort. Von Wetter spricht man bei Zeiträumen von wenigen Stunden bis zu einigen Tagen.

Doch auch das Klima ist keine statische Größe, sondern es verändert sich. Beobachtungen haben gezeigt, dass seit Beginn der Messungen 1881 die durchschnittliche Temperatur in NRW um 1,4 Kelvin (K) zugenommen hat (siehe Kapitel 2.1). Ein Anstieg der Temperatur ist in allen Regionen NRWs nachweisbar. Modellierungen weisen darüber hinaus darauf hin, dass sich der Erwärmungstrend auch in Zukunft fortsetzen wird: Ende des 21. Jahrhunderts wird für NRW eine Erwärmung zwischen 1 und 4,5 K im Vergleich zur Klimanormalperiode (KNP) 1971 bis 2000 projiziert.

1.2 Daten und Statistik

Die in diesem zweiten Klimabericht dargestellten Karten und Zeitreihen wurden auf der einen Seite auf Basis von Daten des DWD berechnet. Auf der anderen Seite wurden zahlreiche Monitoringprogramme des LANUV im Hinblick auf mögliche Klimafolgen ausgewertet. Mit dem Klimaschutzgesetz NRW wurde das Monitoring auf eine gesetzliche Grundlage gestellt.

Der DWD unterhält ein umfangreiches und langjähriges Stationsnetz, das mit unterschiedlichster Messtechnik und Sensorik Daten zu beispielsweise Temperatur, Niederschlag und Sonnenscheindauer erhebt. Die Daten werden gemäß international festgelegter Normen gewonnen und stehen dem LANUV seit Beginn der Messungen zur Verfügung.

Der DWD interpoliert die Stationsdaten in jährlicher Auflösung unter Berücksichtigung der Geländetopographie auf

ein Raster von 1 km × 1 km, so dass sich Flächenkarten für NRW ergeben. Die Flächenkarten werden auf Jahresbasis zu zeitlichen Mittelwerten für verschiedene 30-Jahresperioden aggregiert oder zur Bestimmung der Durchschnittswerte über NRW gemittelt. In Einzelfällen reicht die Stationsdichte nicht aus, um Flächenkarten zu bilden. Darum werden neben den Flächenmitteln auch die Daten einzelner Messstationen ausgewertet. Es wurde geprüft, ob die ausgewählten Stationen für den jeweiligen Parameter und für NRW beispielhaft und repräsentativ sind.

Viele der hier vorgestellten Ergebnisse werden auch in den Klimafachinformationssystemen des LANUV veröffentlicht. Der vorliegende Klimabericht hat unter anderem das Ziel, diese Fachinformationssysteme einer breiteren Öffentlichkeit bekannt zu machen. Hier sind in erster Linie das Klimafolgenmonitoring und der Klimaatlas NRW zu nennen, die im Folgenden näher vorgestellt werden.

1.3 Klimafolgenmonitoring NRW

Im Sommer 2011 hat das LANUV ein Klimafolgenmonitoring (KFM) unter www.klimafolgenmonitoring.nrw.de veröffentlicht. Seitdem dokumentieren Indikatoren aus sechs Umweltbereichen die Entwicklung des Klimas und seiner Folgen in NRW. Mit dem Klimaschutzgesetz NRW wurde das Monitoring auf eine gesetzliche Grundlage gestellt.

Da es sich beim Klimawandel um ein globales Problem handelt, müssen entsprechende Monitoringkonzepte auch über die Grenzen von NRW hinaus mit anderen Ansätzen vergleichbar sein. Aus diesem Grund wurden in einem ersten Schritt nationale und internationale Ansätze recherchiert und geprüft. Zum Zeitpunkt der Konzepterarbeitung existierte weder auf Bundes- noch auf Landesebene ein Monitoring zu Klimafolgen. Einzig ein Konzept der Europäischen Umweltagentur (EEA 2008) lieferte konkrete Indikatoren-Vorschläge. Daher orientiert sich die Auswahl der NRW-Indikatoren an dieser Veröffentlichung.

Die in NRW im Natur- und Umweltbereich betriebenen Mess- und Beobachtungsprogramme wurden auf die Realisierbarkeit der EEA-Indikatoren hin untersucht. Den Indikatoren sollen konsistente und belastbare Zeitreihen zu Grunde liegen. Eine wichtige Rolle spielt außerdem die möglichst hohe Auflösung der Daten beziehungsweise ihre Repräsentativität für NRW. In einigen Bereichen konnten NRW-spezifische Vorschläge zum ursprünglichen EEA-Konzept ergänzt werden.

Klimatische Entwicklungen und Veränderungen werden in der Regel nur bei Betrachtung längerer Zeiträume deutlich. Darum wurden bei der Auswahl der Indikatoren möglichst lange Zeitreihen berücksichtigt. Trends werden über den jeweiligen gesamten Messzeitraum sowie für verschiedene kürzere Zeiträume untersucht und anschließend mit dem Mann-Kendall-Test auf ihre Signifikanz getestet (siehe Kapitel 1.5). Für Indikatoren mit langen Messzeiträumen werden außerdem die Mittelwerte unterschiedlicher 30-Jahreszeiträume (Klimanormalperioden) angegeben.

Das Klimafolgenmonitoring NRW wird jährlich aktualisiert und fortlaufend um neue Indikatoren erweitert. Im Januar 2016 waren aus sechs Umweltbereichen (Klima und Atmosphäre, Wasser, Boden, Biodiversität, Land- sowie Forstwirtschaft) insgesamt 19 Indikatoren veröffentlicht. Grundlage der Indikatoren sind landeseigene Mess- und Beobachtungsprogramme sowie Daten des DWD.

Im ersten LANUV-Klimabericht wurden für NRW Veränderungstrends für eine Vielzahl klimatologischer Parameter und daraus resultierender Folgen bis einschließlich 2008 dokumentiert (LANUV 2010). Viele der in diesem Bericht vorgestellten Parameter sind anschließend als Indikatoren in das Klimafolgenmonitoring NRW übernommen worden. Seitdem haben sich die in den Daten feststellbaren Trends fortgesetzt. Daher sollen mit diesem Bericht die wichtigs-

ten Zeitreihen bis einschließlich 2015 fortgeschrieben werden. Darüber hinaus werden neue, klimarelevante Parameter vorgestellt, die in den letzten Jahren vom LANUV in das Beobachtungsprogramm mit aufgenommen worden

sind oder zukünftig mit aufgenommen werden sollen. Im Text wird vermerkt, ob der Indikator bereits Bestandteil oder ein Vorschlag zur Erweiterung des Klimafolgenmonitorings ist.

1.4 Digitaler Klimaatlas NRW

Der digitale Klimaatlas NRW stellt unter www.klimaatlas.nrw.de die Grundlagen zum Klima und seiner Entwicklung in NRW zur Verfügung. Er ist als raumbezogene Bestandsaufnahme konzipiert, ist also in erster Linie ein anschauliches Nachschlagewerk über das gegenwärtige nordrhein-westfälische Klima und seine Änderungen in der nahen Vergangenheit und Zukunft.

Der Klimaatlas gliedert sich in einen Text- und einen Kartenteil. Im Textteil werden die einzelnen Parameter wie Temperatur, Niederschlag und Wind ausführlich beschrieben, die jeweilige Messmethodik und Datenaufbereitung erläutert sowie der aktuelle Stand und die Entwicklung aufgeführt. Im Kartenteil sind mit Stand Januar 2016 über 300 Karten zum aktuellen Klima und seiner zukünftigen Entwicklung online gestellt. Neben den klimatologischen Parametern wie Temperatur, Niederschlag, Sonnenstrahlung und Wind sind auch Planungskarten beispielsweise zu Gradtagen, der Vegetationsperiode oder Kaltluftabflüssen eingestellt. Für viele Parameter sind die beiden Klimanormalperioden 1971 bis 2000 und 1981 bis 2010 jeweils für das ganze Jahr sowie für die einzelnen Jahreszeiten und Monate veröffentlicht. Darüber hinaus stehen Zukunftsprojektionen für die Zeiträume 2021 bis 2050 sowie 2071 bis 2100 als so genannte Differenzkarten

(Veränderung zur Vergleichsperiode 1971 bis 2000) zur Verfügung. Dafür wurde in Kooperation mit dem DWD ein sogenanntes Ensemble aus 19 verschiedenen Klimamodellen ausgewertet. Als Klimaszenario wurde das SRES-Szenario A1B (IPCC 2000) verwendet, das für die Zukunft von einem weltweiten Wirtschaftswachstum, einer zur Mitte des 21. Jahrhunderts kulminierenden und anschließend rückläufigen Weltbevölkerung, einer raschen Einführung neuer und effizienterer Technologien und der ausgewogenen Nutzung aller Energiequellen ausgeht. Die verschiedenen Klimamodelle liefern dabei unterschiedliche Ergebnisse, die alle grundsätzlich als gleich wahrscheinlich anzusehen sind. Um einen Korridor aufzuzeigen, in dem die zu erwartenden Klimaveränderungen wahrscheinlich eintreten werden, sind jeweils unterschiedliche Perzentile der Klimaprojektionen dargestellt (vgl. DWD 1996 bis 2014). Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass eine gewisse Bandbreite von verschiedenen Modellergebnissen dargestellt werden kann, während einige Extremwerte keine Berücksichtigung finden.

Auch der Klimaatlas NRW wird kontinuierlich erweitert. Viele der in diesem Klimabericht abgedruckten Karten stammen aus dem FIS oder sollen neu aufgenommen werden.

1.5 Signifikanztest

Die Zeitreihen der verschiedenen Kenngrößen wurden mit dem verteilungsfreien Mann-Kendall-Test auf signifikante Trends geprüft. Dies soll Aufschluss darüber geben, wie deutlich und sicher ein Trend gegenüber der Variabilität innerhalb der Zeitreihe hervortritt. Je größer das Signifikanzniveau ist, desto stärker gilt ein Trend als statistisch gesichert. Die Signifikanzniveaus (S_i) werden in Tabelle 1 bewertet:

Tabelle 1: Bewertung der Signifikanzniveaus mit dem Mann-Kendall-Test

Signifikanzniveau	Bewertung
$S_i < 90 \%$	nicht signifikant
$90 \% \leq S_i < 95 \%$	signifikant
$95 \% \leq S_i < 99 \%$	sehr signifikant
$99 \% \leq S_i$	hochsignifikant

Der Mann-Kendall-Test setzt keine Linearität des Trends voraus, sondern gibt lediglich Auskunft über ein relatives Ansteigen oder Abfallen der Zeitreihenwerte. Dadurch kann der Test auch gut auf Datensätze mit Ausreißern angewendet werden. Ein weiterer Vorteil des Mann-Kendall-Tests ist, dass er keine Normalverteilung der Daten erfordert, was bei klimatologischen und hydrologischen Datenreihen selten gegeben ist.

Wurde ein Trend mit dem Mann-Kendall-Test als signifikant getestet, wird er – trotz obiger Erklärung – als linearer Trend grafisch in den Diagrammen dargestellt. Dies dient lediglich der Veranschaulichung. Die im Text erläuterten Ergebnisse des Tests können darum in Einzelfällen geringfügig von den in den Diagrammen dargestellten Trendgeraden abweichen.

2

Das aktuelle Klima in Nordrhein-Westfalen und seine Entwicklung

NRW zählt zum warmgemäßigten Regenklima mit kühlen Sommern und milden Wintern (KÖPPEN 1936). Der maritime Einfluss bedingt, dass die Durchschnittstemperatur im wärmsten Monat August unter 22 °C liegt und im kältesten Monat Januar nicht unter -3 °C fällt. Die ausgeprägte Struktur des Reliefs führt jedoch dazu, dass entlang des Rheins das Klima eher warm und von mäßigen Niederschlägen geprägt ist, während die Mittelgebirge deutlich kühler und regenreicher sind.



Das Wichtigste vorab:

- Die durchschnittliche **Jahresmitteltemperatur** hat sich zwischen 1881 und 2015 um 1,4 K erhöht.
- Seit Beginn der Messungen lagen von den **20 wärmsten Jahren** elf im 21. Jahrhundert und nur vier vor 1990.
- **Heiße Tage**, an denen die Temperatur 30 °C erreicht oder überschreitet, haben seit 1891 im Mittel um etwa drei Tage zugenommen.
- **Eistage**, an denen die Temperatur während des gesamten Tages unter dem Gefrierpunkt verbleibt, haben seit 1891 im Mittel um etwa fünf Tage abgenommen.
- Die **Jahresniederschlagssumme** hat trotz großer Variabilität zwischen 1881 und 2015 um 107 mm zugenommen.
- Bei Betrachtung der **Jahreszeiten** haben die Winterniederschläge am deutlichsten zugenommen, im Frühjahr und Herbst gab es leichte Zunahmen. Der Sommer zeigt dagegen keine Veränderungen im Messzeitraum.
- Die Veränderungen der Anzahl der **Trockenen Tage** ($NS \leq 0,1$ mm/d) zeigt im Vergleich der Klimanormalperioden 1951 bis 1980 und 1981 bis 2010 für zehn untersuchte Stationen insgesamt eine leichte Abnahme.
- Die Anzahl der **Starkniederschlagstage** ($NS > 10, 20$ oder 30 mm) hat sich im Vergleich der Zeiträume 1951 bis 1980 und 1981 bis 2010 tendenziell erhöht.
- Die Anzahl der **Schneetage** am Kahlen Asten, dem zweithöchsten Berg NRW, hat sich zwischen 1955 und 2015 um 25 Tage reduziert.

2.1 Lufttemperatur

Die Lufttemperatur ist die Leitgröße zur Beschreibung der anthropogenen Klimaveränderung. Sie wird direkt durch den anthropogen bedingten Anstieg der Treibhausgasgehalte in unserer Atmosphäre beeinflusst. Als Leitgröße

wird sie seit Einrichtung des Klimafolgenmonitorings als Indikator im Umweltbereich „Klima und Atmosphäre“ geführt. Die jährlichen Aktualisierungen können unter www.klimafolgenmonitoring.nrw.de eingesehen werden.

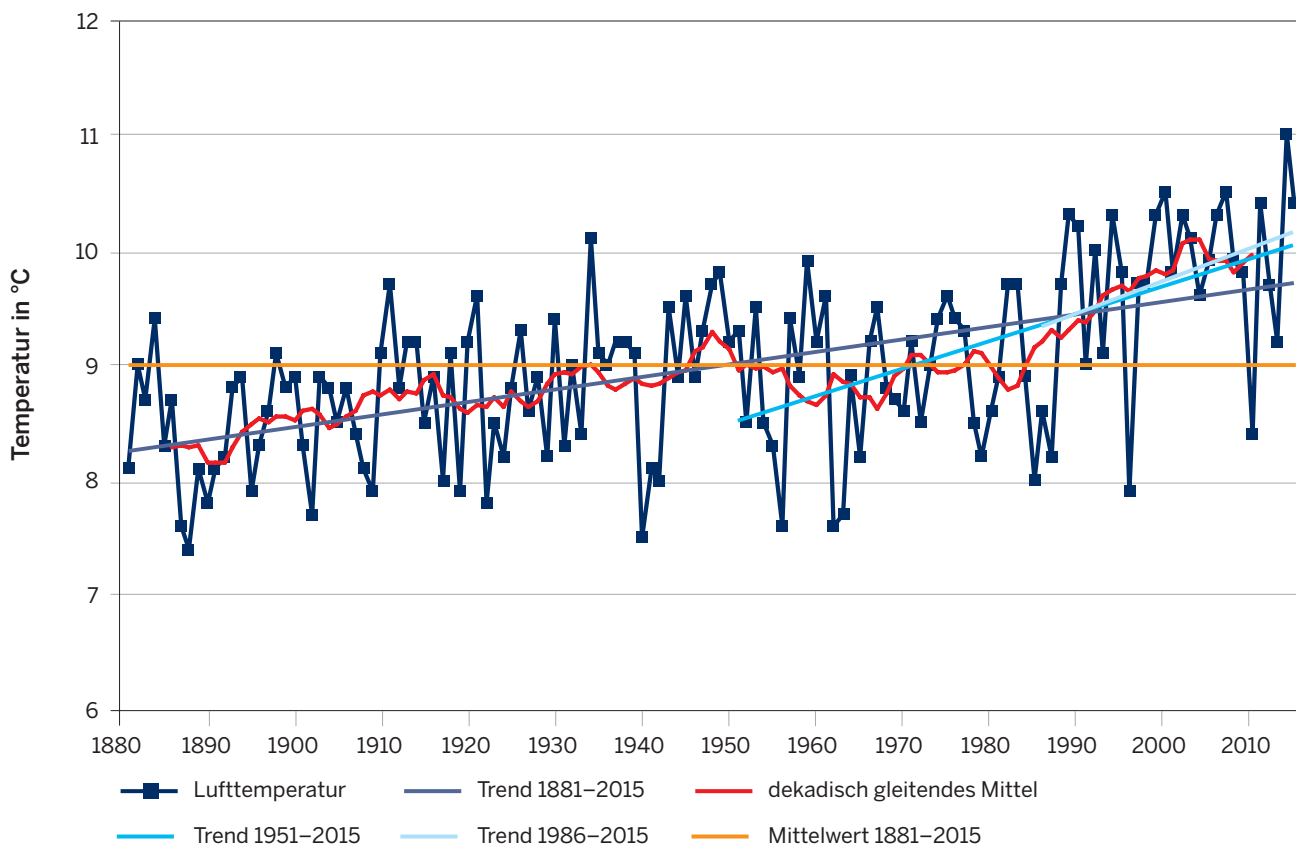


Abbildung 1: Jahresmittel der Lufttemperaturen in NRW im Zeitraum 1881–2015. Zusätzlich sind der langjährige Mittelwert, die dekadisch gleitenden Mittel sowie lineare Trends dargestellt (Datenquelle: DWD).

Tabelle 2: Flächenmittel für die untersuchten Klimaelemente und -größen und deren Veränderungen über den jeweiligen Messzeitraum (Datenquelle: DWD)

Parameter	Messreihe	Einheit	gesamte Messreihe	1881–1910	1891–1920	1901–1930	1911–1940	
Lufttemperatur								
Jahr	1881–2015	°C	9,0	8,4	8,6	8,7	8,8	
Frühling	1881–2015	°C	8,5	7,8	8,1	8,2	8,3	
Sommer	1881–2015	°C	16,4	16,1	16,0	15,9	16,2	
Herbst	1881–2015	°C	9,3	8,8	8,8	8,8	9,0	
Winter	1881–2015	°C	1,7	1,1	1,6	1,8	1,7	
T-Kenntage								
Sommertage	1891–2015	Tage	26,4	n. b.	23,7	22,6	25,3	
Heiße Tage	1891–2015	Tage	4,6	n. b.	3,4	3,1	3,8	
Frosttage	1891–2015	Tage	71,6	n. b.	74,3	71,8	71,9	
Eistage	1891–2015	Tage	16,7	n. b.	16,6	17,1	17,9	
Niederschlag								
Jahr	1881–2015	mm	848	808	815	832	826	
Frühling	1881–2015	mm	181	172	176	176	173	
Sommer	1881–2015	mm	244	249	243	239	231	
Herbst	1881–2015	mm	210	196	189	210	213	
Winter	1881–2015	mm	213	186	205	209	207	
NS-Kenntage								
SNST > 10 mm	1951–2015	Tage	24,0	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	
SNST > 20 mm	1951–2015	Tage	5,4	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	
SNST > 30 mm	1951–2015	Tage	1,4	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	

Verwendete Abkürzungen: NS = Niederschlag, SNST = Starkniederschlagstag, T = Temperatur, n. b. = nicht berechnet, da Werte nicht verfügbar oder Trend nicht signifikant, s. = signifikant, s. s. = sehr signifikant, h. s. = hochsignifikant, n. s. = nicht signifikant.

In Abbildung 1 ist die Jahresmitteltemperatur als Zeitreihe von 1881 bis 2015 dargestellt. Die Kurve zeigt den für Klimagrößen typischen, stark variierenden Verlauf von witterungsgeprägten Ereignissen. Die beiden kältesten Jahre waren 1888 mit einer durchschnittlichen Jahresmitteltemperatur von 7,4 °C und 1940 mit 7,5 °C. Die wärmsten Jahresdurchschnittstemperaturen wurden 2014 mit 11 °C sowie 2000 und 2007 mit jeweils 10,5 °C gemessen (Abbildung 1 und Abbildung 2).

Insbesondere bei Betrachtung des dekadisch gleitenden Mittels (Abbildung 1) können einzelne Abschnitte unterschieden werden: Bis zu den 1950er Jahren fand demnach in NRW eine leichte Erwärmung statt. Nach einer Phase relativ stabiler Jahresmitteltemperaturen oder so-

gar leicht abfallender Werte folgte ab den 1980er Jahren bis heute ein vergleichsweise starker Erwärmungstrend.

Die Jahresmitteltemperatur in NRW hat sich im Schnitt zwischen 1881 und 2015 um 1,4 K erhöht (Abbildung 1: Differenz zwischen Anfang und Ende der Trendlinie). Dieser Trend ist nach dem Mann-Kendall-Test statistisch hochsignifikant. Der Temperaturanstieg hat sich beschleunigt: Während der lineare Erwärmungstrend über den gesamten Messzeitraum 0,1 K pro Jahrzehnt betrug, so lag er während der letzten 60 Jahre bei 0,2 K pro Jahrzehnt (Trend hochsignifikant) und der letzten 30 Jahre sogar bei 0,3 K pro Jahrzehnt (Trend signifikant, Vergleich der unterschiedlichen in Abbildung 1 eingezeichneten Trendgeraden). Seit 1988 (mit Ausnahme der Jahre 1991,

	Klimanormalperioden							Änderung Zeitreihe	Trend Zeitreihe	Trend Mittelwerte
	1921– 1950	1931– 1960	1941– 1970	1951– 1980	1961– 1990	1971– 2000	1981– 2010			
	8,9	9,0	8,9	8,9	9,0	9,3	9,6	+ 1,4	h.s.	h.s.
	8,4	8,5	8,4	8,1	8,3	8,7	9,2	+ 1,5	h.s.	s.s.
	16,5	16,6	16,4	16,2	16,3	16,7	17,1	+ 1,3	h.s.	s.s.
	9,3	9,5	9,6	9,4	9,5	9,4	9,8	+ 1,5	h.s.	h.s.
	1,3	1,4	1,3	1,6	1,7	2,3	2,3	+ 1,5	h.s.	n.s.
	27,4	27,0	24,8	22,3	24,0	27,2	31,1	+ 8,3	h. s.	n. s.
	5,2	4,9	4,5	3,3	3,7	4,8	5,9	+ 2,8	h. s.	n. s.
	74,5	75,0	76,3	73,7	71,4	65,8	66,1	– 13,6	s. s.	n. s.
	19,8	18,3	20,0	17,1	17,3	13,9	14,2	– 5,1	s. s.	n. s.
	831	838	869	857	875	873	918	+ 107	h. s.	h. s.
	174	171	182	186	205	197	203	+ 27	s.	s. s.
	233	247	262	258	241	229	238	n. s.	n. s.	n. s.
	217	208	205	201	208	221	235	n. s.	n. s.	n. s.
	206	210	222	211	223	226	243	+ 61	h. s.	h. s.
	n. b.	n. b.	n. b.	23,3	23,8	23,4	25,2	n. s.	n. s.	n. b.
	n. b.	n. b.	n. b.	4,9	5,1	5,3	6,0	n. s.	n. s.	n. b.
	n. b.	n. b.	n. b.	1,3	1,3	1,4	1,6	n. s.	n. s.	n. b.

1996 und 2010) liegen die gemessenen Jahresmittelwerte oberhalb des langjährigen Mittelwertes (1881 bis 2015) von 9 °C (Tabelle 2 und Abbildung 1).

Werden die in Tabelle 2 dargestellten Mittelwerte für die Lufttemperaturen der einzelnen Klimanormalperioden miteinander verglichen, ist zu erkennen, dass diese ebenfalls allmählich zugenommen haben. Lag die mittlere Lufttemperatur in der Klimanormalperiode von 1881 bis 1910 noch bei 8,4 °C, so beträgt sie für die Periode von 1981 bis 2010 9,6 °C. Der ansteigende Trend der Mittelwerte ist – genauso wie der der gesamten Zeitreihe – nach dem Mann-Kendall-Test hochsignifikant.

2014 zeigt mit einer mittleren Jahrestemperatur von 11 °C das absolute Maximum seit Beginn der Messungen im Jahr 1881. Die Jahresmitteltemperatur in diesem Jahr liegt um 2 K über dem langjährigen Durchschnitt von 9 °C und 0,5 K über den beiden zweitwärmsten Jahren 2000 und 2007. Tatsächlich war 2014 auch deutschlandweit das wärmste Jahr (UBA 2015 a). Darüber hinaus können seit Beginn der Messungen in NRW von den 20 wärmsten Jahren elf im 21. Jahrhundert und nur drei vor 1986 und damit vor der letzten 30-Jahr-Periode der Messungen eingeordnet werden (Abbildung 2). Andersherum lagen 10 der 20 kältesten Jahre in der ersten Klimanormalperiode (1881 bis 1910) der Messreihe.

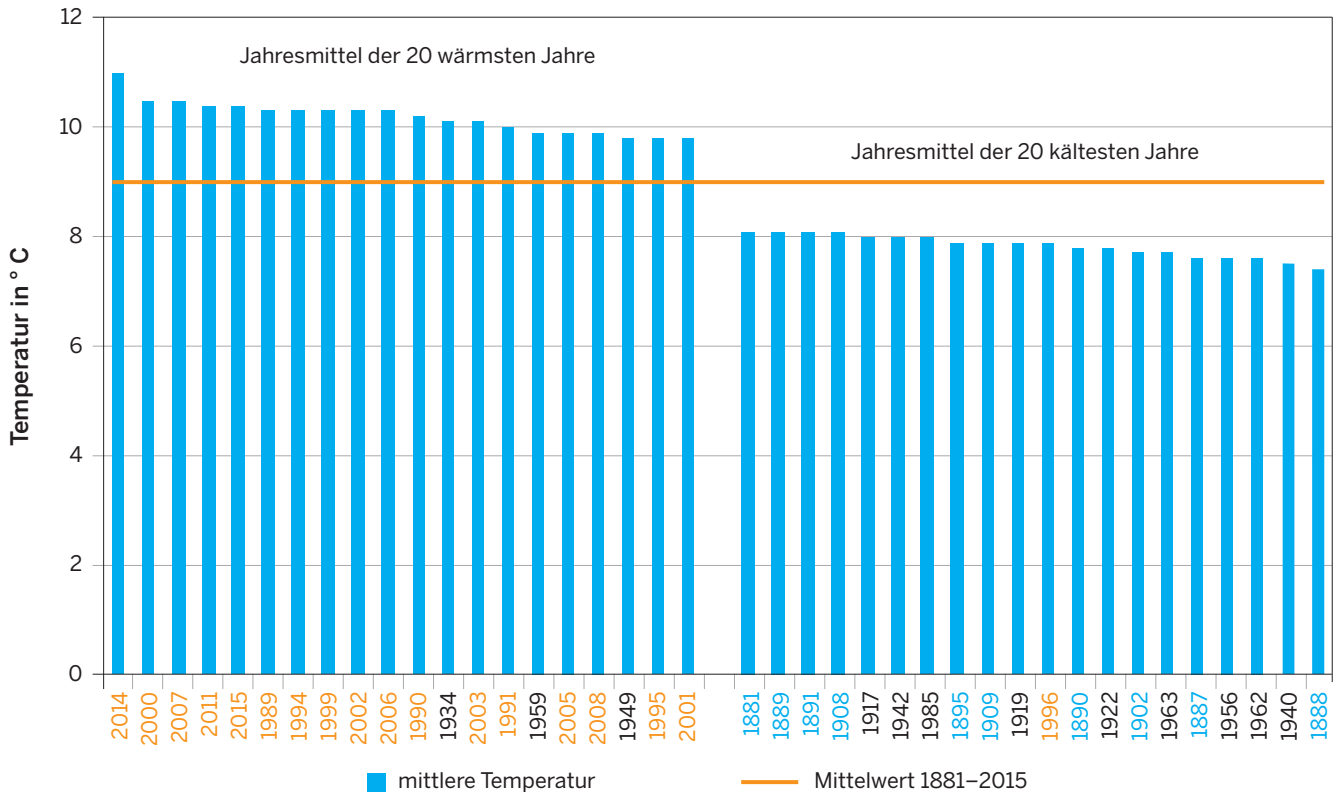


Abbildung 2: Jahresmittel der jeweils 20 wärmsten und kältesten Jahre in NRW seit Beginn der Messungen 1881. Jahre in der ersten KNP 1881–1910 wurden in der Achsenbeschriftung blau, Jahre in der letzten 30-Jahr-Periode 1986–2015 orange gekennzeichnet. Jahre, die zwischen den genannten KNP liegen sind schwarz dargestellt (Datenquelle: DWD).

In Abbildung 3 wurde die Jahresmitteltemperatur in NRW beispielhaft für zwei Klimanormalperioden (1951 bis 1980 und 1981 bis 2010) sowie die Temperaturdifferenzen der beiden Perioden zueinander als Flächenkarten dargestellt. Die Zeiträume wurden so ausgewählt, dass sie sich zeitlich nicht überschneiden. Aus den Flächenkarten ist deutlich abzulesen, dass die Lufttemperatur von der Geländehöhe abhängig ist: Im Sauerland und in der Eifel liegt die mittlere Temperatur in der aktuellen Klimanormalperiode 1981 bis 2010 zwischen 4 und 9 °C, während entlang des Rheintals im Mittel 10 bis 11 °C vorherrschen. Für die ganze Fläche NRWs ergibt sich eine aktuelle mittlere Jahrestemperatur von 9,6 °C (Tabelle 2).

Im Vergleich der aktuellen Klimanormalperiode 1981 bis 2010 mit dem Zeitraum 1951 bis 1980 ist zu erkennen, dass die mittleren Temperaturen flächendeckend in NRW gestiegen sind. Fast überall liegt der Anstieg zwischen 0,5 und 0,8 K, wobei er vereinzelt bis zu 1,4 K erreichen kann. Der aus dieser Flächenkarte errechnete Mittelwert der Klimanormalperiode 1951 bis 1980 liegt bei 8,9 °C und damit 0,7 K unter dem aktuellen Mittelwert der Klimanormalperiode 1981 bis 2010 (Tabelle 2).

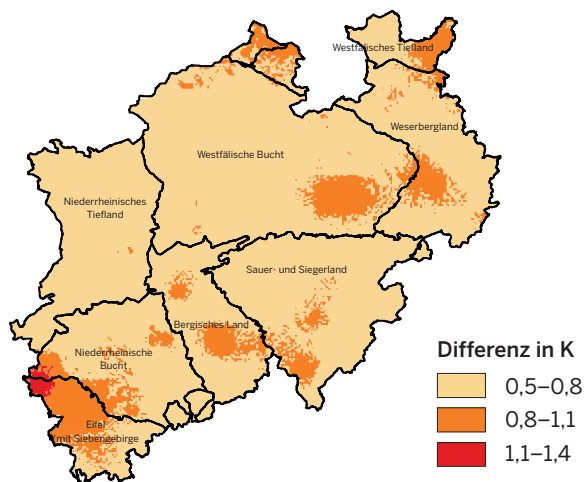
Die Mitteltemperaturen sind nicht nur für das gesamte Jahr und in allen Regionen NRWs gestiegen, sondern auch in den vier Jahreszeiten, wie in Abbildung 4 zu sehen ist (siehe auch Tabelle 2 und Flächenkarten der Jahreszeiten unter www.klimaatlas.nrw.de). Demnach haben im Frühling (März bis Mai), Herbst (September bis November) und Winter (Dezember bis Februar) seit Beginn der Messungen 1881 die durchschnittlichen Temperaturen um 1,5 K zugenommen (Differenz zwischen Anfang und Ende der Trendlinien). Den geringsten Anstieg gab es im Sommer (Juni bis August) mit 1,3 K. Die Trends sind alle nach dem Mann-Kendall-Test statistisch hochsignifikant.

Im Jahr 2014, dem Jahr mit den höchsten Jahresdurchschnittstemperaturen, wurden mit 16,9 °C nur leicht über dem langjährigen Durchschnitt von 16,4 °C liegende Sommertemperaturen erreicht (Tabelle 2). Der Winter 2014 hingegen war mit 5 °C der fünft wärmste in NRW seit Beginn der Messungen. Damit lag er auch deutlich über dem langjährigen Wintermittel für NRW von 1,7 °C.

Jahresmitteltemperatur 1951–1980



Veränderung der mittleren Temperatur



Jahresmitteltemperatur 1981–2010

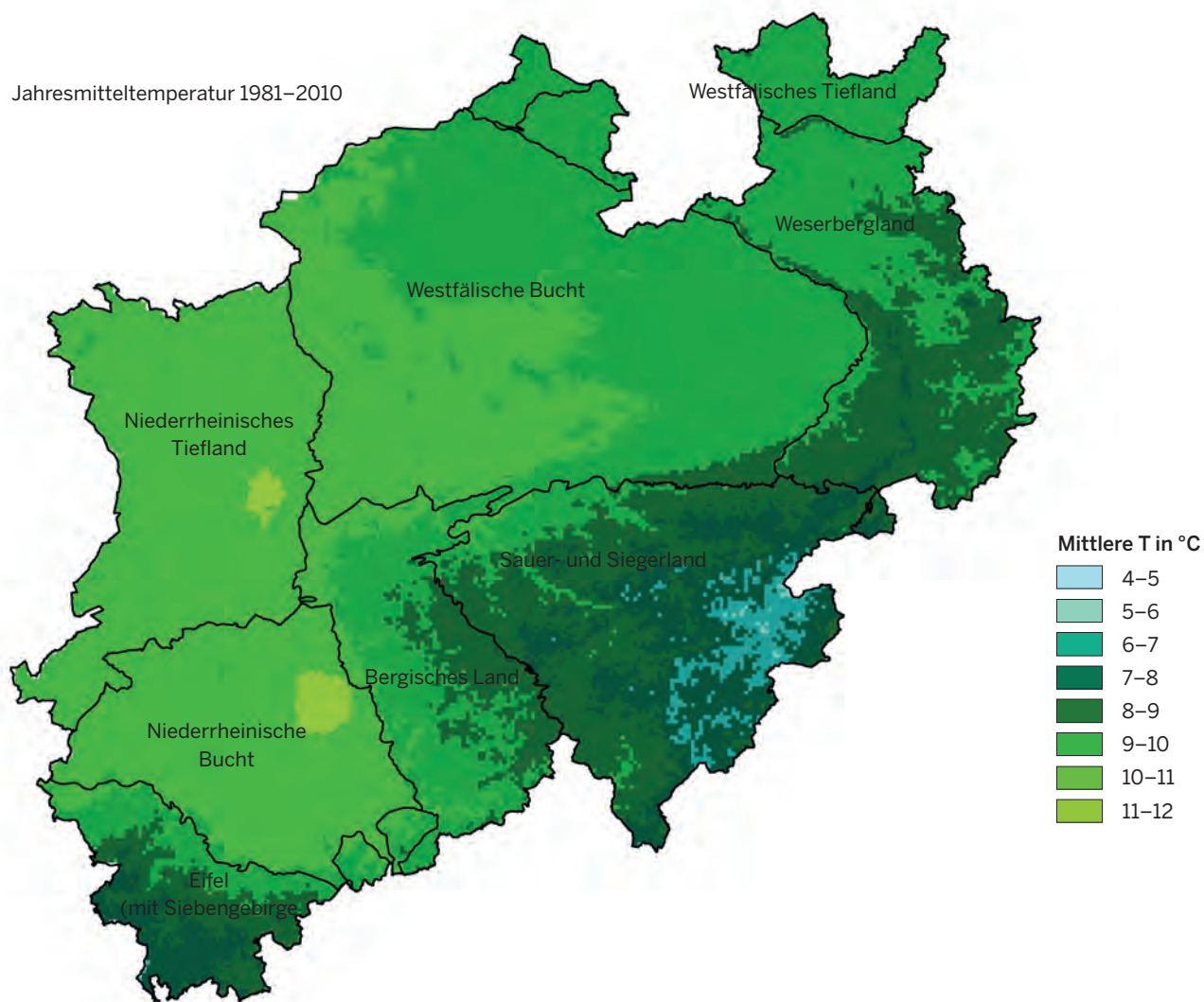


Abbildung 3: Vergleich der mittleren Lufttemperaturen in NRW für die KNP 1951–1980 und 1981–2010 (Datenquelle: DWD, Kartengrundlage: Geobasis NRW)

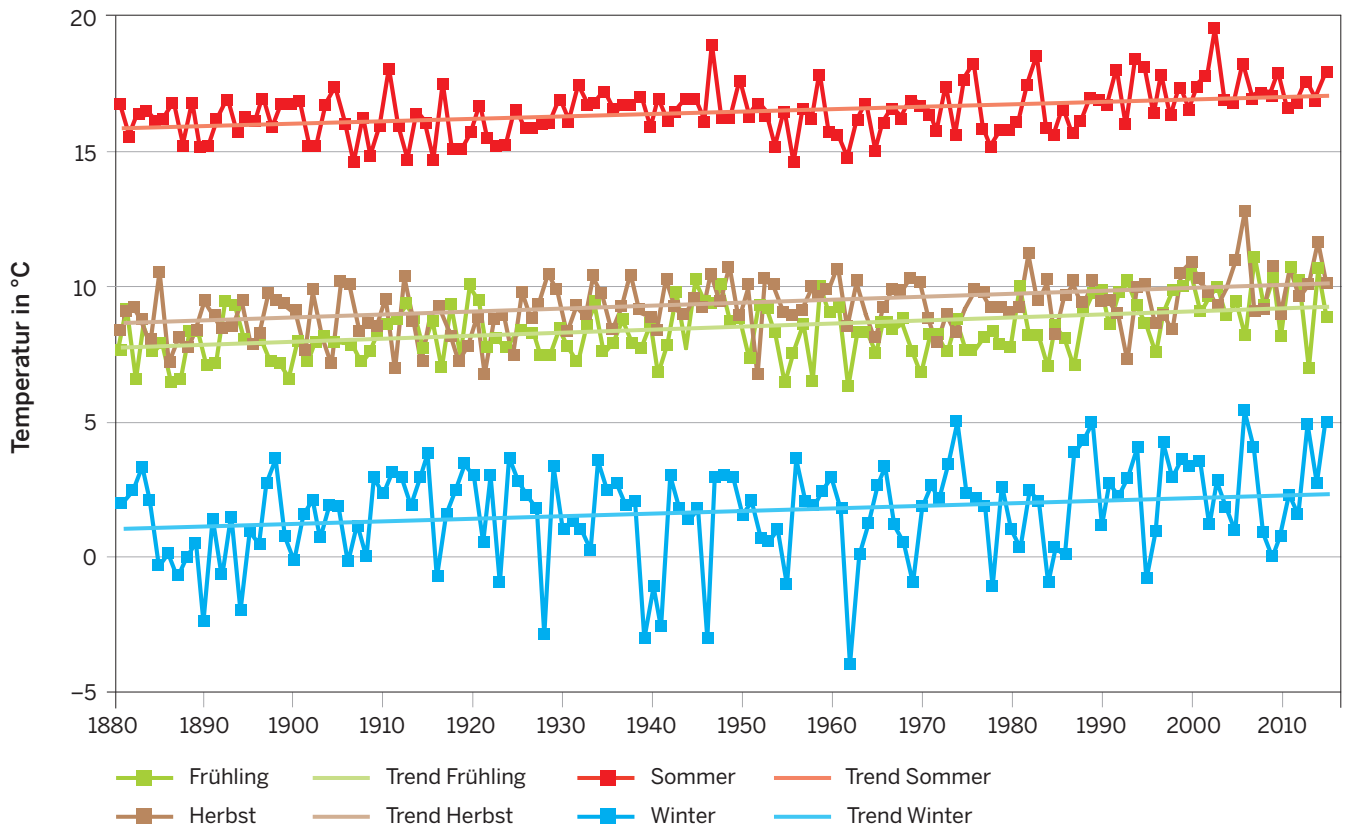


Abbildung 4: Mittlere Lufttemperatur der Jahreszeiten in NRW im Zeitraum 1881–2015 (Datenquelle: DWD)



2.2 Kenntage Temperatur

Die Temperaturkenntage werden von der Lufttemperatur abgeleitet, die als Leitgröße zur Beschreibung der anthropogenen Klimaveränderung dient. Temperaturkenntage charakterisieren besonders warme oder kalte Perioden eines Jahres und geben damit einen Eindruck von der Wärmebelastung beziehungsweise dem Kältereiz in einem Gebiet. Im Klimabericht 2011 wurden bereits die Sommer- und Frosttage behandelt. Im Folgenden werden daher die Heißen Tage und die Eistage analysiert. Die Mittelwerte und Änderungen der Zeitreihen sind darüber hinaus für alle Temperatur-Kenntage in Tabelle 2 dargestellt. Sie werden jährlich im Klimafolgenmonitoring als Indikator im Umweltbereich „Klima und Atmosphäre“ aktualisiert (www.klimafolgenmonitoring.nrw.de).

Die Temperaturkenntage werden einmal als Flächenmittel und Flächenkarten für NRW dargestellt. Zur Analyse einer möglichen Spanne im Jahresverlauf wurden zusätzlich die Daten der zwei Stationen Kahler Asten und Köln-Bonn ausgewertet. Diese beiden Stationen repräsentieren zum einen eine Region mit besonders niedrigen (in NRW am höchsten gelegene Station Kahler Asten) und zum anderen mit besonders hohen (stadtnahe Station Köln-Bonn) Jahresmitteltemperaturen.

2.2.1 Heiße Tage

Ein Heiße Tag ist die meteorologisch-klimatologische Bezeichnung für einen Tag, an dem die Tageshöchsttemperatur 30 °C erreicht oder überschreitet. Damit sind die Heißen Tage eine Untermenge der Sommertage, deren Tageshöchsttemperatur die Marke von 25 °C erreicht oder überschreitet. Die Anzahl der Heißen Tage ist ein Maß für die Intensität eines Sommers, der durch die zusätzliche Angabe der Anzahl der Sommertage genauer beschrieben wird.

In Abbildung 5 ist die Entwicklung der mittleren Anzahl der Heißen Tage über den gesamten Messzeitraum von 1891 bis 2015 zu sehen. Trotz großer Variabilität ist seit 1891 ein Anstieg um fast drei Tage zu erkennen (Differenz zwischen Anfang und Ende der Trendlinie). Genau wie bei der mittleren Lufttemperatur hat sich die Zunahme beschleunigt: Während über den gesamten Zeitraum die Anzahl der Heißen Tage um 0,2 Tage pro Jahrzehnt angestiegen ist, waren es für den Zeitraum 1951 bis 2015 etwa 0,8 Tage und für die letzten 30 Jahre 1,1 Tage pro Jahrzehnt. Alle Trends sind nach dem Mann-Kendall-Test statistisch hochsignifikant.

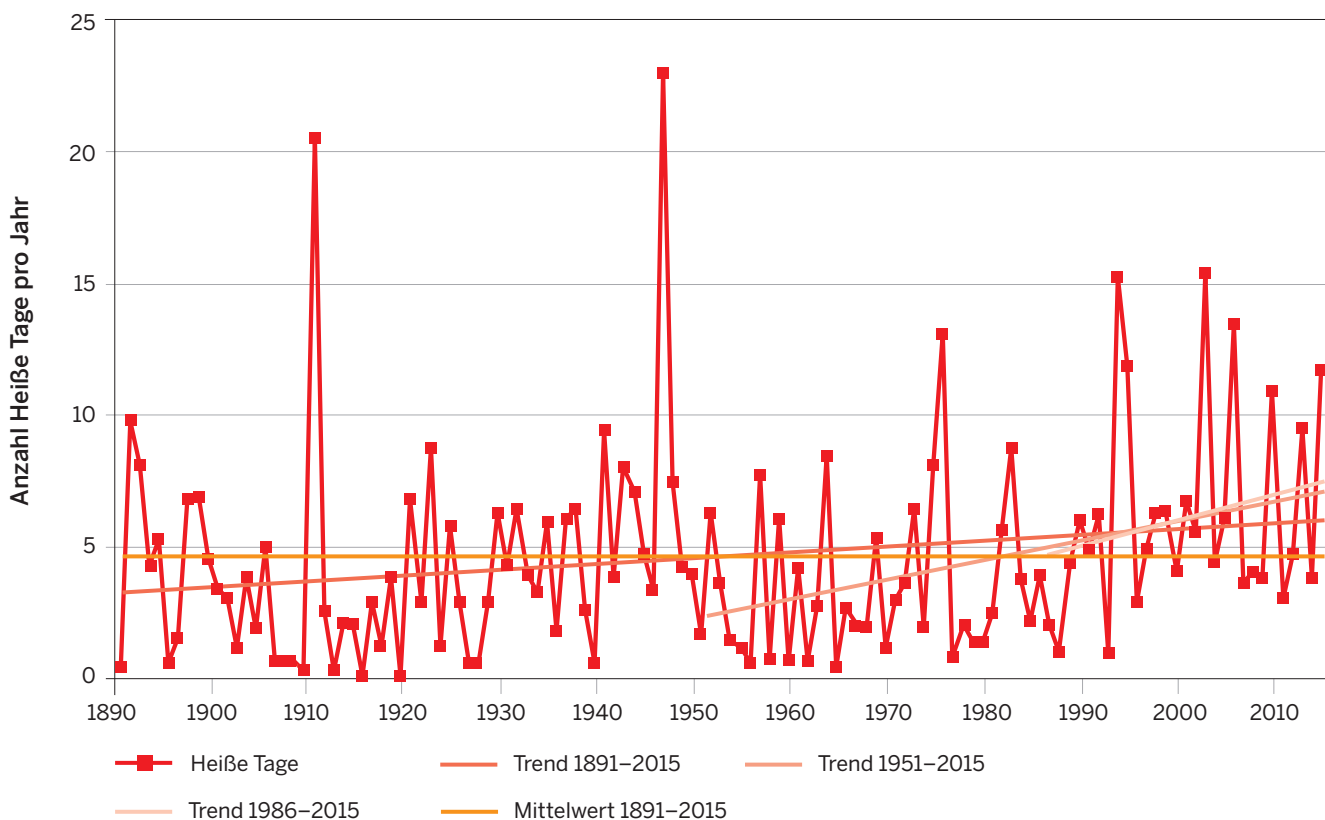


Abbildung 5: Anzahl der Heißen Tage pro Jahr in NRW im Zeitraum 1891–2015 (Datenquelle: DWD)

In den Jahren 1947 und 1911 wurden mit 23 beziehungsweise 21 Tagen die meisten heißen Tage registriert. Diese beiden Jahre liegen weit über dem langjährigen Durchschnitt von 4,6 Tagen (Tabelle 2). An dieser Stelle wird klar, dass die Anzahl der Kenntage nicht unbedingt mit den Jahresdurchschnittstemperaturen korrelieren: mit 9,7 °C (1911) und 9,3 °C (1947) liegen diese beiden Jahre zwar über dem langjährigen Durchschnitt von 9 °C, zählen aber nicht zu den 20 wärmsten Jahren seit Beginn der Messungen (Abbildung 2). Die Kenntage geben aber stellvertretend einen Eindruck für die entsprechende Jahreszeit: so war 1947 der zweitwärmste Sommer (nach 2003) in NRW seit Messbeginn und liegt mit 18,9 °C deutlich über dem langjährigen sommerlichen Durchschnitt von 16,4 °C (Tabelle 2). Umgekehrt liegt das Jahr 2014 mit 3,8 heißen Tagen sogar unter dem langjährigen Mittel von 4,6 Tagen, war aber das Jahr mit den höchsten Jahresdurchschnittstemperaturen seit Beginn der Messungen (siehe Kapitel 2.1).

In Abbildung 6 ist die räumliche Verteilung der Anzahl der heißen Tage beispielhaft für die Klimanormalperiode 1981 bis 2010 in NRW zu sehen. Die Verteilung der heißen Tage folgt der der Lufttemperatur (Kapitel 2.1, Abbildung 3). Die meisten heißen Tage kommen dementsprechend im Bereich der Rheinschiene vor, die wenigsten in den Höhenlagen der Mittelgebirge. Der Mittelwert der aus dieser Karte errechneten aktuellen Klimanormalperiode liegt bei 5,9 Tagen.

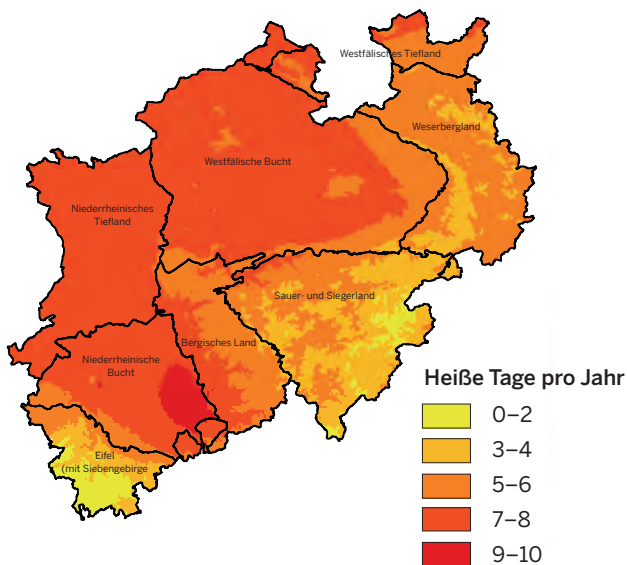
Ebenfalls ist in Abbildung 6 zu erkennen, dass die Anzahl der heißen Tage in der Klimanormalperiode 1981 bis 2010 im Vergleich zur Klimanormalperiode 1951 bis 1980 in

allen Regionen NRWs zugenommen hat (Mittelwert dieser Klimanormalperiode 3,3 Tage, Tabelle 2). Während die Zunahme in den südlich und östlich gelegenen Mittelgebirgsregionen zwischen ein und zwei Tagen beträgt, haben die heißen Tage im Großteil NRWs um drei bis vier Tage zugenommen.

Der Vergleich der Mittelwerte aller im Messzeitraum liegenden Klimanormalperioden (Tabelle 2) zeigt ebenfalls einen tendenziellen Anstieg der heißen Tage. So gab es im Zeitraum 1891 bis 1920 im Mittel 3,4 und im Zeitraum 1981 bis 2010 im Mittel 5,9 heiße Tage pro Jahr. Auffällig sind die Perioden zwischen 1921 und 1970, in denen die Mittelwerte erst auf durchschnittlich 5,2 heiße Tage ansteigen und dann langsam wieder abflachen. In diesen Perioden liegt das Jahr 1947, das mit 23 Tagen herausragend viele heiße Tage aufweist. Für die Mittelwerte ist mit dem Mann-Kendall-Test kein signifikanter Trend nachweisbar.

In Abbildung 7 ist der Jahresverlauf der heißen Tage an den Stationen Köln-Bonn und Kahler Asten für die 30-Jahresperioden 1957 bis 1986 sowie 1986 bis 2015 dargestellt. Die meisten heißen Tage werden in den Monaten Juli und August registriert. Vereinzelt treten sie aber bereits im Mai bzw. noch im September in NRW auf. Im Zeitraum 1957 bis 1986 wurden in Köln-Bonn im Mittel pro Jahr etwa sechs heiße Tage registriert, im Zeitraum 1986 bis 2015 gab es einen Anstieg auf etwa zehn Tage. An der auf einer Höhe von 839 Meter über Normalnull (m ü. NN) gelegenen Station Kahler Asten treten hingegen in beiden Zeiträumen nur in manchen Jahren überhaupt heiße Tage auf.

Heiße Tage pro Jahr 1981–2010



Veränderung im Vergleich zu 1951–1980

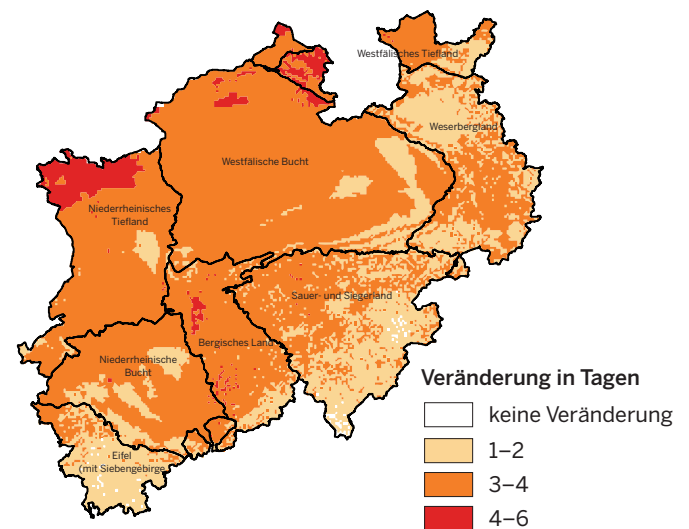


Abbildung 6: Durchschnittliche Anzahl der heißen Tage in NRW in der KNP 1981–2010 sowie Veränderung relativ zur KNP 1951–1980 (Datenquelle: DWD, Kartengrundlage: Geobasis NRW)

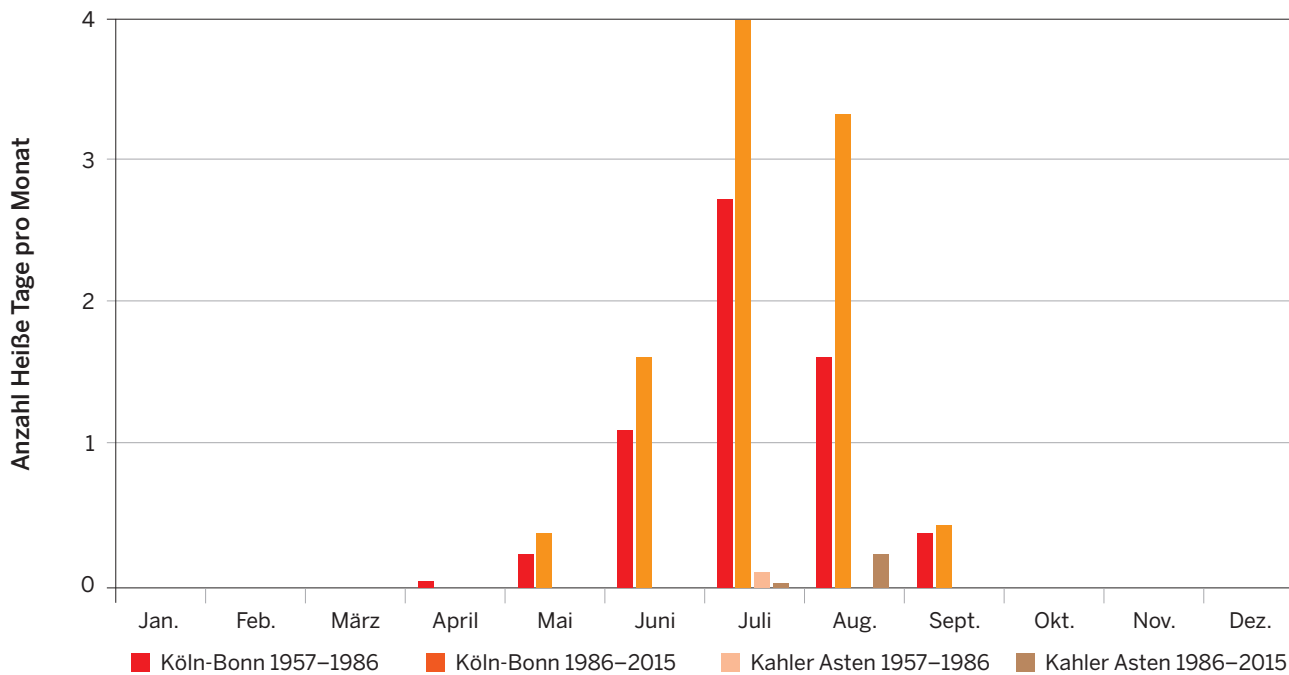


Abbildung 7: Jahresverlauf der mittleren Anzahl der Heißen Tage an den Stationen Köln-Bonn und Kahler Asten in den Zeiträumen 1957-1986 und 1986-2015 (Datenquelle: DWD)

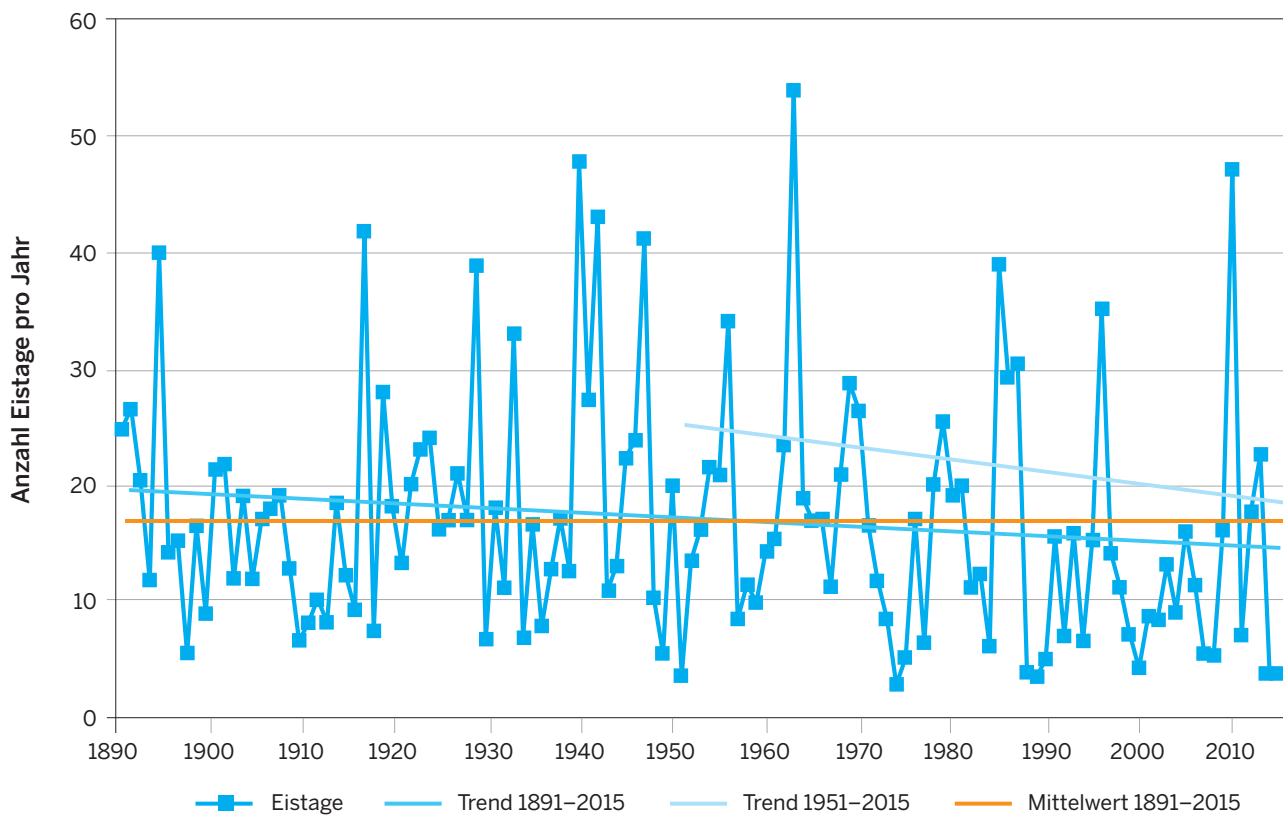


Abbildung 8: Anzahl der Eistage in NRW im Zeitraum 1891-2015 (Datenquelle: DWD)

2.2.2 Eistage

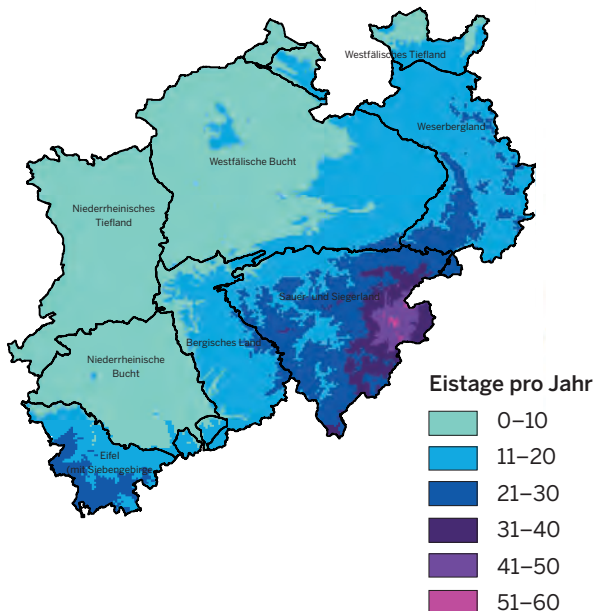
Ein Eistag ist als ein Tag definiert, an dem die Tageshöchsttemperatur 0 °C nicht überschreitet. Dies bedeutet, dass an einem Eistag durchgehend Frost herrscht. Die Anzahl der Eistage ist somit eine Untermenge der Anzahl der Frosttage, an denen die minimale Temperatur unter den Gefrierpunkt sinkt. Mit der Anzahl der Eistage lässt sich die Härte eines Winters charakterisieren.

Abbildung 8 zeigt die Entwicklung der Anzahl der Eistage über den gesamten Messzeitraum von 1891 bis 2015. Trotz großer Variabilität ist seit 1891 das Auftreten der mittleren Anzahl der Eistage in NRW um etwa fünf Tage zurückgegangen (Differenz zwischen Anfang und Ende der Trendlinie). Während über den gesamten Zeitraum betrachtet die Anzahl der Eistage um 0,4 Tage pro Jahrzehnt abgenommen hat, waren es für den Zeitraum 1951 bis 2015 etwa 1,1 und für die letzten 30 Jahre tendenziell 0,6 Tage pro Jahrzehnt. Der Trend der langen Zeitreihe ist nach Mann-Kendall statistisch sehr signifikant, der Trend ab 1951 signifikant. Der Trend der letzten 30 Jahre ist nicht signifikant und daher auch nicht in der Grafik eingezeichnet.

In Abbildung 9 zeigt die linke Karte die räumliche Verteilung der Anzahl der Eistage in NRW für die Klimanormalperiode 1981 bis 2010. Die meisten Eistage treten in den Hochlagen der Mittelgebirge auf. Dies verhält sich bei den Frosttagen ebenso (hier nicht dargestellt, siehe Karte zur jährlichen Verteilung der Frosttage unter www.klimaatlas.nrw.de). Im Sauer- und Siegerland werden im Umfeld des Kahlen Astens mit bis zu 56 Eistagen pro Jahr die höchsten Werte erreicht. In der Niederrheinischen Bucht werden hingegen durchschnittlich unter zehn Eistage pro Jahr registriert. Das aus dieser Karte errechnete aktuelle Flächenmittel für NRW beträgt 14,2 Eistage pro Jahr (Tabelle 2).

Ebenfalls in Abbildung 9 ist in der rechten Karte zu erkennen, dass beim Vergleich der beiden Klimanormalperioden 1951 bis 1980 und 1981 bis 2010 in weiten Teilen NRWs die Anzahl der Eistage pro Jahr um bis zu fünf Tage abgenommen hat, im Norden NRWs und in der Eifel um bis zu zehn Tage. Im Sauer- und Siegerland werden im Zeitraum 1981 bis 2010 verglichen mit der Klimanormalperiode 1951 bis 1980 zum Teil mehr Eistage gemessen. Im Durchschnitt traten in der Klimanormalperiode 1951 bis 1980 für die ganze Fläche NRWs berechnet 17,1 Eistage pro Jahr auf, also fast drei Tage mehr als in der Klimanormalperiode 1981 bis 2010 (Tabelle 2).

Eistage pro Jahr 1981–2010



Veränderung im Vergleich zu 1951–1980

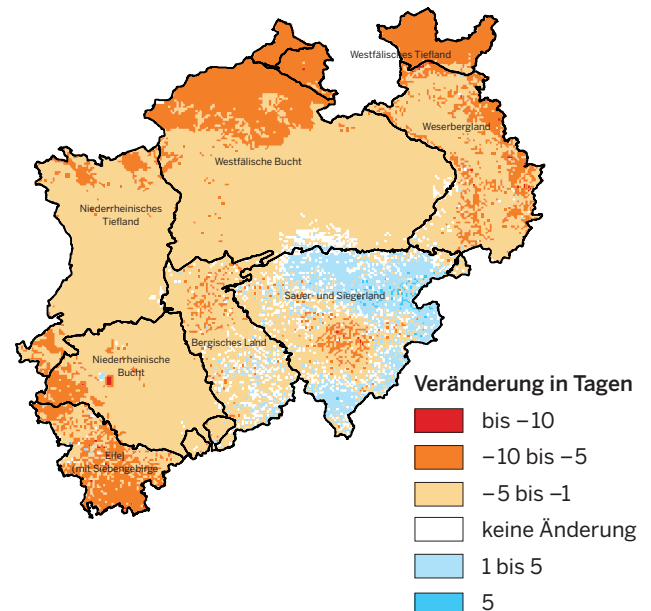


Abbildung 9: Durchschnittliche Anzahl der Eistage in NRW in der KNP 1981–2010 sowie Veränderung relativ zur KNP 1951–1980 (Datenquelle: DWD, Kartengrundlage: Geobasis NRW)

Im 30-Jahreszeitraum 1957 bis 1986 traten an der Station Kahler Asten im Winterhalbjahr von Oktober bis Mai im Mittel 69 Eistage pro Jahr auf (Abbildung 10). Im Zeitraum 1986 bis 2015 gab es hingegen im Mai keine Eistage mehr und ihre Zahl reduzierte sich im Mittel auf 53 Tage pro Jahr. An der Station Köln-Bonn werden in der Regel nur von November bis März Eistage gemessen, die im Mittel

von elf Eistagen pro Jahr im Zeitraum 1957 bis 1986 auf acht Eistage pro Jahr zwischen 1986 und 2015 abgenommen haben. Das Maximum der Eistage tritt im Januar auf, wo an der Station Kahler Asten aktuell im Durchschnitt um die 14 Eistage gemessen werden. Im gleichen Monat finden sich an der Station Köln-Bonn durchschnittlich weniger als vier Eistage.

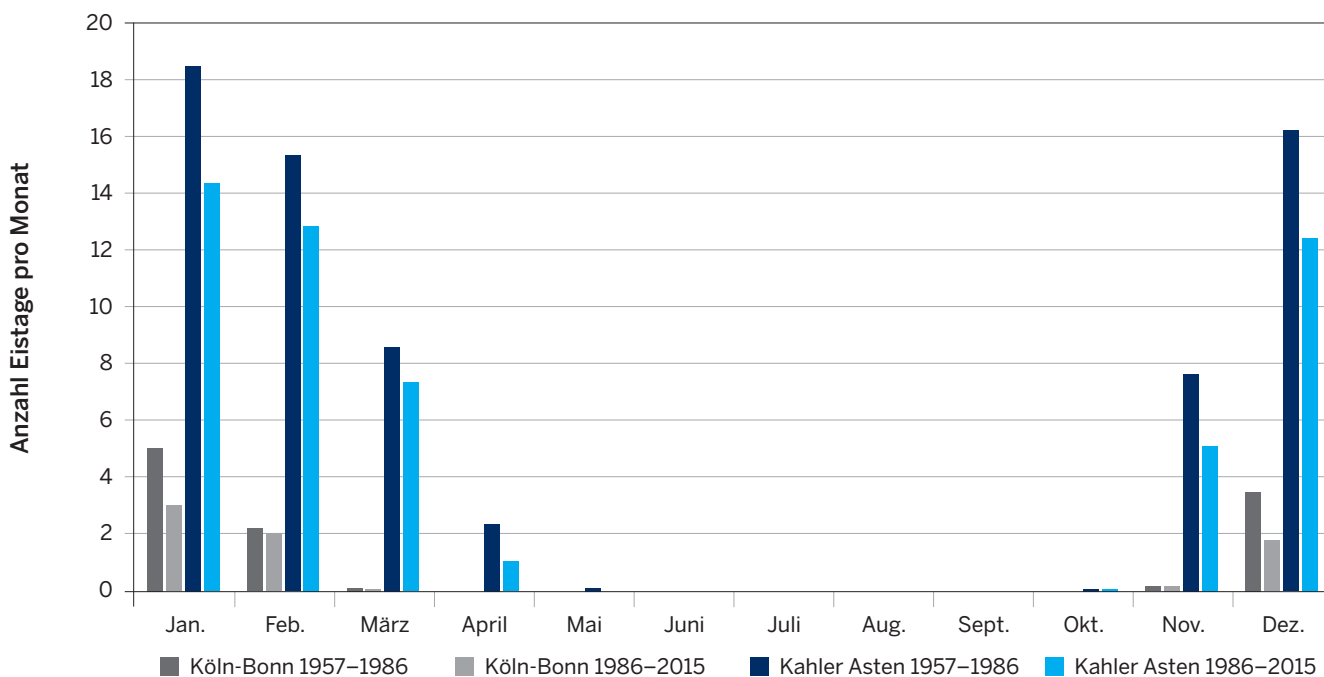


Abbildung 10: Jahresverlauf der mittleren Anzahl der Eistage an den Stationen Köln-Bonn und Kahler Asten in den Zeiträumen 1957–1986 und 1986–2015 (Datenquelle: DWD)



2.3 Niederschlag

Der Niederschlag kann sich als eine Folge des Klimawandels ändern. Die Temperaturzunahme wirkt sich unter anderem auf den Wasserdampfgehalt der Luft und auf die Zirkulationssysteme der Erde aus, was wiederum auf die Niederschlagsmuster Einfluss nimmt. Anthropogene Nutzungen und Beeinträchtigungen – wie beispielsweise eine intensivere Landwirtschaft oder eine Absenkung des Grundwasserspiegels – wirken sich aber ebenfalls regional unterschiedlich auf den Wasserhaushalt aus. Sie überlagern sich mit Klimafolgen, so dass nicht immer eindeutig bestimmt werden kann, ob eine Veränderung auf klimatische Ursachen oder anthropogene Veränderungen zurückgeht. Zumal der Klimawandel selbst ebenfalls durch menschliche Tätigkeiten beeinflusst wird, können die Ursache-Wirkungsbeziehungen sehr komplex sein.

Als ein viele Bereiche beeinflussender Faktor wird der Niederschlag seit Einrichtung des Klimafolgenmonitorings NRW als Indikator im Umweltbereich „Klima und Atmosphäre“ geführt. Die jährlichen Aktualisierungen können unter www.klimafolgenmonitoring.nrw.de eingesehen werden.

Im Zeitraum 1881 bis 2015 betrug der Niederschlag in NRW im Mittel 848 Millimeter pro Jahr (mm/a) (Tabelle 2, Abbildung 11). Die Zeitreihe der Niederschlagssumme zeigt eine sehr viel höhere Variabilität als die Temperaturzeitrei-

he (vergleiche mit Abbildung 1). Das niederschlagsärmste Jahr war 1959 mit 501 mm. Mehr als die doppelte Menge an Regen fiel mit 1.138 mm nur sieben Jahre später im niederschlagsreichsten Jahr 1966 (Abbildung 11 und Abbildung 13). Es fällt auf, dass die letzten fünf Jahre in Folge alle unter dem langjährigen Mittel von 848 mm liegen.

Trotz dieser Variabilität ist insgesamt der mittlere Niederschlag zwischen 1881 und 2015 um 107 mm gestiegen (Differenz zwischen Anfang und Ende der Trendlinie), was einer prozentualen Zunahme von fast 14 Prozent entspricht. Dieser Trend ist nach dem Mann-Kendall-Test statistisch hochsignifikant. Bei Betrachtung kürzerer Zeiträume (alle 60- und 30-jährlichen Zeiträume der gesamten Messperiode) lassen sich nur wenige signifikante Trends nachweisen. Der Vergleich der Mittelwerte der einzelnen Klimanormalperioden (Tabelle 2) jedoch zeigt für den Niederschlag eine hochsignifikante Zunahme von 808 mm in der Periode 1881 bis 1910 auf 918 mm im Zeitraum 1981 bis 2010.

In Abbildung 12 ist zu erkennen, dass der Niederschlag genau wie die Temperatur in NRW von der Geländehöhe abhängig ist: Die Mengen nehmen in allen Regionen mit der Höhenlage zu. Dabei gibt es einen starken Einfluss der Luv- und Lee-Lagen der Gebirgshänge: Da NRW vor allem durch Wetterlagen aus West bis Südwest geprägt ist, stau-

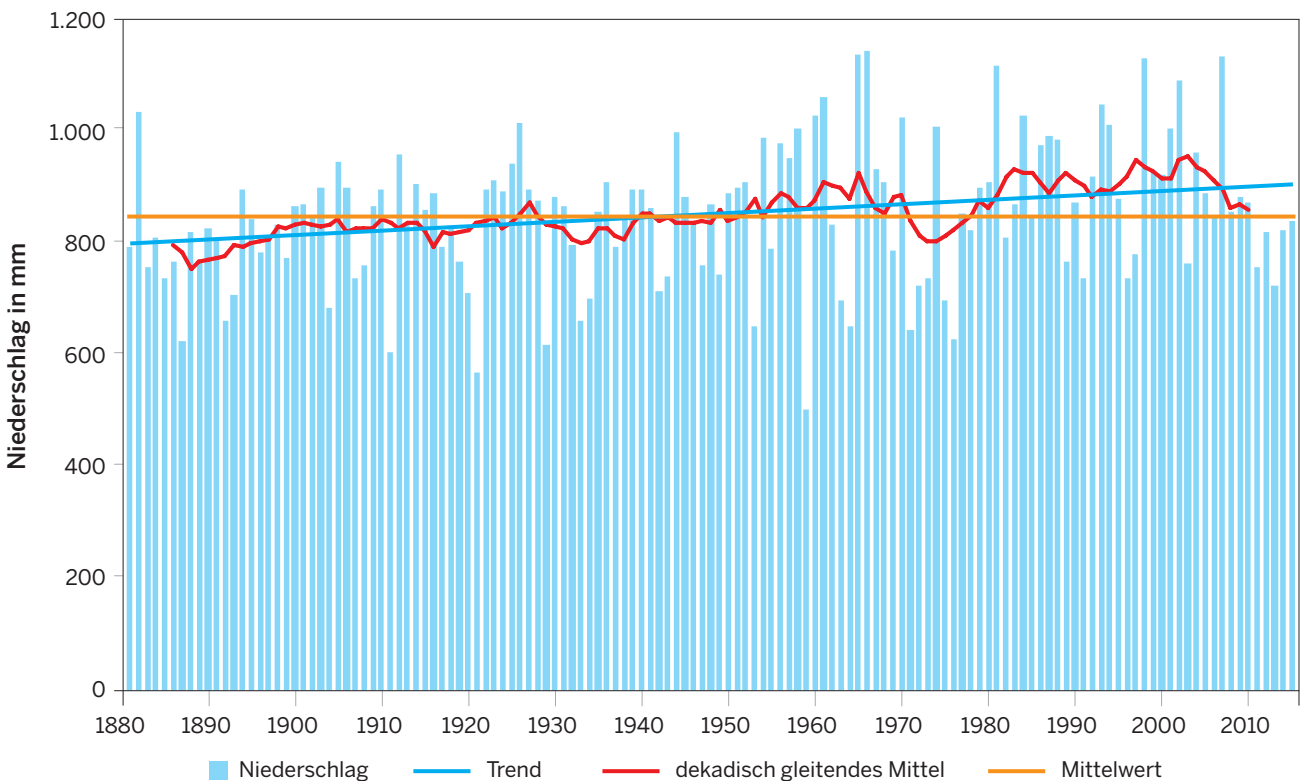
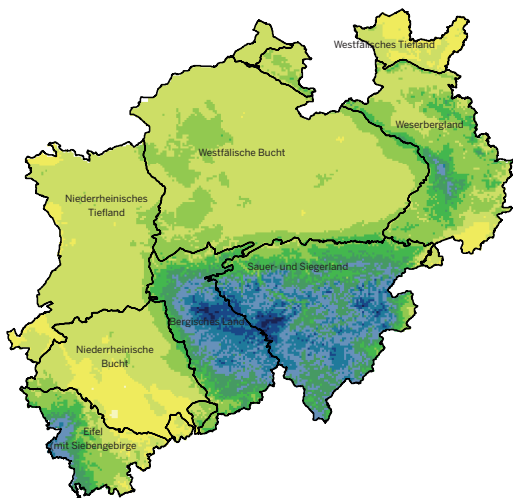
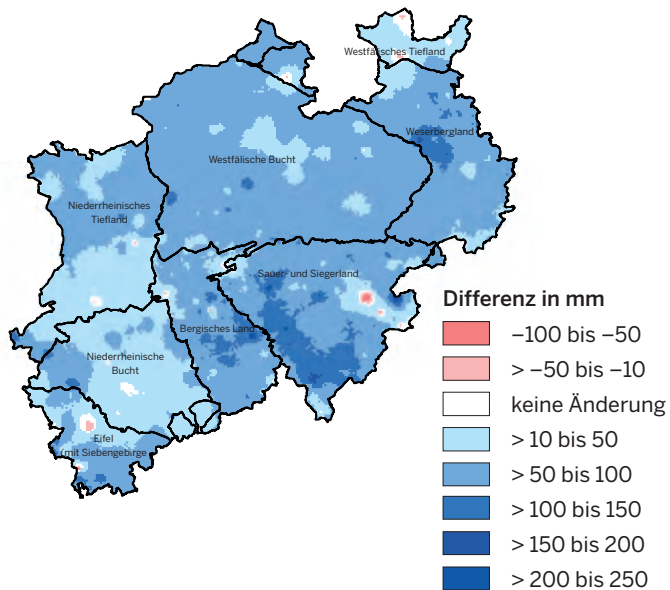


Abbildung 11: Mittlere Jahres-Niederschlagssummen in NRW im Zeitraum 1881–2015 sowie langjähriger Mittelwert, dekadisch gleitendes Mittel und linearer Trend (Datenquelle: DWD)

Mittlerer Jahresniederschlag 1951–1980



Änderung des mittleren Jahresniederschlags



Mittlerer Jahresniederschlag 1981–2010

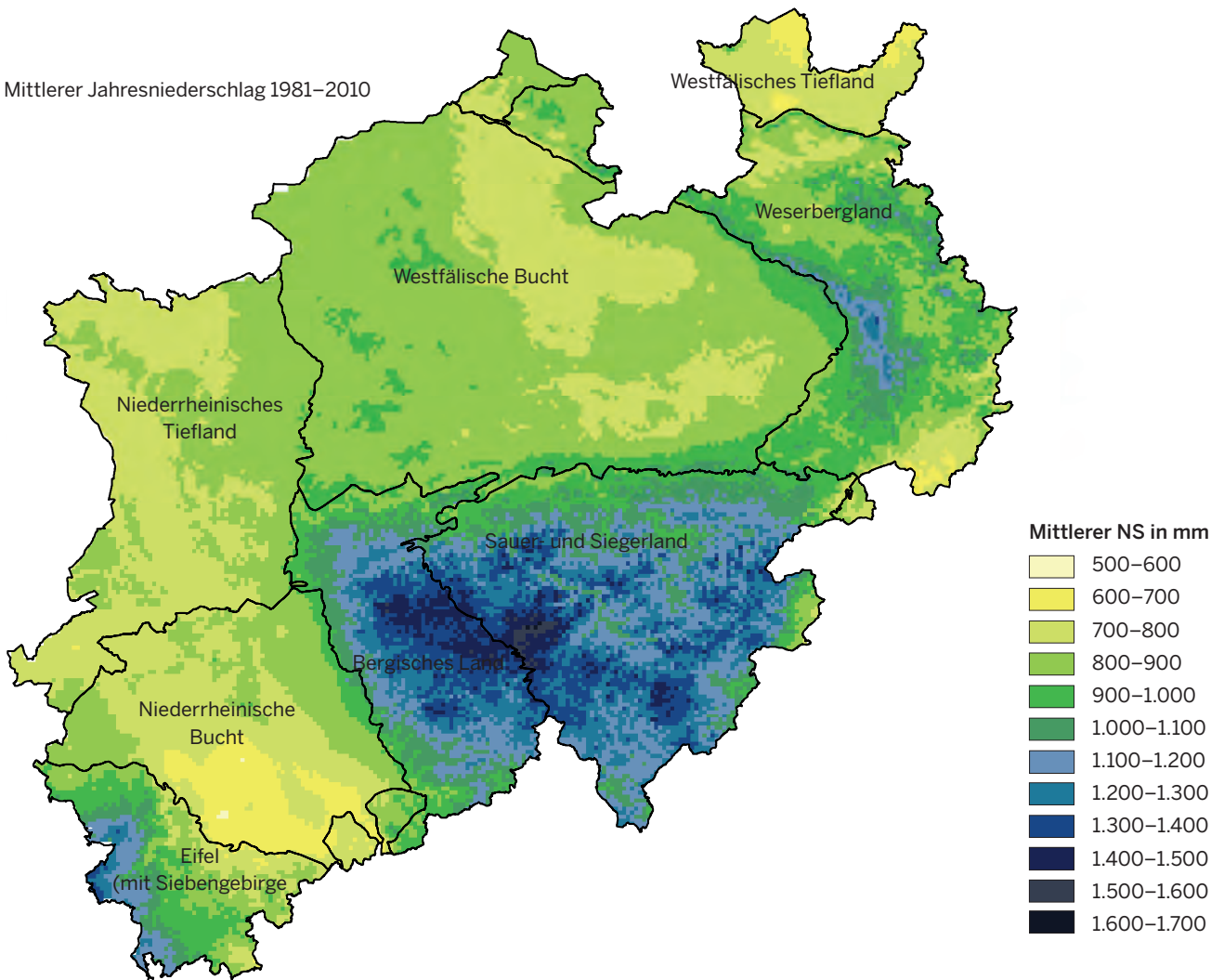


Abbildung 12: Vergleich der mittleren Jahresniederschläge in NRW für die KNP 1951–1980 und 1981–2010 (Datenquelle: DWD, Karten- grundlage: Geobasis NRW)

en sich die Luftmassen häufig an den (Süd-)Westhängen der Gebirge und regnen sich dort ab. An den Ostseiten der Gebirge ist es dementsprechend trockener.

Die Tieflagen NRWs sind in der Klimanormalperiode 1981 bis 2010 durch Niederschläge in der Größenordnung zwischen 600 und 900 mm gekennzeichnet. Die regenreichsten Regionen mit bis zu 1700 mm finden sich im Bergischen Land, im Sauer- und Siegerland und in der Eifel. Dabei tritt der Luv-Effekt besonders deutlich im Bergischen Land auf.

Ebenfalls in Abbildung 12 ist beim Vergleich der beiden Klimanormalperioden zu erkennen, dass sich die mittleren Jahresniederschläge in der Klimanormalperiode 1981 bis 2010 in fast allen Naturräumen NRWs im Vergleich zum Zeitraum 1951 bis 1980 erhöht haben. Der aus der Karte errechnete Mittelwert für NRW beträgt 857 mm (1951 bis 1980) und liegt damit 61 mm unter dem Wert der aktuellen Klimanormalperiode 1981 bis 2010 (918 mm). In einzelnen Mittelgebirgsregionen kann die Zunahme aber um die 200 mm erreichen.

Beim Vergleich dieser beiden Klimanormalperioden muss jedoch wiederum die sehr große Variabilität des Niederschlags berücksichtigt werden: seit Beginn der Messungen 1881 lagen sowohl von den 20 regenärmsten als auch von den 20 regenreichsten Jahren jeweils acht

im Zeitraum 1951 bis 1980. Im Zeitraum 1981 bis 2010 hingegen traten neun der 20 regenreichsten, aber keines der regenärmsten Jahre auf (Abbildung 13).

Bei Betrachtung der Jahreszeiten haben vor allem die Winterniederschläge mit etwa 60 mm um fast 30 Prozent über den gesamten Messzeitraum (1881 bis 2015) zugenommen. Dieser Trend ist nach Mann-Kendall hochsignifikant. Im Herbst und im Frühjahr kann ebenfalls eine Zunahme von jeweils knapp unter 30 mm oder 15 Prozent registriert werden, jedoch ist der Trend nur im Frühjahr signifikant (Tabelle 2 und Abbildung 14).

In Abbildung 14 ist außerdem zu erkennen, dass die 30-jährigen Mittel der Jahreszeiten für Frühling, Herbst und Winter ebenfalls eine Zunahme der Niederschlagssummen zeigen. Der Sommer hingegen war in fast allen 30-jährigen Klimanormalperioden der Messzeitreihe die niederschlagsreichste Jahreszeit und zeigt keinen eindeutigen Veränderungstrend. Dies führt dazu, dass sich die Niederschläge der Jahreszeiten einander angenähert haben. So liegen die 30-jährigen Mittel der Herbst- und Winterniederschläge in der aktuellen Klimanormalperiode 1981 bis 2010 auf einem ähnlich hohen Niveau wie die Sommerniederschläge (Abbildung 14, Tabelle 2). Diese jahreszeitliche Verschiebung der Niederschläge in NRW kann eine Folge des Klimawandels sein.

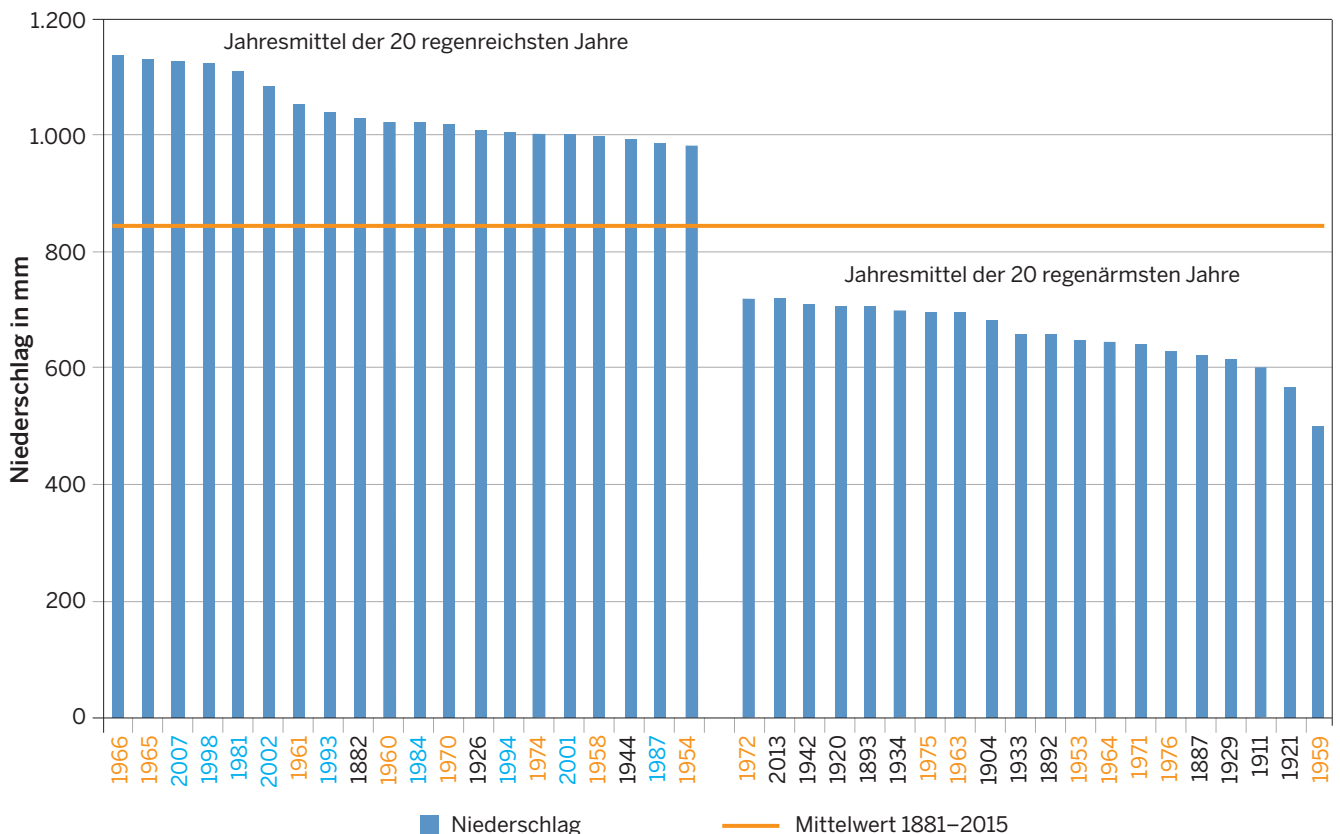


Abbildung 13: Vergleich der jeweils 20 regenreichsten und regenärmsten Jahre in NRW seit Beginn der Messungen 1881. Jahre in der KNP 1951–1980 wurden in der Achsenbeschriftung orange, Jahre in 1981–2010 blau gekennzeichnet. Die übrigen Jahre sind schwarz dargestellt (Datenquelle: DWD).

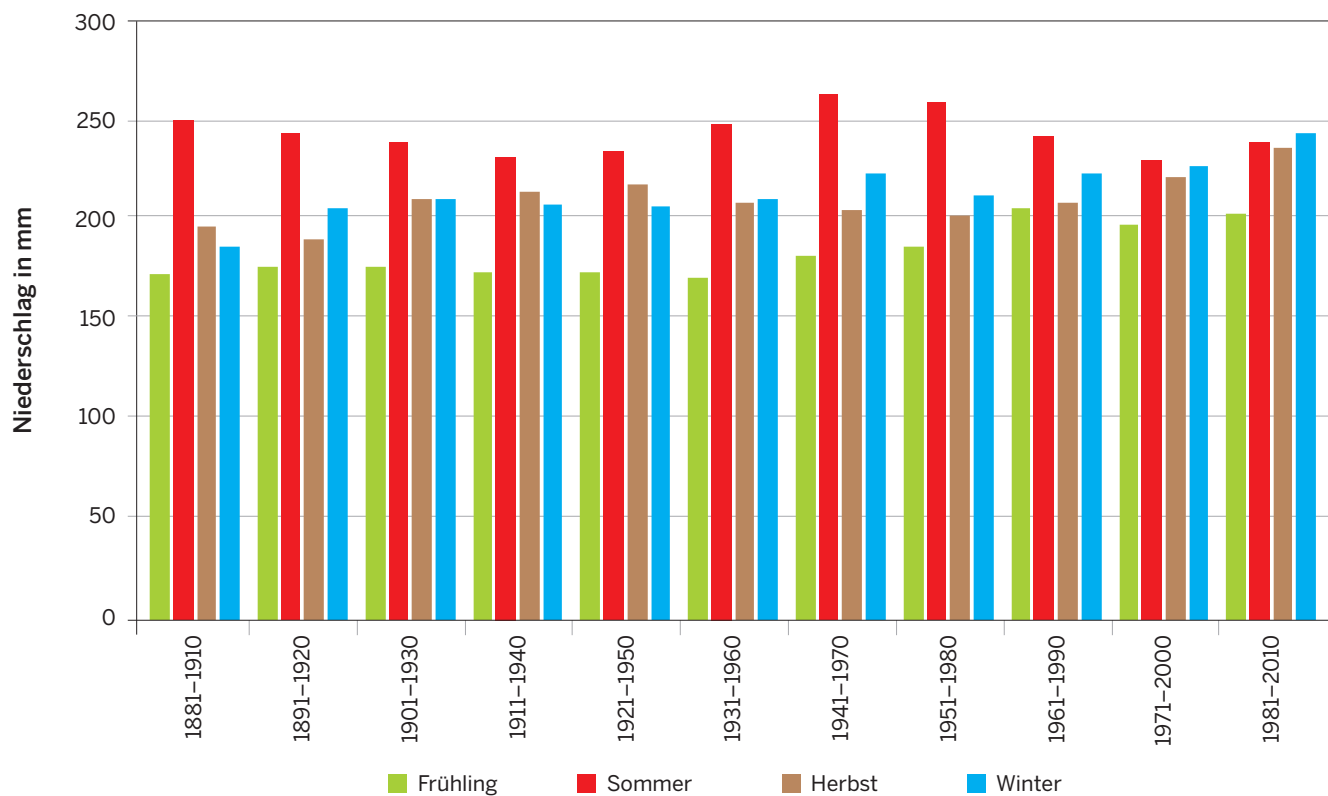


Abbildung 14: Niederschlagsmittelwerte der vier Jahreszeiten aller KNP des Messzeitraums von 1881–2015 (Datenquelle: DWD)

2.4 Kenntage Niederschlag

Für den Niederschlag können analog zur Lufttemperatur Kenntage mit Über- beziehungsweise Unterschreitung bestimmter Niederschlagssummen definiert werden. Im Folgenden werden Trockene Tage sowie Starkniederschlagstage betrachtet. Als Trockener Tag wird ein Tag mit einer Niederschlagssumme von maximal 0,1 mm bezeichnet (DIETZER et al. 2001, LANUV 2010, AUQA_PLAN et al. 2010). Die Starkniederschlagstage werden in drei unterschiedliche Stufen eingeteilt: diese liegen bei einer täglichen Niederschlagssumme von über 10 mm, über 20 mm sowie über 30 mm (vgl. GERICS, LANUV 2010, AUQA_PLAN et al. 2010).

Extremwetterereignisse wie Dürren und Starkniederschläge gehören zu den Wetterextremen, die möglicherweise als Folge des Klimawandels verstärkt oder häufiger auftreten können. Dies ist beispielsweise darauf zurückzuführen, dass die steigenden Temperaturen die Verdunstung verstärken, wodurch sich der Wasserkreislauf sowie die Niederschlagsverhältnisse und -muster verändern können. Die Niederschlagskennttage sollen daher als neue Indikatoren in das Klimafolgenmonitoring aufgenommen und jährlich aktualisiert werden (www.klimafolgenmonitoring.nrw.de). Sie ergänzen den bis dato geführten Klimafolgenindikator „Niederschlagsextreme“, der im Rahmen des Projektes EXUS (AUQA_PLAN et al. 2010) entwickelt wurde, aber aufgrund seiner Komplexität nur alle zehn Jahre aktualisiert werden kann.

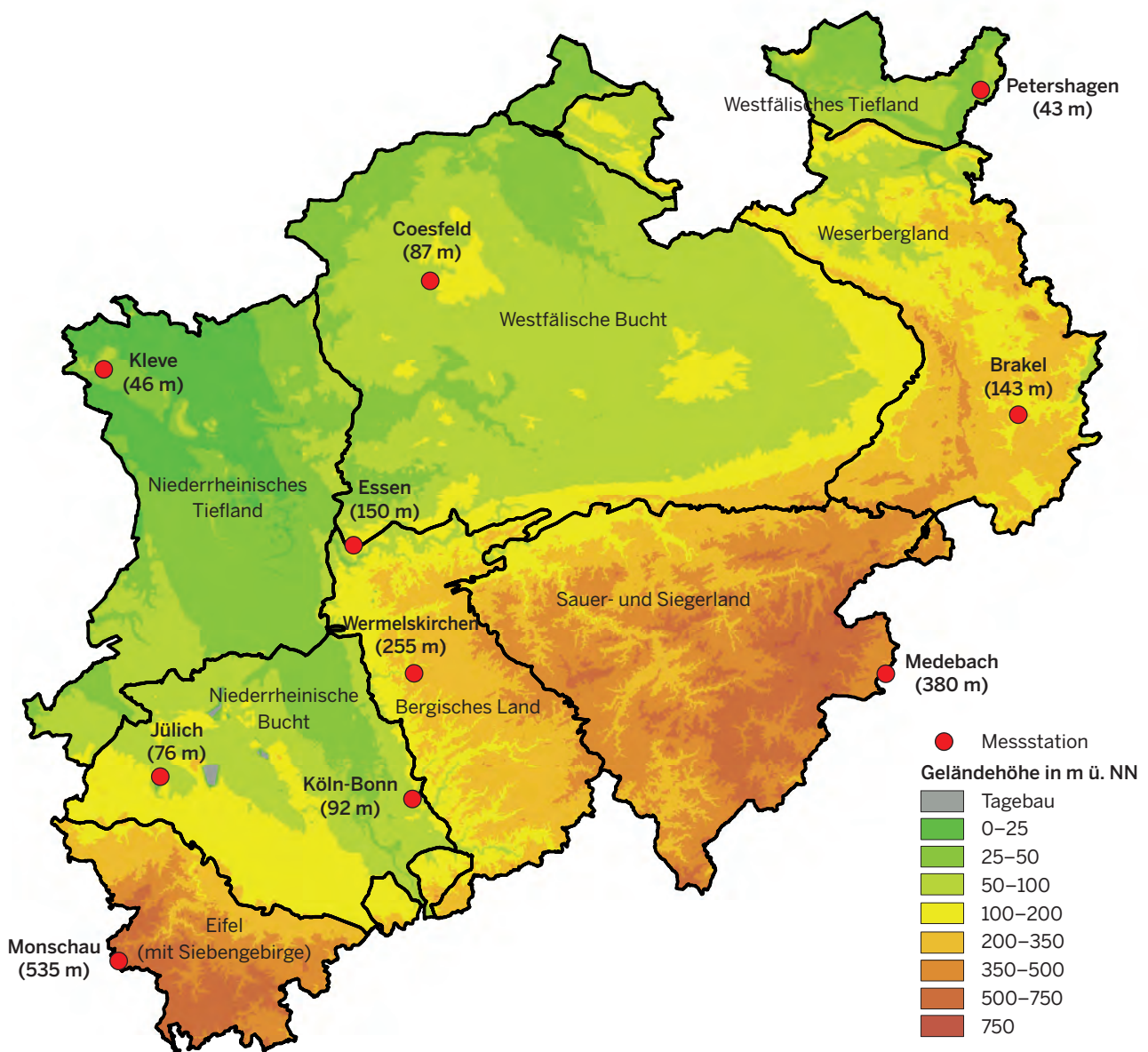


Abbildung 15: Stationsübersicht zur Auswertung der Niederschlagskennttage in NRW (Kartengrundlage: Geobasis NRW)

Die Auswertung der Niederschlagskenntage erfolgt soweit möglich auf Basis von Flächenkarten (siehe Kapitel 1.2), aus denen Gebietsmittelwerte für NRW berechnet werden. Diese stehen für die Starkniederschlagskenntage zur Verfügung. Da für die Trockenentage keine Flächenkarten vorhanden sind, wurden zusätzlich für alle Niederschlagskenntage zehn Wetterstationen exemplarisch ausgewertet. Diese sind auf alle Großlandschaftstypen des Landes verteilt (Abbildung 15), so dass sich ein differenziertes Bild auf unterschiedlichen Höhengniveaus und in verschiedenen Landschaftstypen ergibt. Somit kann für verschiedene Beispielstationen geprüft werden, ob es Unterschiede in der Verteilung der Niederschlagskenntagen gibt, da sich die Topographie stark auf die Jahresniederschlagssumme auswirkt (siehe Kapitel 2.3, Abbildung 12).

2.4.1 Trockene Tage

Ein Niederschlagstag ist ein Tag mit einer 24-stündigen gemessenen Niederschlagssumme $\geq 0,1$ mm (DWD Wetterlexikon). Im Umkehrschluss wird hier ein Trockener

Tag als Tag ohne oder mit nur sehr geringem Niederschlag bis maximal 0,1 mm definiert (LANUV 2010, AUQA_PLAN et al. 2010). Eine Reihe von Trockenentagen über einen längeren Zeitraum hinweg kann Auswirkungen auf die Wasserverfügbarkeit haben: beispielsweise trocknet der Boden aus, Pflanzen werden nicht mehr ausreichend mit Wasser versorgt oder Fließgewässer führen Niedrigwasser.

In Abbildung 16 wird die mittlere jährliche Anzahl der Trockenentagen als Vergleich der Klimanormalperioden 1951 bis 1980 und 1981 bis 2010 dargestellt. Die Stationen sind von links nach rechts nach aufsteigender Höhe der Messstationen angeordnet. Der Vergleich der Klimanormalperioden zeigt, dass es bei fast allen Stationen Verschiebungen der mittleren Anzahl der Trockenentagen gibt. Dabei geht an sieben der zehn Stationen die mittlere jährliche Anzahl der Trockenentagen zwischen den beiden Zeiträumen tendenziell zurück, an drei Stationen nimmt sie tendenziell zu.

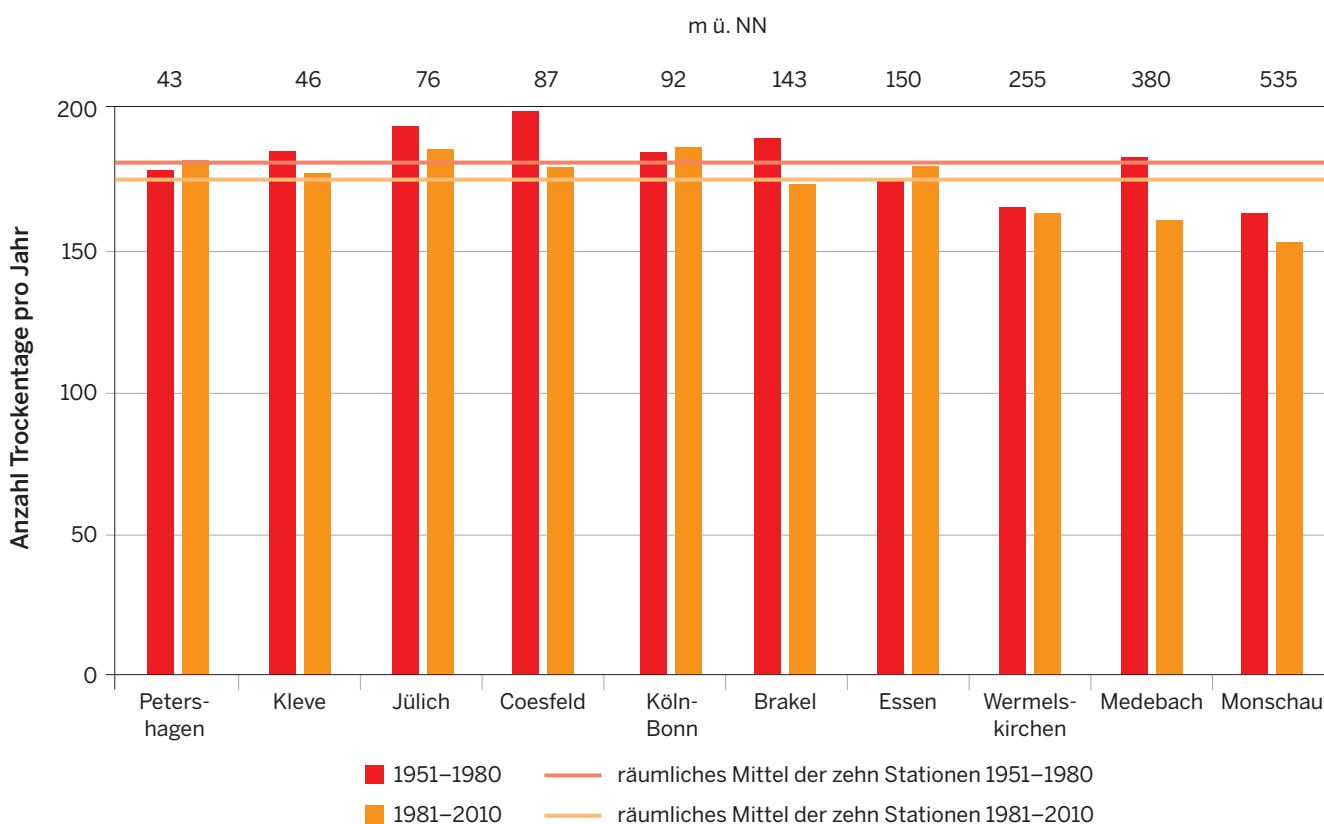


Abbildung 16: Mittlere Anzahl der Trockenentagen an den zehn ausgewählten Messstellen in NRW sowie das räumliche Mittel der zehn Stationen in den KNP 1951-1980 und 1981-2010 (Datenquelle: DWD)

An der Mittelgebirgsstation Monschau (Eifel) traten mit etwa 160 Tagen pro Jahr im Mittel über den Gesamtmeszeitraum (1951 bis 2015) die wenigsten Trockenen Tage auf. An der Station Jülich wurden mit durchschnittlich etwa 191 Tagen pro Jahr über den Gesamtmeszeitraum insgesamt die meisten Trockenen Tage gemessen (hier nicht dargestellt). Somit ist anzunehmen, dass in den niederschlagsreichen Höhenlagen weniger Trockene Tage auftreten als in Bereichen mit weniger Niederschlag, wie den Niederungen oder im Regenschatten der Mittelgebirge. Zwei Zeitreihen zeigen für die Anzahl der Trockenen Tage über den Gesamtmeszeitraum einen signifikanten Trend: Coesfeld und Essen. Da die erstgenannte Station

eine Abnahme der Trockenen Tage, die zweite hingegen eine Zunahme aufweist, kann für NRW keine einheitliche Aussage abgeleitet werden.

Die Anzahl der Trockenen Tage ist fast gleichmäßig über das Jahr verteilt, nur im Winter treten weniger Trockene Tage auf als in den restlichen Jahreszeiten (Abbildung 17). Betrachtet man die Veränderung der Anzahl der Trockenen Tage in den beiden Klimanormalperioden zeigt sich, dass in allen Jahreszeiten – mit Ausnahme des Sommers – tendenziell eine Abnahme der Trockenen Tage stattgefunden hat.

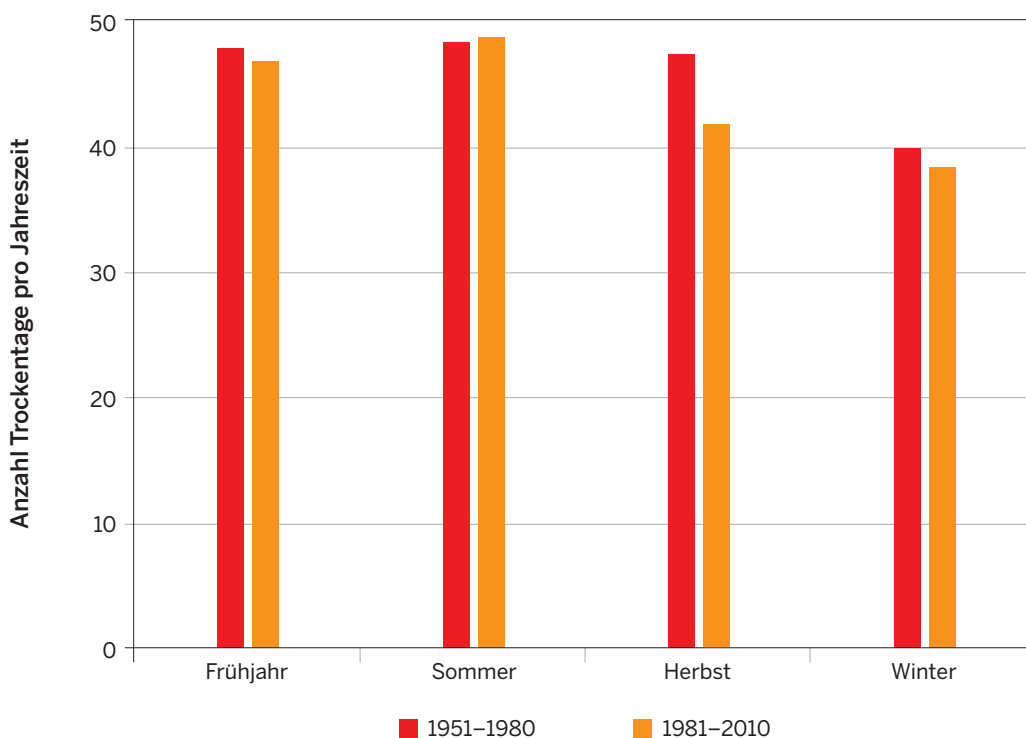


Abbildung 17: Mittlere Anzahl der Trockenen Tage nach Jahreszeiten für die KNP 1951–1980 und 1981–2010 als räumliches Mittel der zehn ausgewählten Messstellen in NRW (Datenquelle: DWD)

2.4.2 Starkniederschlagstage

Tage mit Starkniederschlag weisen einen überdurchschnittlich hohen Niederschlag auf. Fällt eine hohe Regenmenge in einer sehr kurzen Zeit (häufig innerhalb weniger Stunden) in einem räumlich begrenzten Gebiet, kann dies zu schnell ansteigenden Wasserständen bis hin zu Überschwemmungen führen. Auf nicht versiegelten Flächen geht dies häufig mit Bodenerosion einher (s. Kapitel 6.1). Die Starkniederschlagstage werden hier als Tage mit Niederschlagssummen von über 10 mm, 20 mm und 30 mm untersucht (LANUV 2010, AUQA_PLAN et al. 2010).

Die Auswertung erfolgt zunächst, analog zu den Temperaturkenntagen, als räumlicher Mittelwert für NRW. Kleinräumig können sich die Niederschlagswerte in NRW jedoch stark unterscheiden. Ein Überschreiten von 30 mm Tagesniederschlag ist, über NRW gemittelt, sehr selten und tritt an maximal drei Tagen pro Jahr auf (siehe Abbildung 18). Mit zwei bis zehn Tagen pro Jahr wird die 20 mm-Tagesniederschlagsmarke im Zeitraum 1951 bis 2015 etwas häufiger überschritten. Mehr als 10 mm im Mittel pro Tag regnet es hingegen deutlich öfter. Die Anzahl der Tage, die diese Niederschlagsschwelle überschreitet, variiert jedoch von Jahr zu Jahr stark (zwischen etwa

zehn und 35 Tagen pro Jahr im Gesamtmeszeitraum). Anhand der Zeitreihe seit 1951 kann im Mittel für NRW jedoch für keine der Niederschlags-Intensitätsstufen ein statistisch signifikanter Trend abgeleitet werden. Vergleicht man die Mittelwerte für verschiedene Klimanormalperioden, so kann man allerdings sehen, dass tendenziell eine leichte Zunahme der Starkniederschlagstage aller Intensitäten stattgefunden hat (Tabelle 2). Eine Aussage zur Veränderung der Starkniederschlagsereignisse auf der lokalen Ebene lässt sich aus den Auswertungen der Mittelwerte für NRW jedoch nicht ableiten.

Das Auftreten von Starkniederschlagstagen in NRW korreliert vor allem bei den Tagen > 10 mm mit der räumlichen Verteilung der Jahresniederschlagssumme (Abbildung 19 und Abbildung 12): Eine besondere Häufung dieser Kenn-tage ist vor allem für die Mittelgebirgsregionen nachzuweisen. Im Vergleich der beiden Klimanormalperioden 1951 bis 1980 und 1981 bis 2010 fallen in allen Regionen leichte Zunahmen der Auftrittshäufigkeit auf (Abbildung 19).

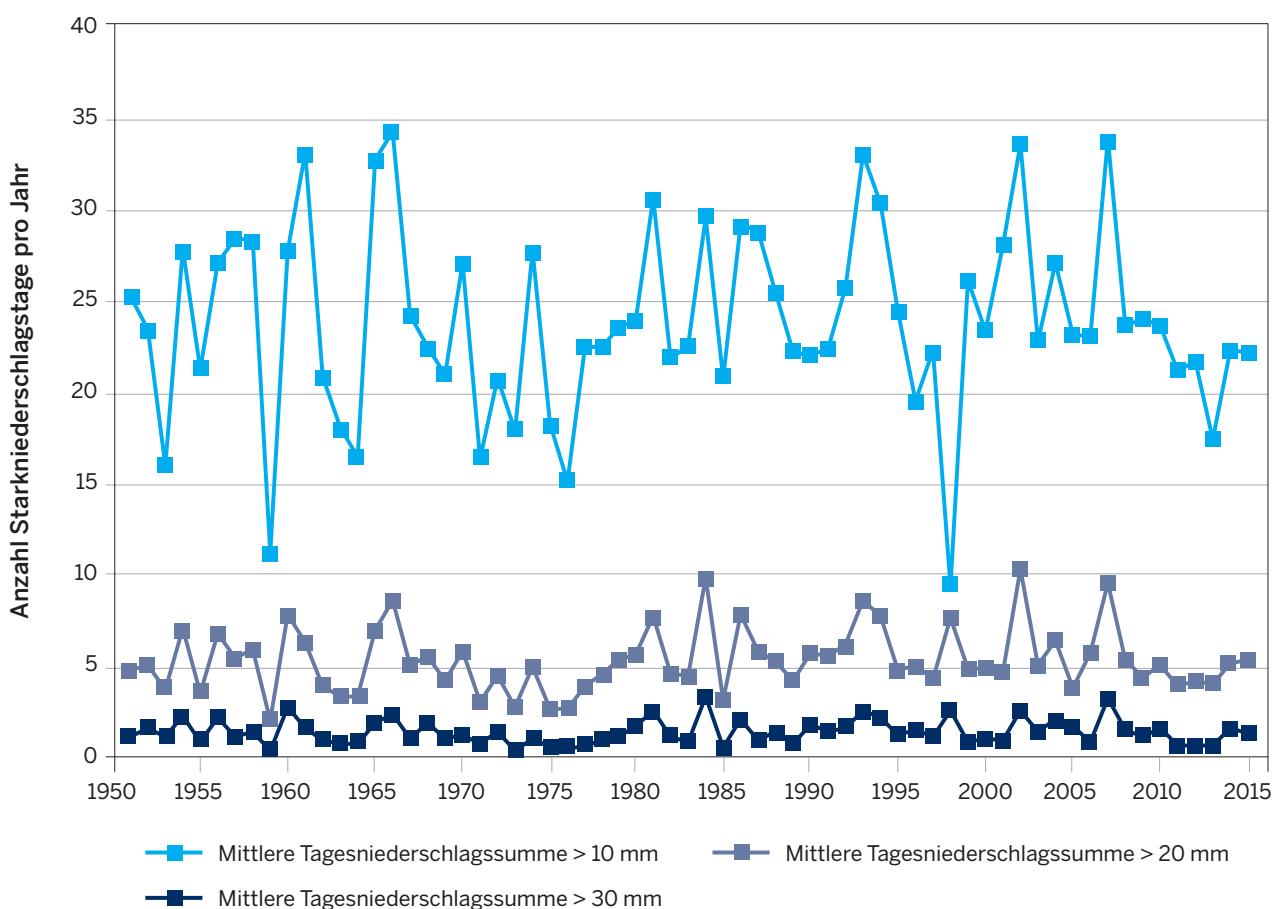
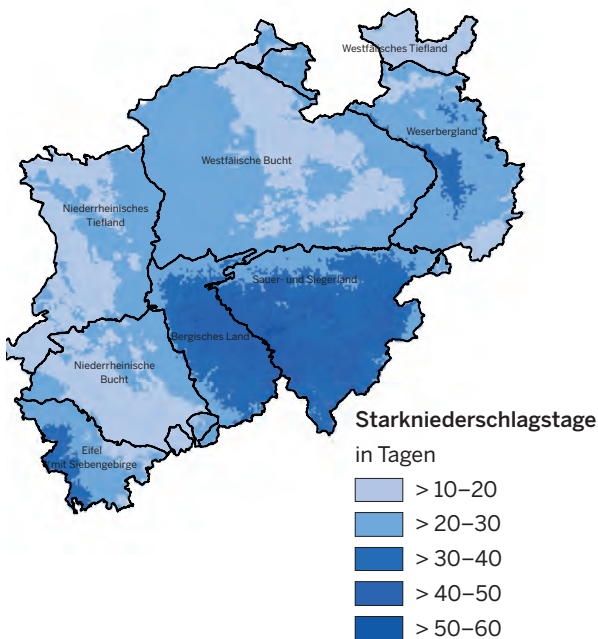


Abbildung 18: Anzahl der Tage mit Starkniederschlag (> 10 mm, > 20 mm und > 30 mm) ab 1951 als Mittel über NRW (Datenquelle: DWD)

Starkniederschlagstage > 10 mm 1981–2010



Veränderung der Starkniederschlagstage > 10 mm

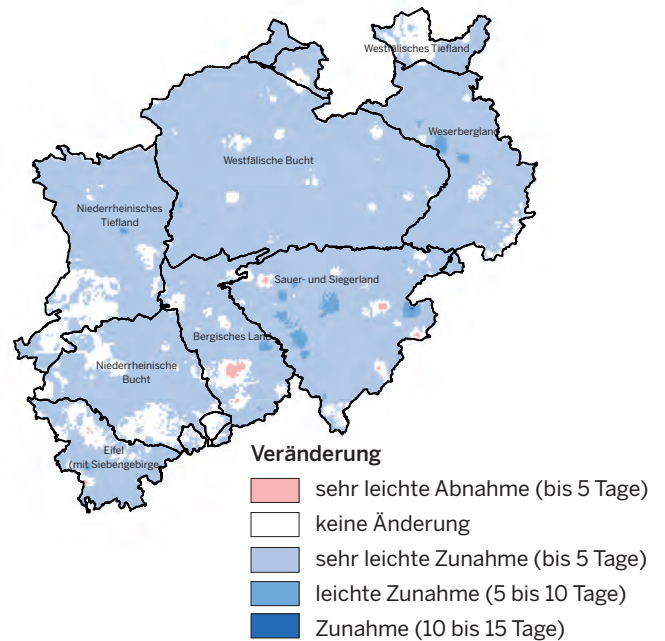
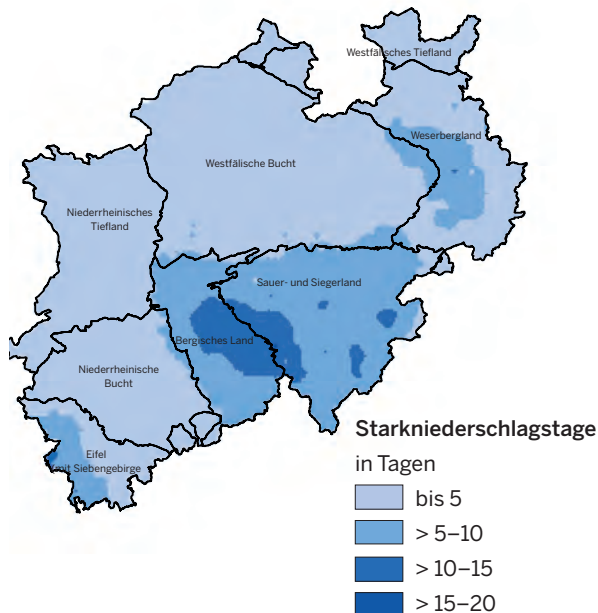


Abbildung 19: Starkniederschlagstage > 10 mm in NRW als Mittel über die KNP 1981–2010 sowie die Änderung im Vergleich zur KNP 1951–1980 (Datenquelle: DWD, Kartengrundlage: Geobasis NRW)

Starkniederschlagstage > 20 mm 1981–2010



Veränderung der Starkniederschlagstage > 20 mm

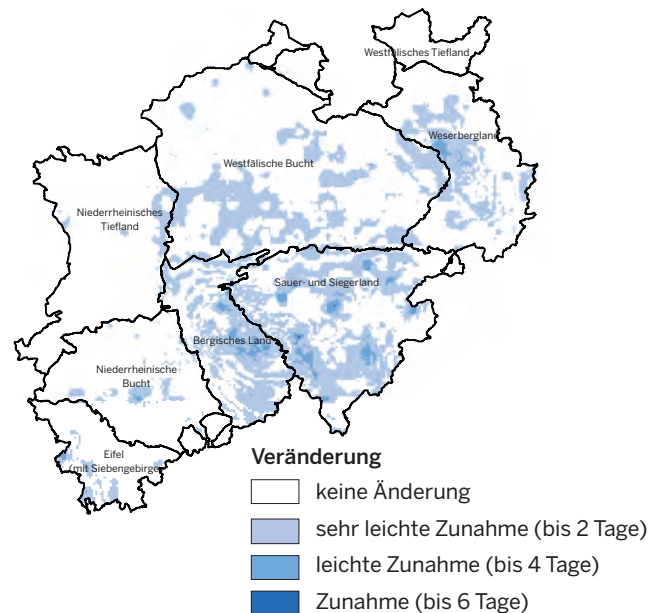


Abbildung 20: Starkniederschlagstage > 20 mm in NRW als Mittel über die KNP 1981–2010 sowie die Änderung im Vergleich zur KNP 1951–1980 (Datenquelle: DWD, Kartengrundlage: Geobasis NRW)

Auch bei den Starkniederschlagstagen > 20 mm sowie > 30 mm Tagessumme hängt die räumliche Verteilung in NRW mit der Jahresniederschlagssumme zusammen, ist insgesamt jedoch nicht so stark ausgeprägt, wie bei den Starkniederschlagstagen > 10 mm (Abbildung 20 und Abbildung 21). Die Änderung der Anzahl der Starknieder-

schlagstage ist bei diesen Intensitäten ebenfalls nicht so ausgeprägt, wie bei den Starkniederschlägen mit einer Tagesniederschlagssumme > 10 mm. Der Vergleich der beiden Klimanormalperioden 1951 bis 1980 und 1981 bis 2010 zeigt in weiten Teilen NRWs keine Änderung der Auftrittshäufigkeiten.

Starkniederschlagstage > 30 mm 1981–2010

Veränderung der Starkniederschlagstage > 30 mm

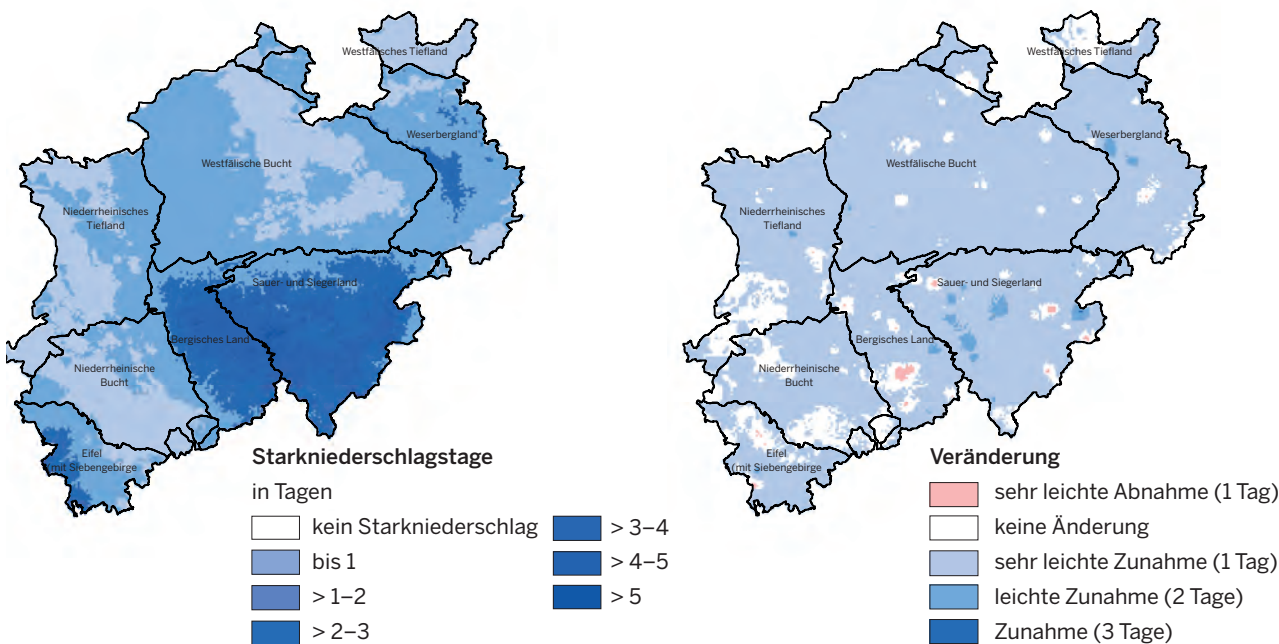


Abbildung 21: Starkniederschlagstage > 30 mm in NRW als Mittel über die KNP 1981–2010 sowie die Änderung im Vergleich zur KNP 1951–1980 (Datenquelle: DWD, Kartengrundlage: Geobasis NRW)

Um die Auswertung der Trockensten Tage mit den Starkniederschlagstagen vergleichen zu können, wurden die Starkniederschlagskenntage ebenfalls an den zehn exemplarischen Stationen betrachtet (Abbildung 15). Auch hier ergab sich für alle Intensitätsstufen ein deutlicher Einfluss der Topographie und der Lage im Luv bzw. Lee von Gebirgen. So treten die meisten Starkniederschlagstage an der Station Wermelskirchen im Luv des Sauerlands

auf. Monschau als Mittelgebirgsstation erreicht in allen Starkniederschlagsklassen eine ähnliche Anzahl an Tagen wie Wermelskirchen. Die Station Medebach hingegen weist für ihre Höhenlage eine sehr geringe Anzahl an Starkniederschlagstagen auf. Dies ist auf ihre Lage im Lee des Sauerlands zurückzuführen (Abbildung 22 bis Abbildung 24). Somit wird wiederum ein hoher Zusammenhang mit den Jahresniederschlägen bestätigt.

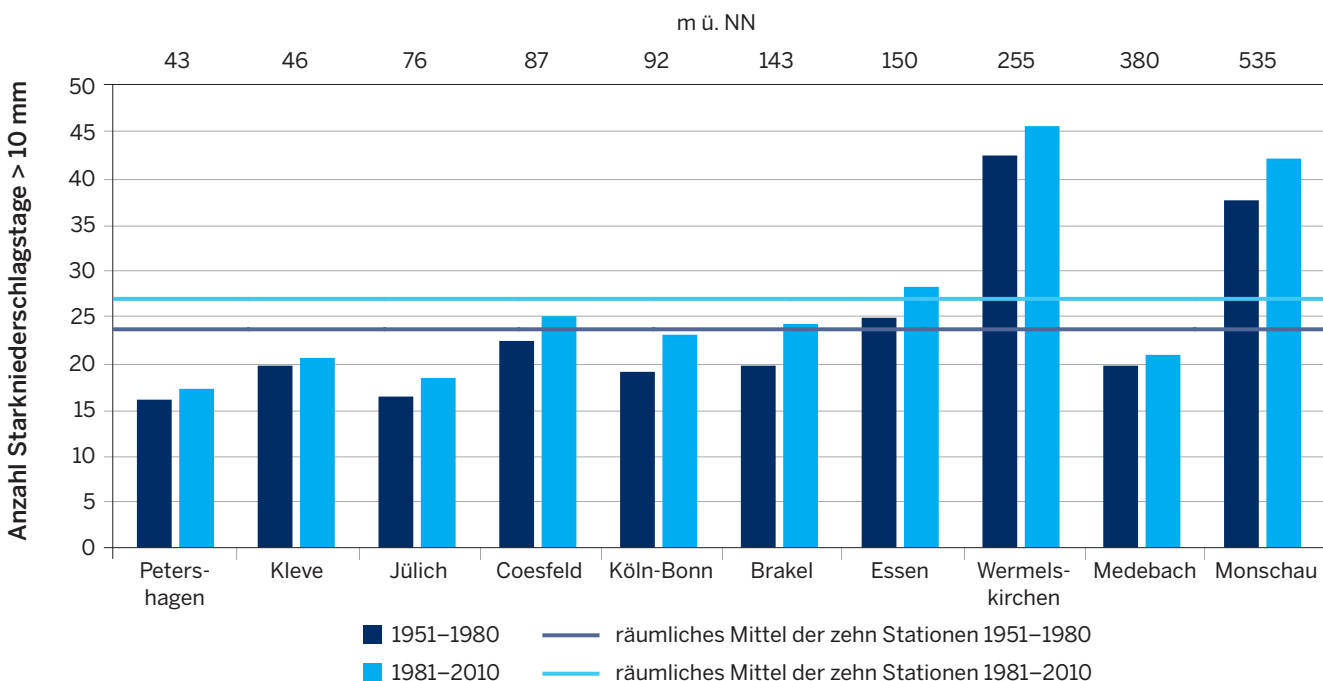


Abbildung 22: Mittlere Anzahl der Starkniederschlagstage > 10 mm an den zehn ausgewählten Messstellen in NRW sowie das räumliche Mittel der zehn Stationen für die KNP 1951–1980 und 1981–2010 (Datenquelle: DWD)

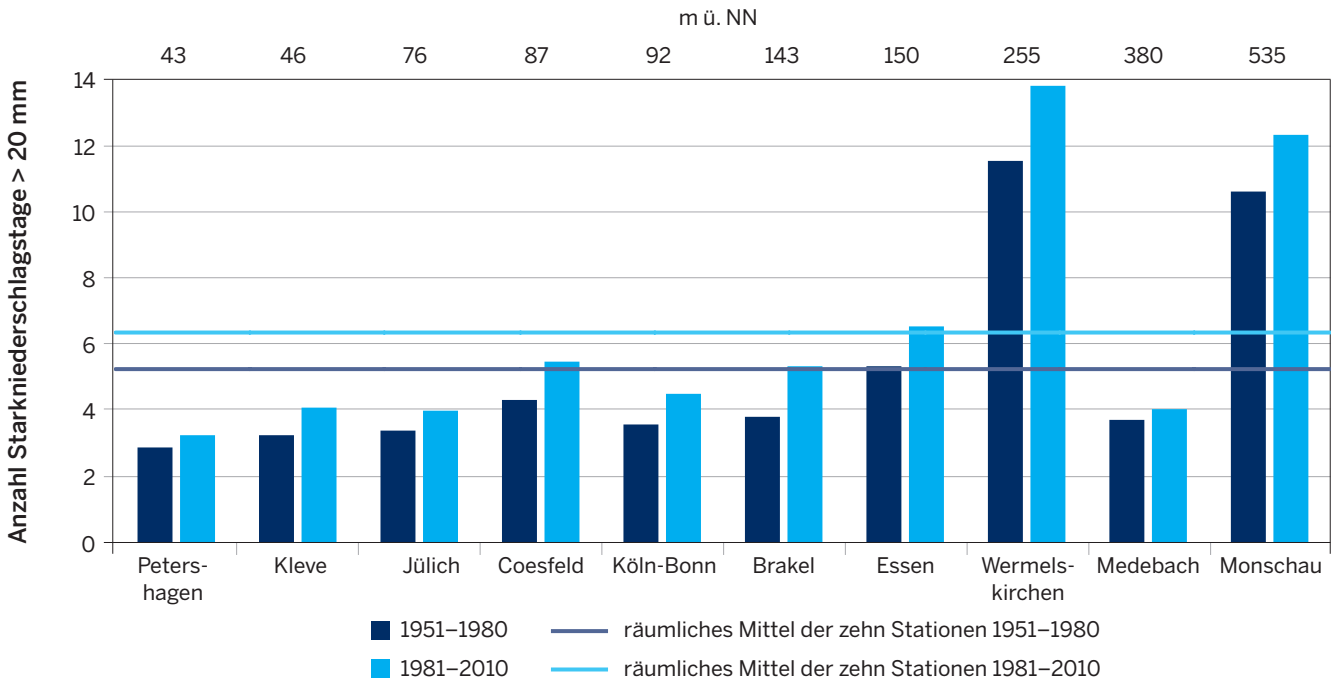


Abbildung 23: Mittlere Anzahl der Starkniederschlagstage > 20 mm an den zehn ausgewählten Messstellen in NRW sowie das räumliche Mittel der zehn Stationen für die KNP 1951–1980 und 1981–2010 (Datenquelle: DWD)

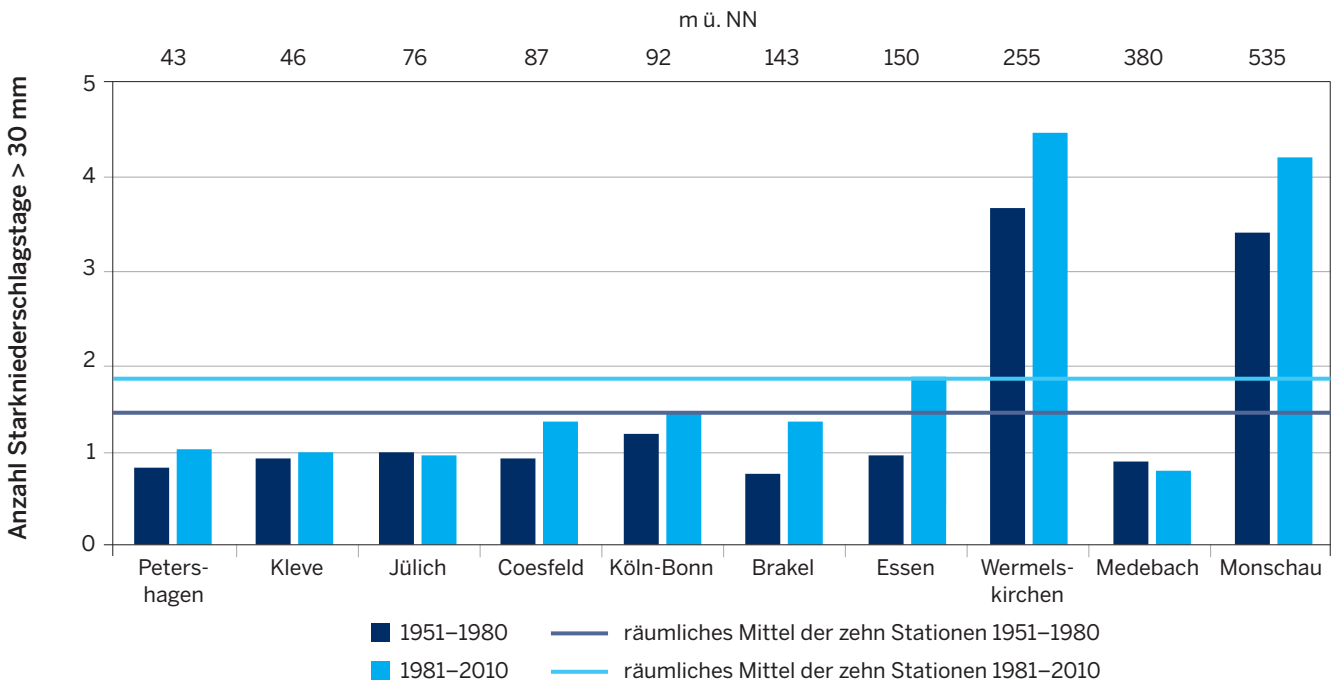


Abbildung 24: Mittlere Anzahl der Starkniederschlagstage > 30 mm an den zehn ausgewählten Messstellen in NRW sowie das räumliche Mittel der zehn Stationen für die KNP 1951–1980 und 1981–2010 (Datenquelle: DWD)

Für das Überschreiten der Niederschlagstagesummen von 10 mm und 20 mm zeigen alle Stationen tendenziell eine Zunahme im Zeitraum 1981 bis 2010 gegenüber dem Zeitraum 1951 bis 1980 (Abbildung 22 und Abbildung 23). Diese sind allerdings statistisch nicht signifikant. Für die Intensität 30 mm Tagessumme weisen die Stationen Kleve und Jülich kaum eine Veränderung auf, die Station Medebach sogar tendenziell eine Abnahme, der Rest der Stationen eine Zunahme (Abbildung 24). Diese Veränderungen sind ebenfalls statistisch nicht signifikant. Insgesamt ergibt sich so für das Stationsmittel der Intensität von 30 mm Tagesniederschlagssumme eine nicht signifikante zunehmende Tendenz der Anzahl der Starkregentage.

Die drei Starkniederschlagsintensitätsstufen sind in den Jahreszeiten sowie im Vergleich der beiden Klimanormalperioden alle ähnlich verteilt. Im Frühjahr treten am wenigsten Starkniederschlagstage auf, im Sommer die meisten (Abbildung 25). Dies spiegelt den Jahresgang der Niederschlagssumme wieder (siehe Kapitel 2.3). Für eine jahreszeitliche Veränderung des Auftretens von Starkniederschlagstagen sprechen die leichte Zunahme der Anzahl der Tage im Frühjahr, Herbst und Winter sowie eine leichte Abnahme im Sommer.

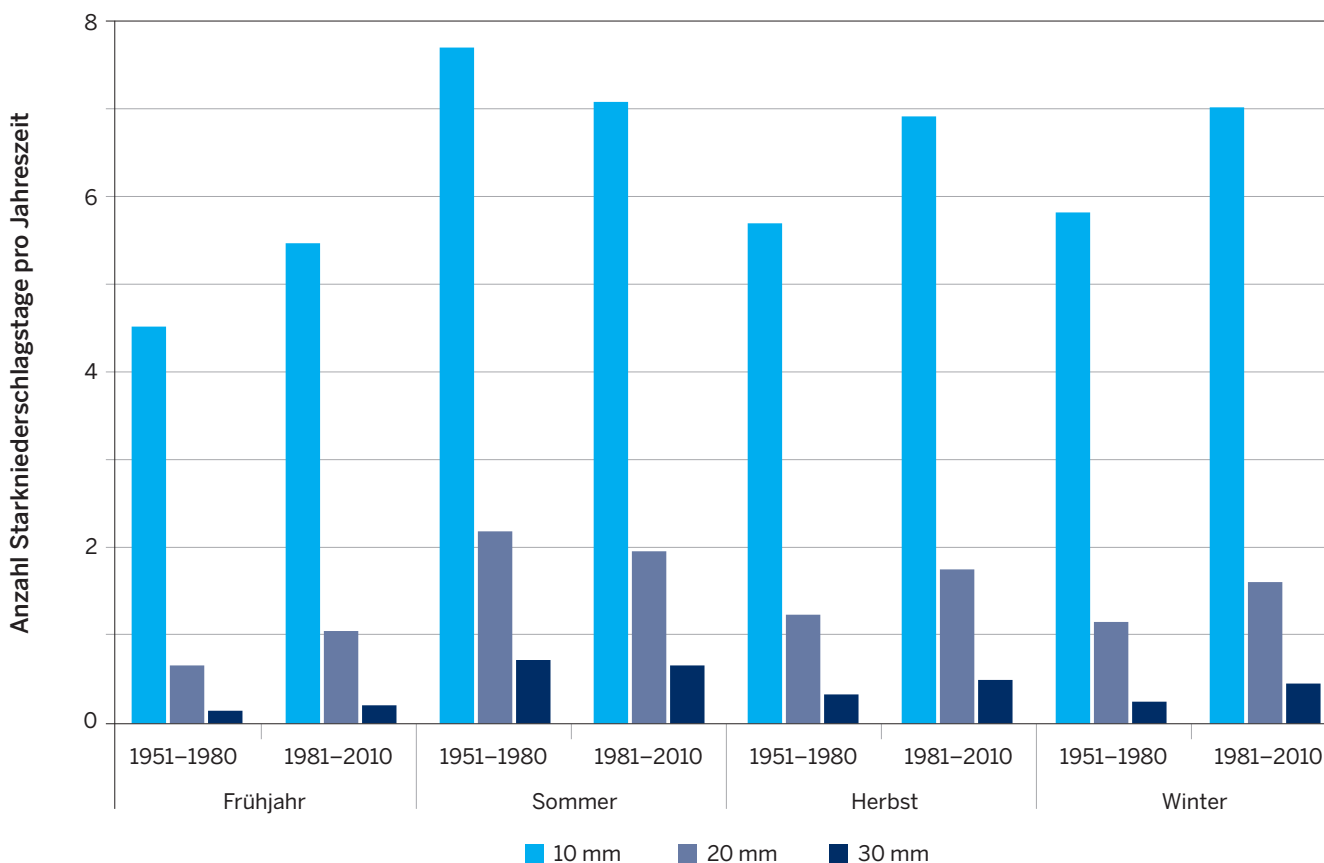


Abbildung 25: Mittlere Anzahl der Starkniederschlagstage der Intensitäten > 10 mm, > 20 mm und > 30 mm in den vier Jahreszeiten als räumliches Mittel der zehn Stationen für die KNP 1951–1980 und 1981–2010 (Datenquelle: DWD)

2.5 Schnee

Das Auftreten von Schneetagen beziehungsweise die Schneehöhe hängen sowohl von der Temperatur als auch von der Niederschlagsmenge ab. Der im Zuge des Klimawandels zu erwartende Anstieg der Temperatur kann zu einem Rückgang der Schneehöhe und damit der Anzahl der Schneetage führen. Gleichzeitig können steigende Niederschläge im Winterhalbjahr dieser Entwicklung entgegen wirken.

Definiert werden die Schneetage als Tage mit einer geschlossenen Schneedecke von über 10 cm Mächtigkeit. Dies ist ein geeignetes Maß, um die Dauer der Schneebedeckung zu beschreiben. Die längste Zeitreihe liegt an der in NRW höchst gelegenen Station Kahler Asten (839 m ü. NN) vor. Dort werden die Schneetage seit 1955 erhoben. Die Entwicklung der Schneetage dieser Beispielstation wird seit Bestehen des Klimafolgenmonitorings als Indikator im Umweltbereich „Klima und Atmosphäre“ geführt. Die jährlichen Aktualisierungen können unter www.klimafolgenmonitoring.nrw.de eingesehen werden.

Die Zeitreihe in Abbildung 26 bildet die Anzahl der Schneetage pro Jahr seit Beginn der Messungen 1955 ab. Es ist zu sehen, dass die Schneetage von 1955 bis 2015 um fast 25 Tage rückläufig sind (Differenz zwischen Anfang und Ende der Trendlinie). Diese Abnahme ist nach dem Mann-Kendall-Test statistisch sehr signifikant.

Während bis in die 1980er Jahre noch vereinzelt deutlich über 120 Schneetage im Jahr erreicht wurden, konnten in den vergangenen 20 Jahren nur noch wenige Überschreitungen der 100-Tage-Marke pro Jahr verzeichnet werden. Nur 2010 wurden noch einmal über 120 Schneetage registriert. 1989 war mit 22 Tagen das Jahr mit den wenigsten Schneetagen. Es folgen 2014 mit 30 und 1972 mit 37 Schneetagen. Die meisten Schneetage wurden 1969 (145 Tage), 1980 (144) sowie 1979 und 1973 (jeweils 136) gezählt.

Im langjährigen Mittel (1955 bis 2015) liegt die Anzahl der Schneetage an der Station Kahler Asten bei etwa 89 (Abbildung 26). Die Mittelwerte der einzelnen Klimanormalperioden sind über den gesamten Messzeitraum gefallen. Aufgrund der wenigen Klimanormalperioden im Messzeitraum konnte hier kein Signifikanztest durchgeführt werden.

Das Auftreten von Schneetagen hängt in der Regel – wie die Temperatur – von der Geländehöhe ab: In den Tieflagen NRWs traten zwischen 1981 und 2010 weniger als 20 Schneetage im Jahr auf, in den Mittelgebirgsregionen liegt ihre Anzahl zwischen 20 und 100 Tagen. Ein Maximum mit über 100 Schneetagen pro Jahr wird rund um den Kahlen Asten gemessen (Abbildung 27).

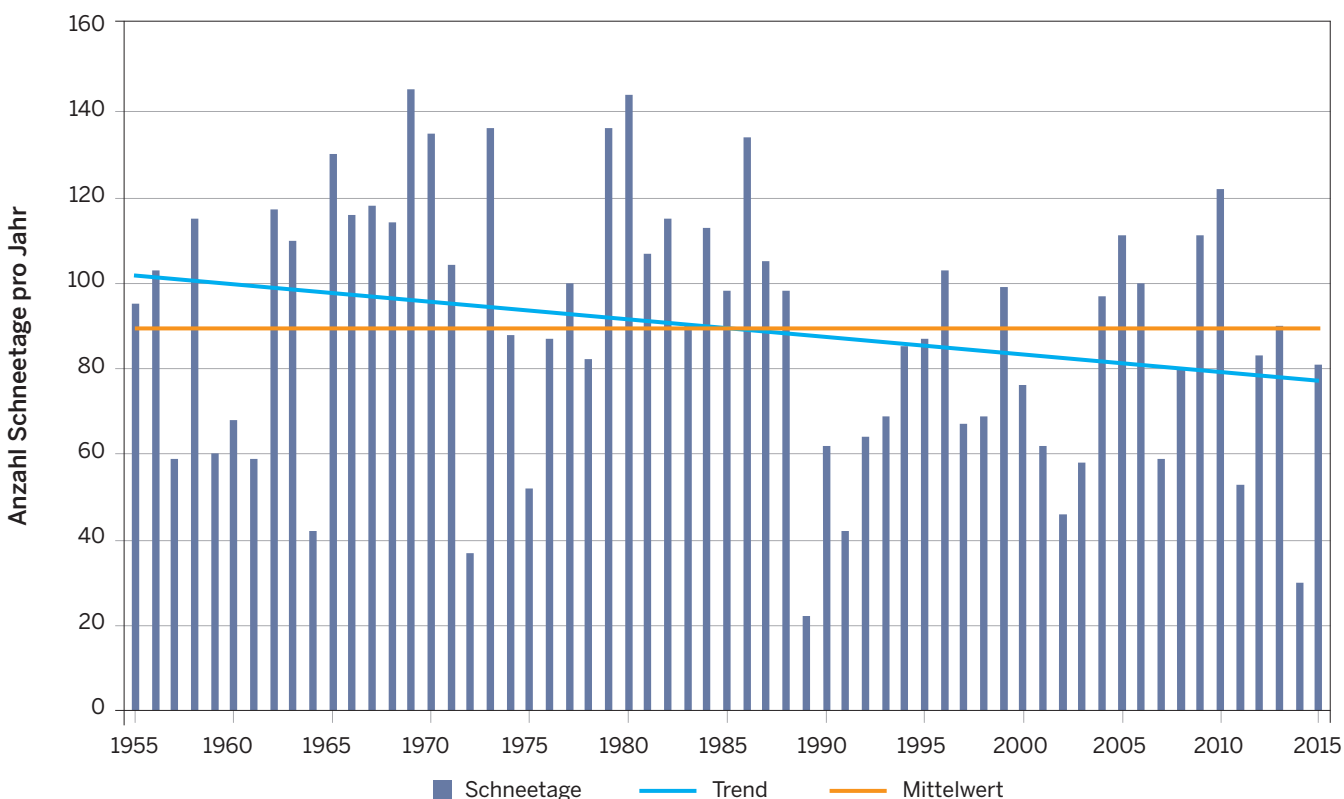
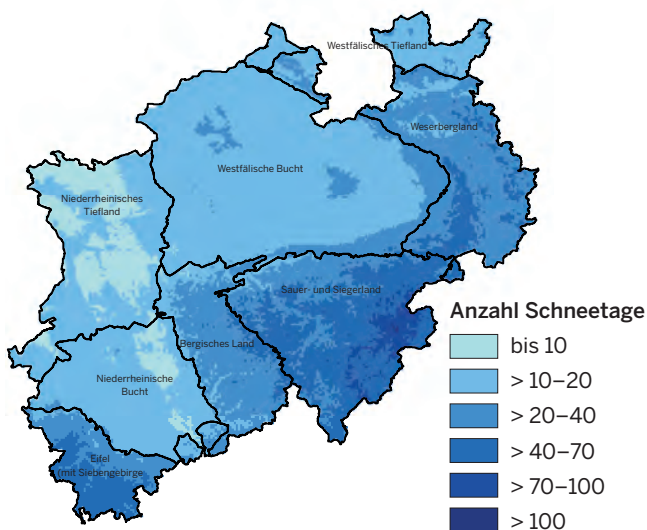


Abbildung 26: Anzahl der Schneetage an der Station Kahler Asten im Zeitraum 1955–2015 (Datenquelle: DWD)

Schneetage pro Jahr 1981–2010



Veränderung der Schneetage pro Jahr

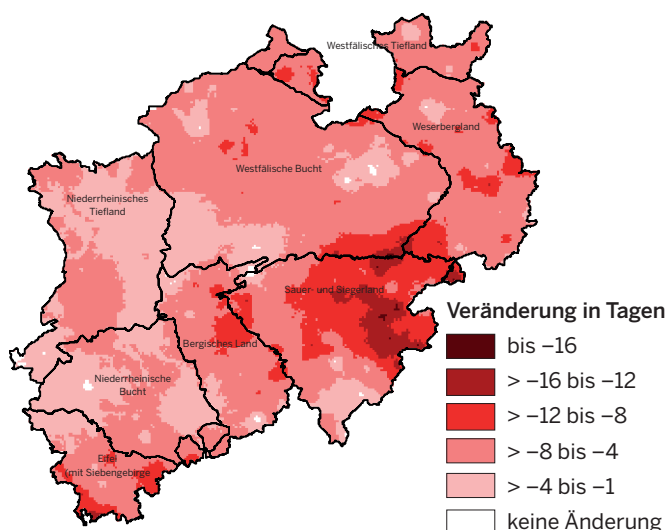


Abbildung 27: Anzahl der Schneetage in NRW in der KNP 1981–2010 sowie Veränderung relativ zur KNP 1951–1980 (Datenquelle: DWD, Kartengrundlage: Geobasis NRW)

Ebenfalls in Abbildung 27 ist zu sehen, dass im Vergleich der beiden Klimanormalperioden in allen Regionen NRWs die mittlere Anzahl der Schneetage zurückgegangen ist. Die höchsten Rückgänge haben wiederum die Mittelgebirgsregionen zu verzeichnen: Rund um den Kahlen Asten gab es zwischen 1981 und 2010 im Durchschnitt bis zu 18 Schneetage weniger als in der Klimanormalperiode 1951 bis 1980. Dieser Rückgang vollzog sich parallel zum Anstieg der Lufttemperaturen in allen Regionen NRWs (Abbildung 3, Kapitel 2.1). Die durchschnittliche Temperatur im Winter (Dezember bis Februar) ist ebenfalls gestiegen und hat zuletzt 1995 die Marke von 0 °C unterschritten (Abbildung 4).

Die Betrachtung des Jahresverlaufs (Abbildung 28) zeigt, dass das Maximum der Schneetage im ersten Quartal

eines Jahres zwischen Januar und März zu erwarten ist. Vereinzelt kann bis Mai und ab Oktober Schneefall am Kahlen Asten auftreten. In der Abbildung ist außerdem zu sehen, dass im Mittel während der letzten 30 Jahre des Messzeitraums (1986 bis 2015) im Vergleich zum Mittel der ersten 30 Jahre (1955 bis 1984) die Schneetage besonders zwischen Januar und Mai zurückgegangen sind. Wurden während der ersten 30 Jahre von Januar bis März jeweils noch deutlich über 20 Schneetage pro Monat gemessen, überschritten diese Monate während der letzten 30 Jahre die 20-Tage-Marke im Durchschnitt nicht mehr. Zwischen Oktober und Dezember verhalten sich die Änderungen nicht derart deutlich: während der Oktober in den letzten 30 Jahren im Mittel zu einem schneefreien Monat wurde, stiegen die Schneetage im November leicht an, um im Dezember leicht zu sinken.

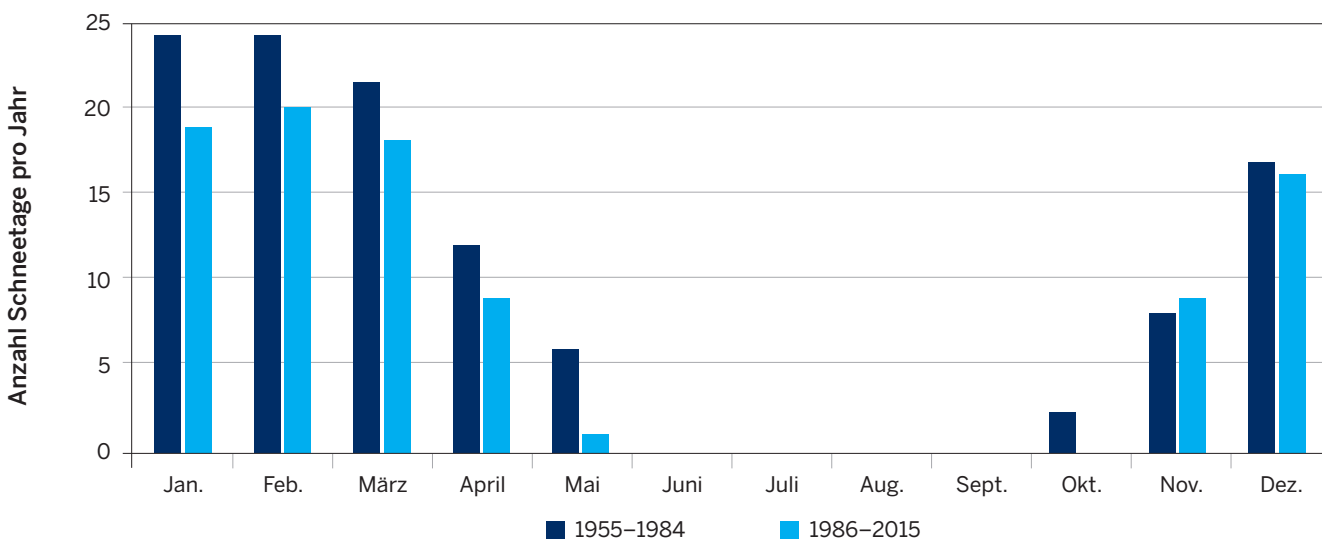


Abbildung 28: Jahresverlauf der Schneetage der jeweils ersten (1955–1984) und letzten (1986–2015) 30-Jahr-Periode der Messreihe an der Station Kahler Asten (Datenquelle: DWD)

3 Auswirkungen des Klimawandels auf Städte

Die Auswirkungen des Klimawandels sind in Städten, wo viele Menschen auf engem Raum leben, von besonderem Interesse. Hier ist die Bevölkerung durch Hitze und höhere thermische Belastungen stärker als im weniger bebauten Umland betroffen. Außerdem können Extremereignisse wie Starkregen oder Stürme in Siedlungen zu besonders hohen Schäden führen.



Das Wichtigste vorab:

- Die Eigenschaften einer Stadt sorgen für die Ausbildung eines eigenen **Lokalklimas** (Stadtklima), zum Beispiel durch die hohe Versiegelung und geringe Vegetation.
- Die Lufttemperatur ist im Durchschnitt höher als im umgebenden Umland, es entsteht eine sogenannte **urbane Wärmeinsel** (UHI).
- Für die Beispielstadt Bochum konnte eine Zunahme des **mittleren UHI-Effekts im Sommer** im Zeitraum 1997 bis 2015 nachgewiesen werden.
- Für die **Anzahl der Tage mit Hitzewarnungen** pro Jahr kann aufgrund der kurzen Zeitreihe bisher kein Trend nachgewiesen werden.
- Die **Wärmebelastung** an ausgewählten Stationen in Düsseldorf und Köln-Bonn zeigt bisher keinen Trend.

Tabelle 3: Mittelwerte für die untersuchten Klimaelemente und -größen und deren Änderungen über den jeweiligen Messzeitraum (Datenquelle: DWD)

Parameter	Messreihe	räumlicher Bezug	Einheit	Mittelwerte			Änderung Zeitreihe	Trend Zeitreihe
				gesamte Messreihe	1971–2000	1981–2010		
UHI im Sommer								
mittlere	1997–2015	Bochum	K	0,5	n. b.	n. b.	+ 0,8	h. s.
maximale	1997–2015	Bochum	K	4,0	n. b.	n. b.	n. b.	n. s.
Tage mit Wärmebelastung								
Düsseldorf	1971–2015	Düsseldorf	Tage	9,1	8,8	10,1	n. b.	n. s.
Köln-Bonn	1971–2015	Köln-Bonn	Tage	11,1	10,8	11,7	n. b.	n. s.
Hitzewarnungen								
Tage mit Hitzewarnung	2005–2015	NRW	Tage	8,1	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
Tage mit Warnung vor extremer Hitze	2005–2015	NRW	Tage	1,3	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.

Verwendete Abkürzungen: UHI = Urban Heat Island, K = Kelvin, n. b. = nicht berechnet, da Werte nicht verfügbar oder Trend nicht signifikant, s. = signifikant, s. s. = sehr signifikant, h. s. = hochsignifikant, n. s. = nicht signifikant.

3.1 Die städtische Wärmeinsel

Der städtische Wärmeinseleffekt, das heißt der Temperaturunterschied zwischen der (überwärmten) Innenstadt und dem (kühleren) Umland, ist ein seit langem bekanntes stadtklimatisches Phänomen. Die größten Temperaturgegensätze zwischen Stadt und Umland sind bei austauschungsarmen Hochdruckwetterlagen zu erwarten, die durch wolkenarme und windschwache Bedingungen charakterisiert werden. Hohe Einstrahlung am Tag und stark negative nächtliche Strahlungsbilanzen bei geringen Luftbewegungen führen zur Ausbildung einer urbanen Wärmeinsel (engl. Urban Heat Island, kurz UHI). Bei entsprechenden Wetterlagen ist die maximale Wärmeinselintensität in den

Monaten März bis Oktober nach Sonnenuntergang beziehungsweise im Laufe der Nacht zu erwarten (KUTTLER 2010).

Es gibt eine Reihe von Einflussfaktoren, die die Ausbildung einer urbanen Wärmeinsel fördern, wie beispielsweise hohe Versiegelung und dichte Bebauung in der Stadt. Das Umland hingegen ist durch wesentlich mehr Grünanteile und weniger versiegelte Flächen sowie Gebäude charakterisiert. Diese Flächeneigenschaften zusammen mit weiteren Einflussfaktoren lassen sich zu klimatischen Klassen zusammenfassen, den so genannten Klimatopen. Je nach Anteil der Versiegelung, Bebauungsdichte und -höhe, des

Frei- und Grünflächenanteils sowie des Verkehrsaufkommens können die Klimatope in insgesamt zehn Klassen unterschieden werden. Dabei nimmt der stadtklimatische Einfluss der Klimatope im Innenstadtbereich bis hin zu den Freilandklimatopen im unbeeinflussten Umland ab. Die Verteilung der Klimatope (und damit ein Überblick über den stadtklimatischen Einfluss) in NRW ist in Abbildung 29 dargestellt. Vor allem in den Großstädten treten Bereiche auf, die als Innenstadtklimatope ausgewiesen werden. Doch auch in kleineren Gemeinden mit Altstadtkernen führen hohe Versiegelung und enge Gassen zur Ausbildung eines Innenstadtklimatops.

In Köln sind in den Jahren 2011 und 2012 umfangreiche meteorologische Messungen durchgeführt worden. Dazu gehörten auch Temperaturmessfahrten, die den Zusammenhang zwischen den vorherrschenden Klimatopen und den Temperaturen belegen (Abbildung 30). So wurden am Abend während einer sommerlichen austauscharmen Wetterlage in den Innenstadtklimatopen die höchsten Temperaturen gemessen, wohingegen die Temperatur in den Außenbereichen insbesondere nachts deutlich niedriger war (Abbildung 30 rechts).

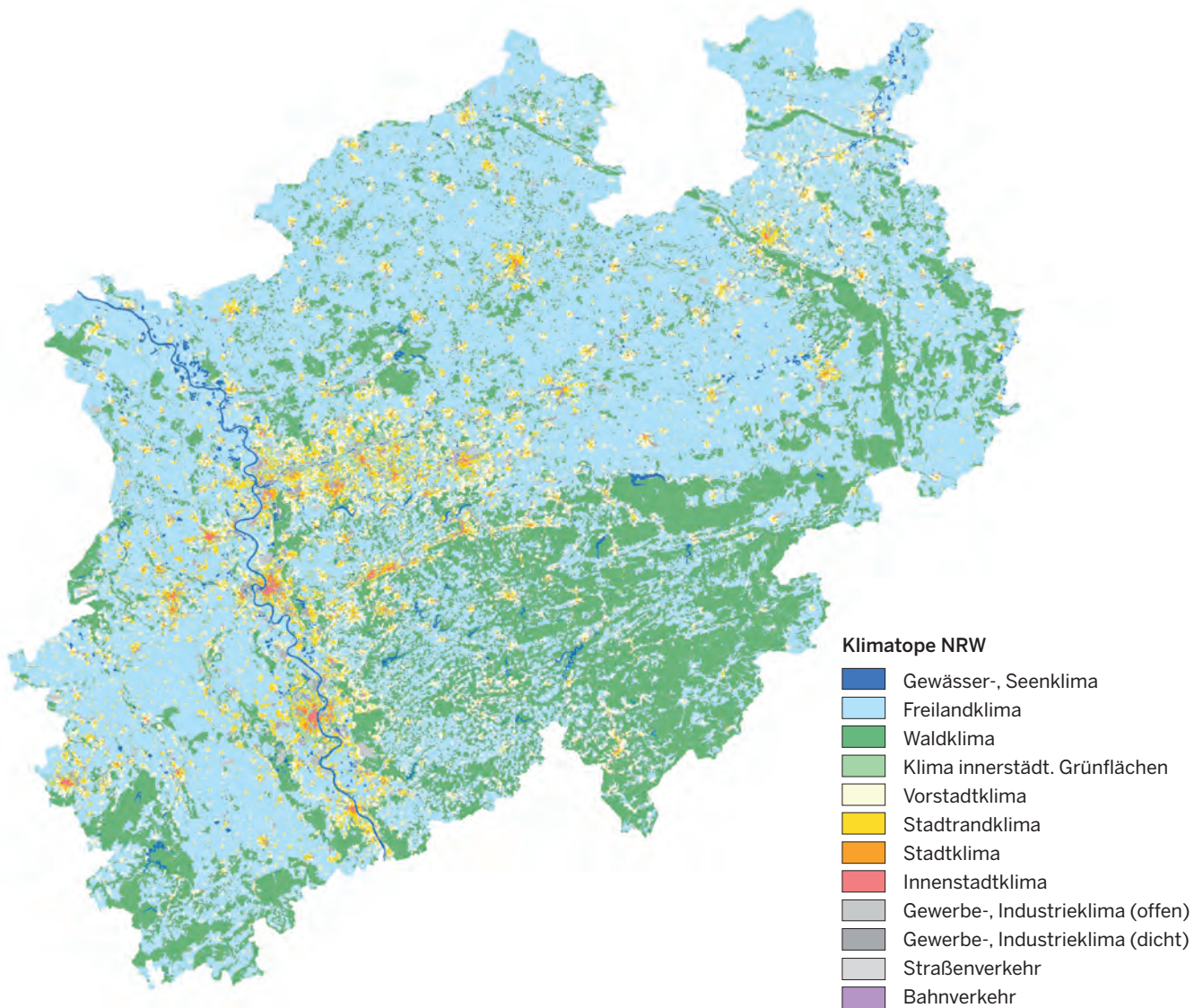


Abbildung 29: Klimatopkarte NRW

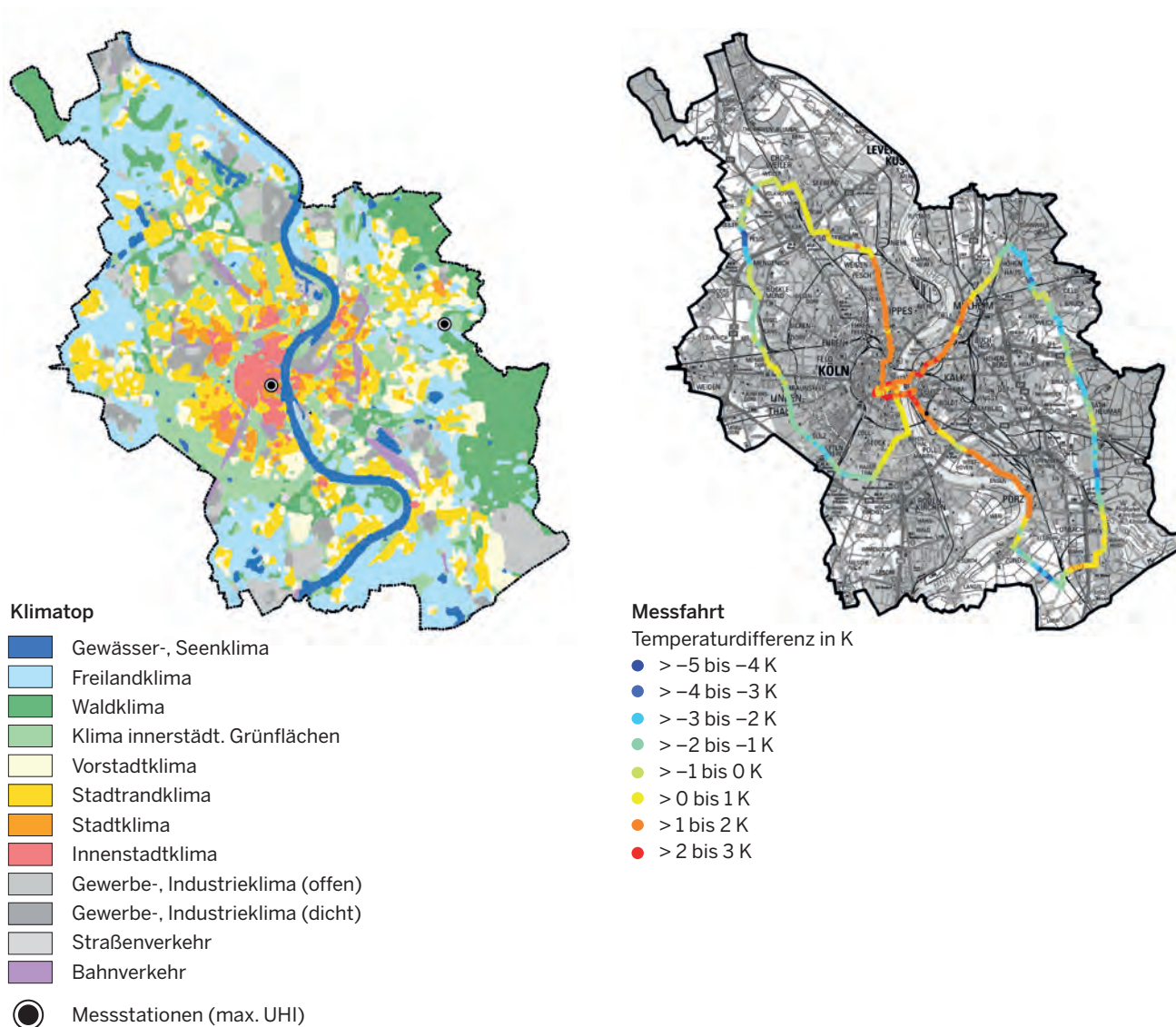


Abbildung 30: Klimatopkarte der Stadt Köln (links) und Ergebnisse von zwei Temperaturmessfahrten (rechts; linksrheinisch vom 02.07.2010 und rechtsrheinisch vom 21.07.2010, dargestellt als Abweichung vom Mittelwert der Lufttemperatur) (Kartengrundlage: Geobasis NRW)

Betrachtet man den gesamten Untersuchungszeitraum, hat sich ein mittlerer Temperaturunterschied zwischen der Innenstadt und der Peripherie – bezogen auf den Jahresmittelwert der Lufttemperatur – von rund 2 K (mittlerer Wärmeinseleffekt) gezeigt (Abbildung 31).

Der maximale Wärmeinseleffekt – Temperaturunterschied am Ende eines heißen Sommertages – lag in Köln mit mehr als 10 K deutlich höher. Dieser wurde in der Nacht vom 24.05.2012 auf den 25.05.2012 als Differenz zwischen den in Abbildung 30 dargestellten Stationen gemessen.

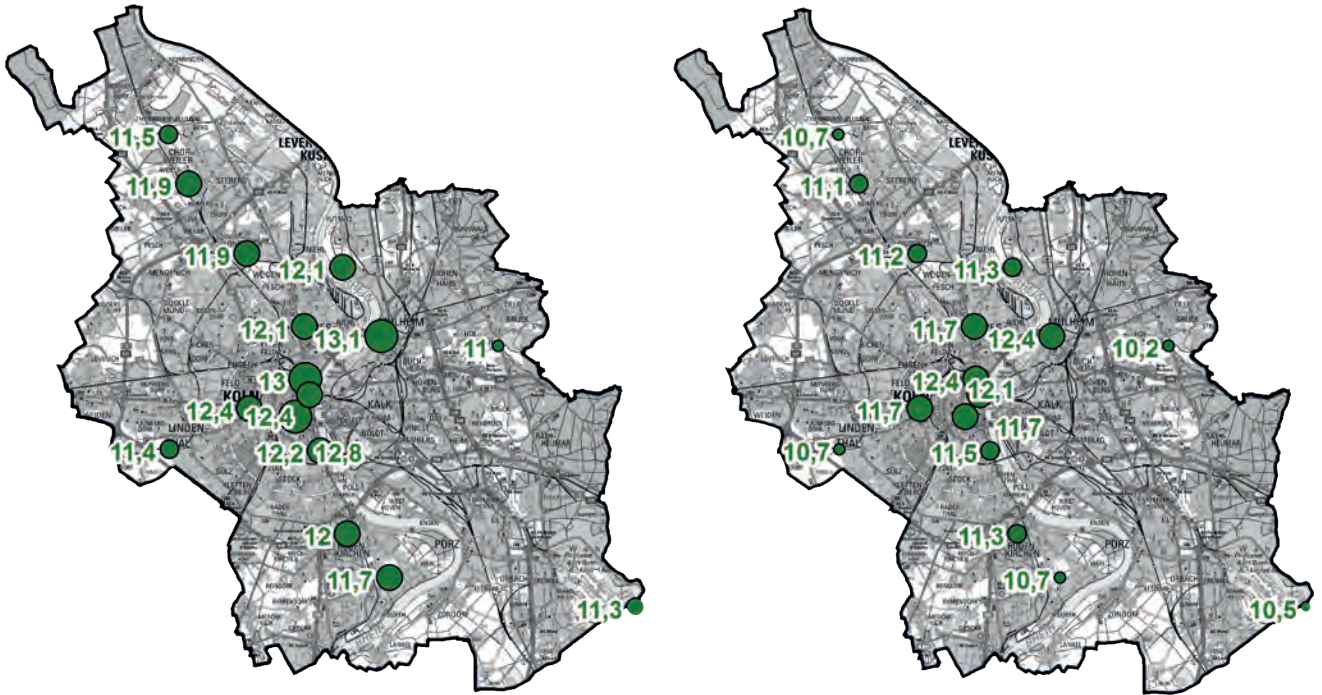


Abbildung 31: Mittlere Jahrestemperatur in °C in Köln für das Jahr 2011 (links) und 2012 (rechts); die Größe der Stationspunkte ist ein Maß für die Höhe der Temperatur (Kartengrundlage: Geobasis NRW)

Als einfache Einflussgröße zur Abschätzung der maximalen Temperaturunterschiede wird vielfach die städtische Einwohnerzahl herangezogen (maximale Wärmeinselintensität) (Abbildung 32). Der Zusammenhang zwischen

Einwohnerzahl und maximaler Wärmeinselintensität ist Gegenstand zahlreicher Untersuchungen (zum Beispiel Oke 1973, KUTTLER 2011).

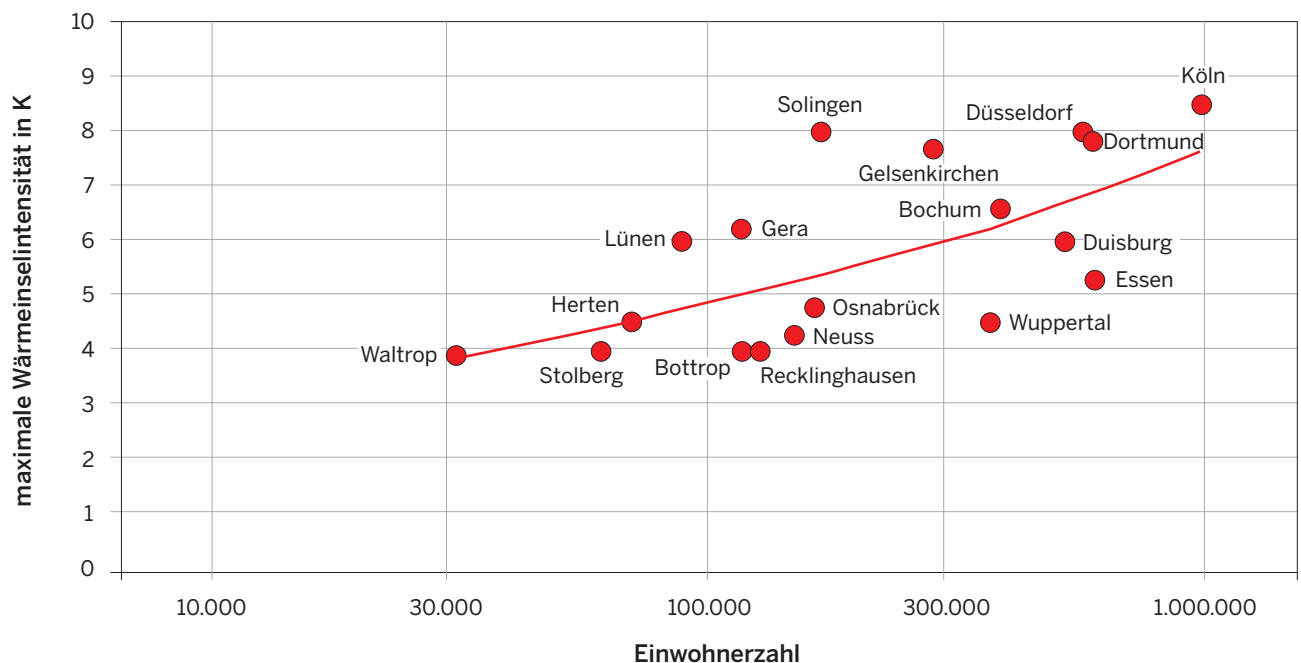


Abbildung 32: Maximale Wärmeinselintensitäten in Abhängigkeit von der Einwohnerzahl für ausgewählte Städte überwiegend aus NRW (KUTTLER 2011)

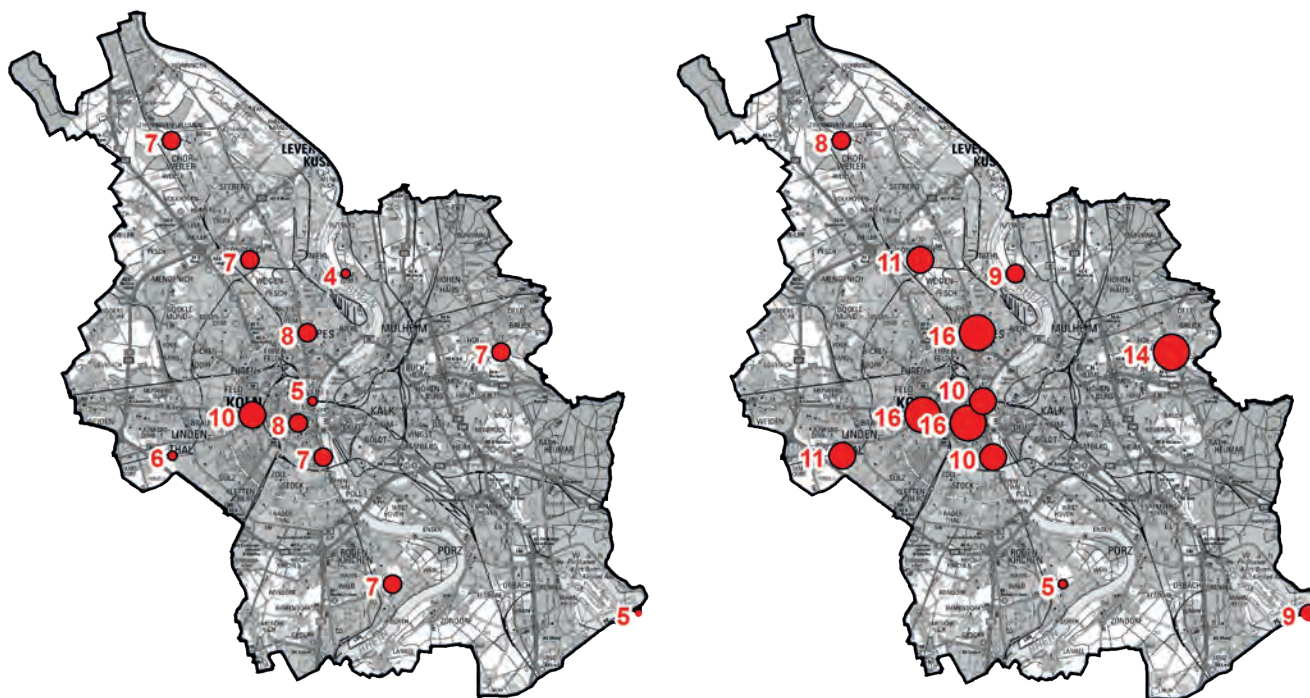


Abbildung 33: Anzahl der Heißen Tage ($T_{max} \geq 30 \text{ °C}$) in Köln für das Jahr 2011 (links) und 2012 (rechts); die Größe der Stationspunkte ist ein Maß für die Anzahl der Heißen Tage (Kartengrundlage: Geobasis NRW)

Darüber hinaus lässt sich nachweisen, dass nicht nur die höheren mittleren Temperaturen, sondern auch die Anzahl der warmen Temperaturkenntage von den dicht bebauten, versiegelten Innenstadtbereichen hin zu den unversiegelten Flächen im Umland abnehmen. Die Messungen in Köln haben für 2012 ergeben, dass an drei Innenstadtstationen bis zu 16 Heiße Tage erreicht wurden, wohingegen an einer Peripherie-Station lediglich fünf Heiße Tage auftraten (Abbildung 33). Die Tropennächte zeigen ein ähnliches

Bild: Während 2012 im Umland keine Tropennacht zu verzeichnen war, wurden bis zu neun Tropennächte in der Innenstadt registriert (Abbildung 34).

Witterungsbedingt traten in Köln 2011 weniger Heiße Tage und Tropennächte auf als im Jahr 2012. Die Tendenz der höheren Anzahl dieser Kenntage im Innenstadtbereich im Vergleich zum Umland wird dennoch auch im Jahr 2011 deutlich.





Abbildung 34: Anzahl der Tropennächte ($T_{min} \geq 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$) in Köln für das Jahr 2011 (links) und 2012 (rechts); die Größe der Stationspunkte ist ein Maß für die Anzahl der Tropennächte (Kartengrundlage: Geobasis NRW)



3.2 Hitze

Der Wärmeinseleffekt kann sich vor allem im Sommer – bei ohnehin hohen Temperaturen – zusätzlich negativ auf die Stadtbevölkerung auswirken. Geht man von weiter ansteigenden Temperaturen im Klimawandel aus, bedeutet dies eine zusätzliche thermische Belastung für die Menschen in der Stadt. Negative Folgen von extremen Temperaturen auf die menschliche Gesundheit konnten in zahlreichen epidemiologischen Studien belegt werden (Übersicht zum Beispiel in LASCHEWSKI & JENDRITZKY 2002) und resultieren im Extremfall in höheren Morbiditäts- und Mortalitätsraten. Beispielsweise zeigen Auswertungen zum Hitzesommer 2003 etwa 55.000 zusätzliche Todesfälle in Europa. Besonders betroffen war dabei Frankreich. In Deutschland gab es etwa 7.000 Todesfälle (JENDRITZKY 2007), davon allein 2.000 in NRW (BARDEHLE 2004).

Als Indikator für die Wärmebelastung wird die Intensität der UHI im Sommer (Juni bis August) ausgewertet. Diese gibt einen Eindruck über die zusätzliche Wärmebelastung in Städten, die sich vor allem während austauscharmer

Hochdruckwetterlagen ausbildet (siehe Kapitel 3.1). Die Wärmeinselintensität kann nur bei parallelen Messungen an einer Innenstadt- oder Stadtstation (urban) sowie einer Vergleichsstation im Umland (rural) betrachtet werden. Bisher liegen hierfür nur relativ kurze Zeitreihen vor. Abbildung 35 zeigt die Entwicklung der durchschnittlichen mittleren und maximalen UHI-Intensität im Sommer beispielhaft für Bochum. Seit 1996 ist ein ansteigender Trend der mittleren UHI und somit eine Zunahme der Lufttemperaturunterschiede zwischen der Stadt- und der Umlandstation zu erkennen. Der Trend ist statistisch signifikant. Da die Zeitreihe relativ kurz ist und es auch zu Veränderungen der Lage der Umlandstation und Wechsel der Temperatursensoren kam, sollte diese Entwicklung zunächst vorsichtig interpretiert werden. Untersuchungen in anderen Städten zeigen zudem, dass die Intensität der UHI annähernd gleich bleibt, da sich die Lufttemperaturen sowohl in den Innenstadtbereichen als auch im Umland erhöhen (UBA 2015 b, LANUV 2013).

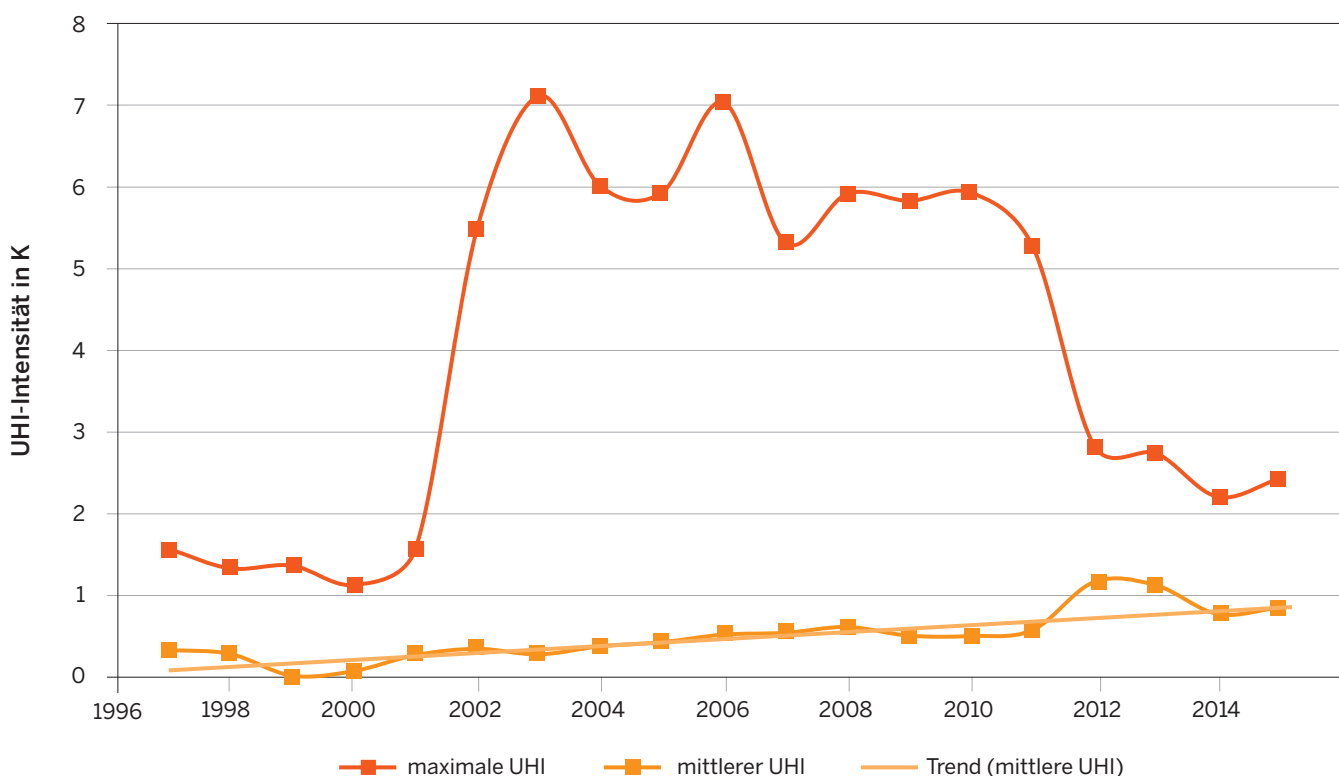


Abbildung 35: Durchschnittliche mittlere und maximale UHI-Intensität im Sommer im Zeitraum 1996–2015 in Bochum (Datenquelle: RUB)

Zusätzlich zu Bochum erfolgt die Auswertung der sommerlichen Wärmeinselintensität beispielhaft für die Städte Bonn (ab 2006) und Köln (ab 2010). Hierbei wird die maximale tägliche UHI im Sommer untersucht. In Abbildung 36 ist die Häufigkeit der sommerlichen Wärmeinsel in drei Intensitätsklassen und für die drei Städte aufgeschlüsselt (nach UBA 2015 b). An fast allen Tagen im Sommer kann eine UHI über 1 K nachgewiesen werden.

Besonders so genannte Hitzesommer, wie 2003 oder 2006 (siehe Tabelle 4), fallen durch höhere Intensitäten auf. Insbesondere in Bochum ist in diesen Jahren auch eine hohe durchschnittliche maximale sommerliche Wärmeinselintensität zu verzeichnen (Abbildung 35). Tabelle 4 zeigt außerdem, dass in überdurchschnittlich warmen Sommern an allen Stationen ebenfalls besonders häufig Heiße Tage und Tropennächte auftreten.

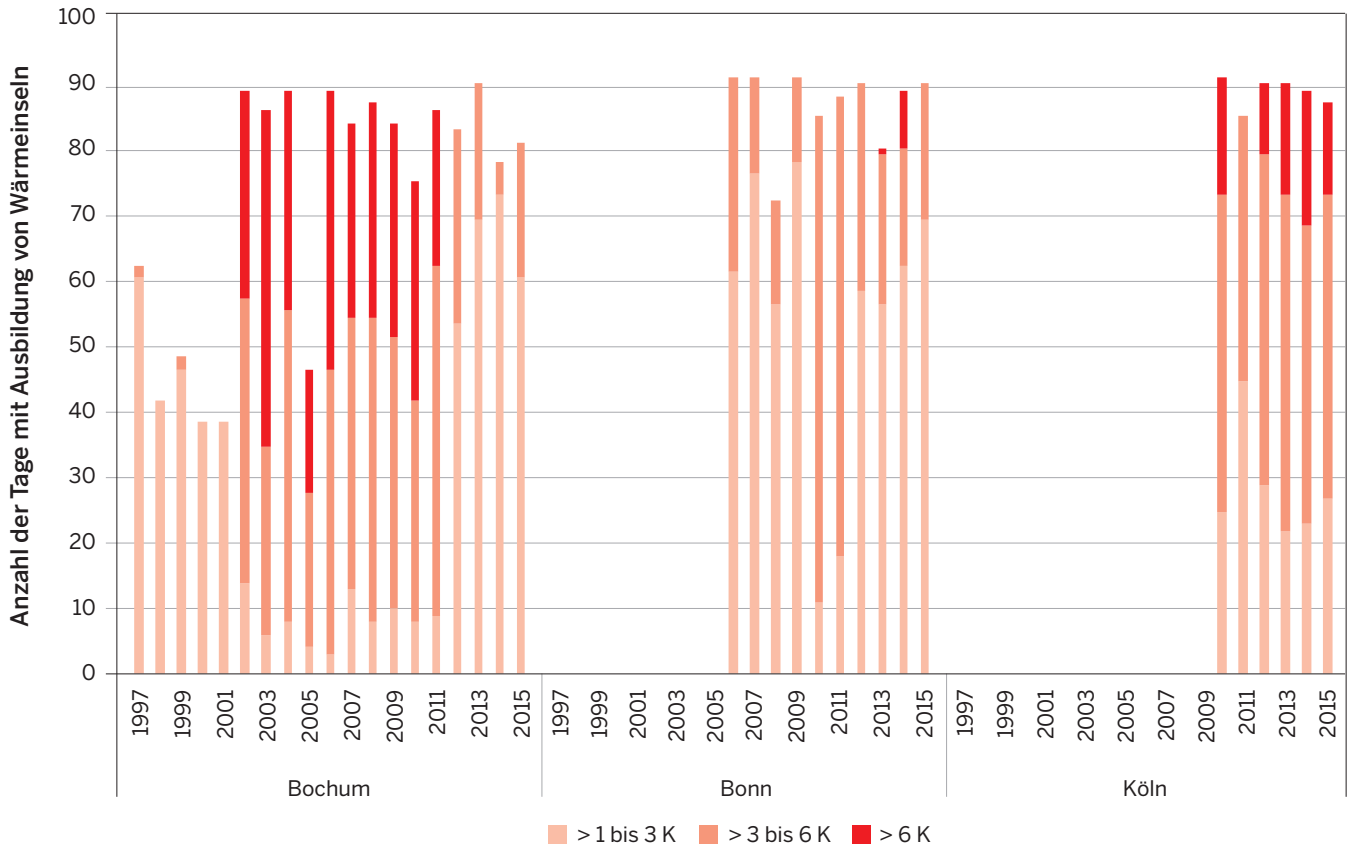


Abbildung 36: Häufigkeit der sommerlichen Wärmeinselintensität im Zeitraum 1997–2015 in Bochum, Bonn und Köln (Datenquellen: GIUB/Bonn, LANUV/Köln und RUB/Bochum)

Insgesamt weist Köln sowohl bei der UHI-Intensität als auch bei der Anzahl der warmen Temperaturkenntage meist höhere Werte auf als die beiden anderen untersuchten Städte. Dies kann zum einen mit der Stadtgröße zusammenhängen: Durch eine hohe Bevölkerungszahl und Stadtausdehnung wird insgesamt eine hohe Wärmeinselintensität erreicht (Abbildung 32). Zum anderen kann es auch an der Lage der Stationen innerhalb der Städte liegen: Die urbane Station in Köln liegt in einem Bereich, der als Innenstadtklimatop ausgewiesen wird. In Bonn hingegen liegt die Stadtstation in einem Stadtrandklimatop, in Bochum in einer innerstädtischen Grünfläche. Dies kann Einfluss auf die Intensität der berechneten Wärmeinsel haben. Dennoch ist an allen drei Stationen eine Differenzierung der warmen Temperaturkenntage zwischen der urbanen Stadtstation im Vergleich zur ruralen

Umlandstation erkennbar. In Bonn tritt dieser Unterschied – trotz der Lage der urbanen Station in einem Stadtrandklimatop – sogar besonders deutlich hervor, so dass alle drei Stationspaare geeignet scheinen, um die stadtklimatischen Unterschiede verschiedener Flächennutzungen aufzuzeigen (Tabelle 4).

Der urbane Wärmeinseleffekt verstärkt somit die thermische Belastung und die Auswirkungen sommerlich hoher Temperaturen – deren weiteres Steigen durch den Klimawandel erwartet wird. Es kann durch den Klimawandel beispielsweise mit einem Anstieg direkt hitzebedingter Krankheiten, wie Hitzschlag, Hitzeerschöpfung oder Sonnenstich gerechnet werden. Darüber hinaus sind ältere Menschen und Menschen mit Vorerkrankungen (vor allem Herzkreislauf- und Atemwegserkrankungen) durch ihre

Tabelle 4: Anzahl der warmen Temperaturkenntage in Bochum, Bonn und Köln im Zeitraum 1996–2015 (Datenquellen: GIUB/Bonn, LANUV/Köln, RUB/Bochum und wärmste Sommer/DWD)

	Sommertage						Heiße Tage						Tropennächte					
	BO rural	BO urban	BN rural	BN urban	K rural	K urban	BO rural	BO urban	BN rural	BN urban	K rural	K urban	BO rural	BO urban	BN rural	BN urban	K rural	K urban
1996	18						3						0					
1997	31	31					6	6					1	1				
1998	20	21					7	8					1	1				
1999	45	45					7	6					0	0				
2000	24	30					2	3					1	0				
2001	29	30					7	8					1	1				
2002	22	29					4	7					1	1				
2003	55	58					16	16					3	4				
2004	30	30					4	4					1	1				
2005	42	32					6	5					3	6				
2006	57	62	42	64			13	19	8	22			4	5	3	7		
2007	23	32	21	45			3	4	3	7			2	1	2	0		
2008	28	36	18	42			3	3	1	7			1	1	0	0		
2009	39	45	32	47			5	5	2	9			0	0	0	1		
2010	36	37	32	47	44	51	11	10	10	16	15	19	5	8	6	4	5	16
2011	37	43	29	54	45	47	2	3	2	7	6	6	1	1	0	0	0	5
2012	30	37	22	41	42	49	4	4	3	9	7	10	2	2	1	1	3	10
2013	32	39	30	47	45	48	11	11	6	13	13	13	0	2	1	2	3	14
2014	26	35	23	38	35	39	2	4	4	8	6	8	1	2	2	1	0	10
2015	27	40	33	47	45	48	11	14	13	17	16	16	3	4	4	6	7	17

Verwendete Abkürzungen: BO = Bochum, BN = Bonn, K = Köln

■ unter den 20 wärmsten Sommern seit 1881 in NRW

■ unter den 10 wärmsten Sommern seit 1881 in NRW

geringe Anpassungsfähigkeit, sowie Kleinkinder, aufgrund ihrer noch instabilen Thermoregulation, durch Hitzebelastung besonders gefährdet (JENDRITZKY 2007). Der thermische Stress ist besonders hoch, wenn die Wärmelast über einen längeren Zeitraum (Hitzeperiode) andauert.

Für Hitzeperioden gibt es bisher keine verbindliche Definition. Daher wird in Abbildung 37 eine Hitzeperiode beim Auftreten von drei aufeinanderfolgenden heißen Tagen (Temperaturmaximum über 30 °C) definiert. Darüber hinaus wird die mittlere und maximale Dauer der Hitzeperioden pro Jahr aufgeführt. Wie beim Auftreten von Kenntagen (siehe Tabelle 4) fallen die so genannten Hitzesommer 2003 und 2006 durch die hohe Anzahl oder Andauer der Hitzeperioden auf. Unterschiede zwischen den urbanen und ruralen Stationen lassen sich am deutlichsten in Bonn im Jahr 2006 zeigen: An der urbanen Station dauerte die Hitzeperiode elf Tage, an der ruralen Station hingegen nur fünf Tage.

Die starke thermische Belastung durch Hitzeperioden ist insbesondere auf die Einschränkung der Erholung während der Nachtruhe durch kaum absinkende nächtliche Temperaturen zurückzuführen (LAAIDI et al. 2012). Dieser Effekt kann durch die Ausbildung urbaner Wärmeinseln noch verstärkt werden, da das Maximum der UHI-Intensität meist nach Sonnenuntergang auftritt (siehe Kapitel 3.1). Des Weiteren hat die Jahreszeit Einfluss auf die Auswirkungen durch thermische Belastungen, da der menschliche Organismus über eine Anpassungsfähigkeit gegenüber extremen Temperaturbelastungen verfügt. So haben Hitzeperioden und auch einzelne Hitzetage im Frühling stärkere Auswirkungen auf Morbidität und Mortalität, als im Sommer (KYSÉLY 2004).

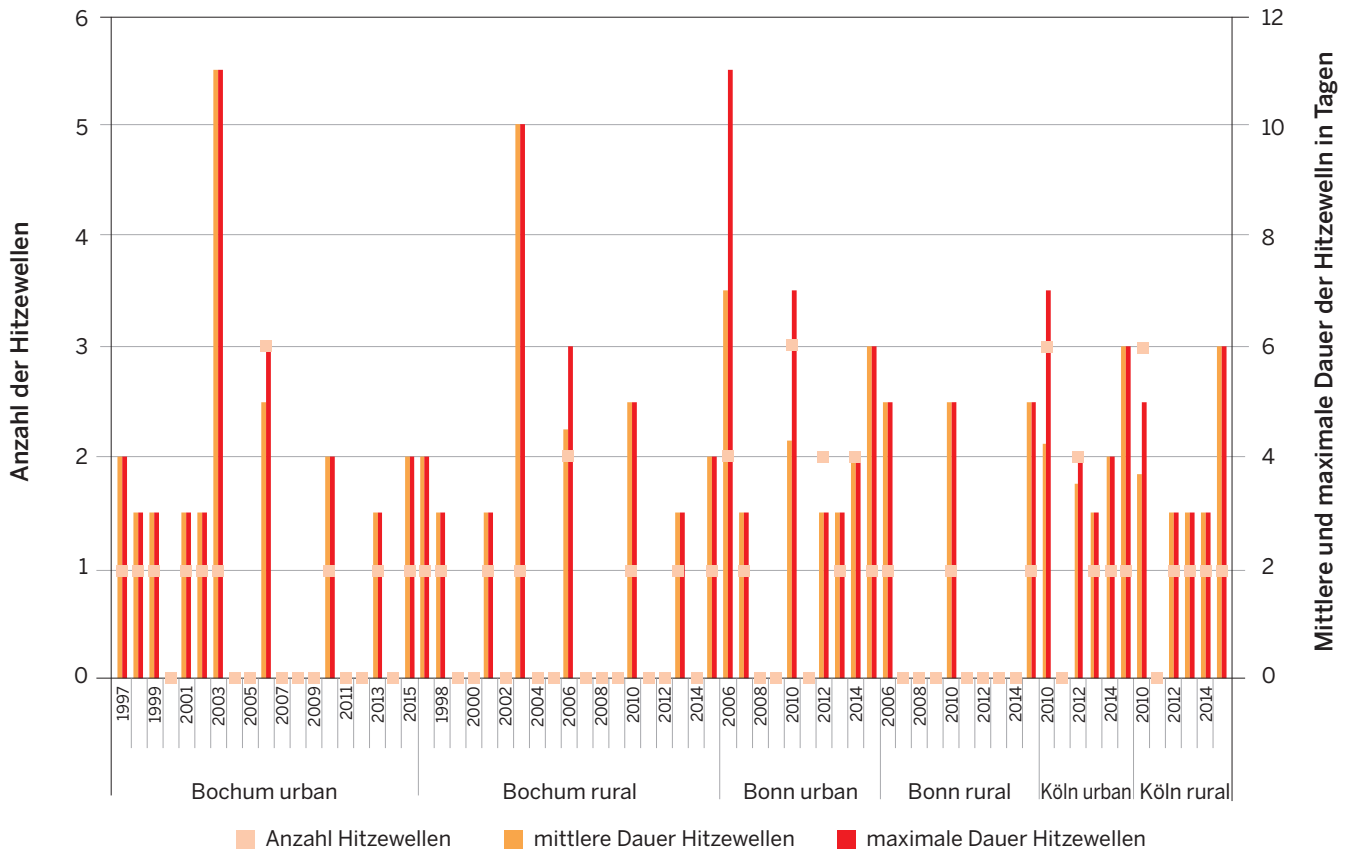


Abbildung 37: Anzahl der Hitzewellen pro Jahr sowie ihre mittlere und maximale Dauer an den urbanen und ruralen Vergleichsstationen in Bochum, Bonn und Köln (Datenquellen: GIUB/Bonn, LANUV/Köln und RUB/Bochum)

Aufgrund der Ereignisse im Sommer 2003 wurde vom DWD ein Hitzewarnsystem eingerichtet. Dieses meldet die erwartete Wärmebelastung in zwei Stufen: starke und extreme Wärmebelastung. Vor starker Wärmebelastung wird gewarnt, wenn die gefühlte Temperatur an zwei aufeinanderfolgenden Tagen den Wert 32 °C überschreitet und eine nicht ausreichende nächtliche Abkühlung erwartet wird. Als extreme Wärmebelastung werden Tage mit Überschreitung von 38 °C gefühlter Temperatur bezeichnet. Die gefühlte Temperatur ist eine sogenannte Äquivalenttemperatur, die nicht nur die Lufttemperatur, sondern auch weitere für das Wärmeempfinden des Menschen relevante Größen, wie zum Beispiel die Luftfeuchtigkeit, berücksichtigt. In Abbildung 38 ist die Anzahl der Tage mit Hitzewarnmeldungen in NRW dargestellt. Die Hitzewarnungen werden auf Landkreisebene herausgegeben. In der Auswertung wurde ein Hitzewarntag verzeichnet, wenn für einen Landkreis eine Hitzewarnung herausgegeben wurde. Wie in Kapitel 2.1 schon dargestellt, liegen die wärmsten Bereiche NRWs entlang der Rheinschiene. Daher sind Landkreise in der Rheinebene sicherlich häufiger von Hitzewarnungen betroffen, als topographisch hoch gelegene Landkreise in den Mittelgebirgsregionen.

Da Hitzewarnungen erst seit 2005 ausgegeben werden, lässt sich aus der kurzen Zeitreihe noch keine Aussage zu ihrer Entwicklung ableiten. So genannte Hitzesommer mit außergewöhnlich hohen Temperaturen wie 2006, nachgeordnet auch 2010, 2013 und 2015 (Tabelle 4), stechen in der Zeitreihe mit einer hohen Anzahl an Tagen mit Hitzewarnungen hervor. Um darüber hinaus einen Eindruck über die Entwicklung der thermischen Belastung zu bekommen, wurden exemplarisch für zwei Stationen (Düsseldorf Flughafen und Köln-Bonn Flughafen) die Anzahl der Tage mit starker Wärmebelastung (> 32 °C gefühlte Temperatur) ab 1971 ausgewertet (Abbildung 39). Hierbei lässt sich eine leicht zunehmende Tendenz feststellen; nach dem Mann-Kendall-Test ist diese jedoch nicht statistisch signifikant. Da aufgrund der langen und verlässlichen Zeitreihen die Flughafenstationen für diese Auswertung herangezogen wurden, kann davon ausgegangen werden, dass in den Innenstadtbereichen insgesamt häufiger Tage mit Wärmebelastung aufgetreten sind.

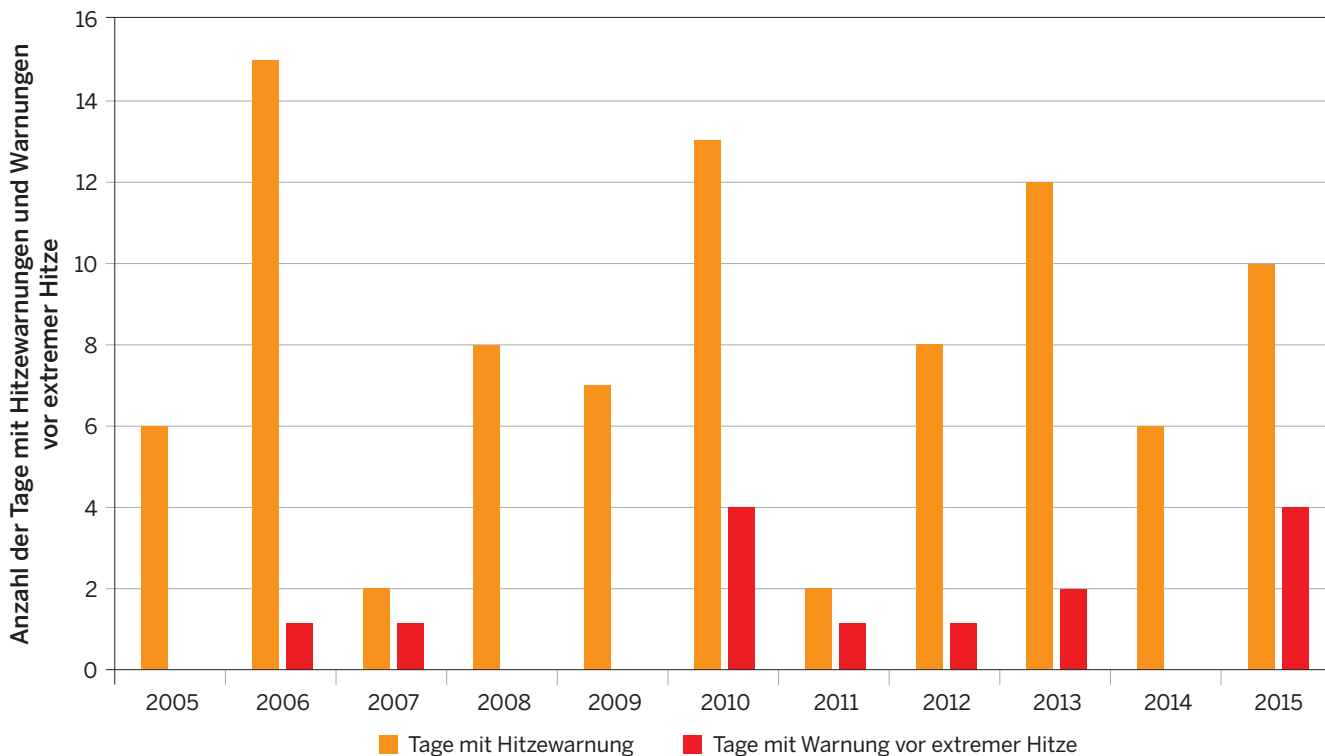


Abbildung 38: Anzahl der Tage mit Hitzewarnung und Warnung vor extremer Hitze in NRW im Zeitraum 2005–2015 (Datenquelle: DWD)

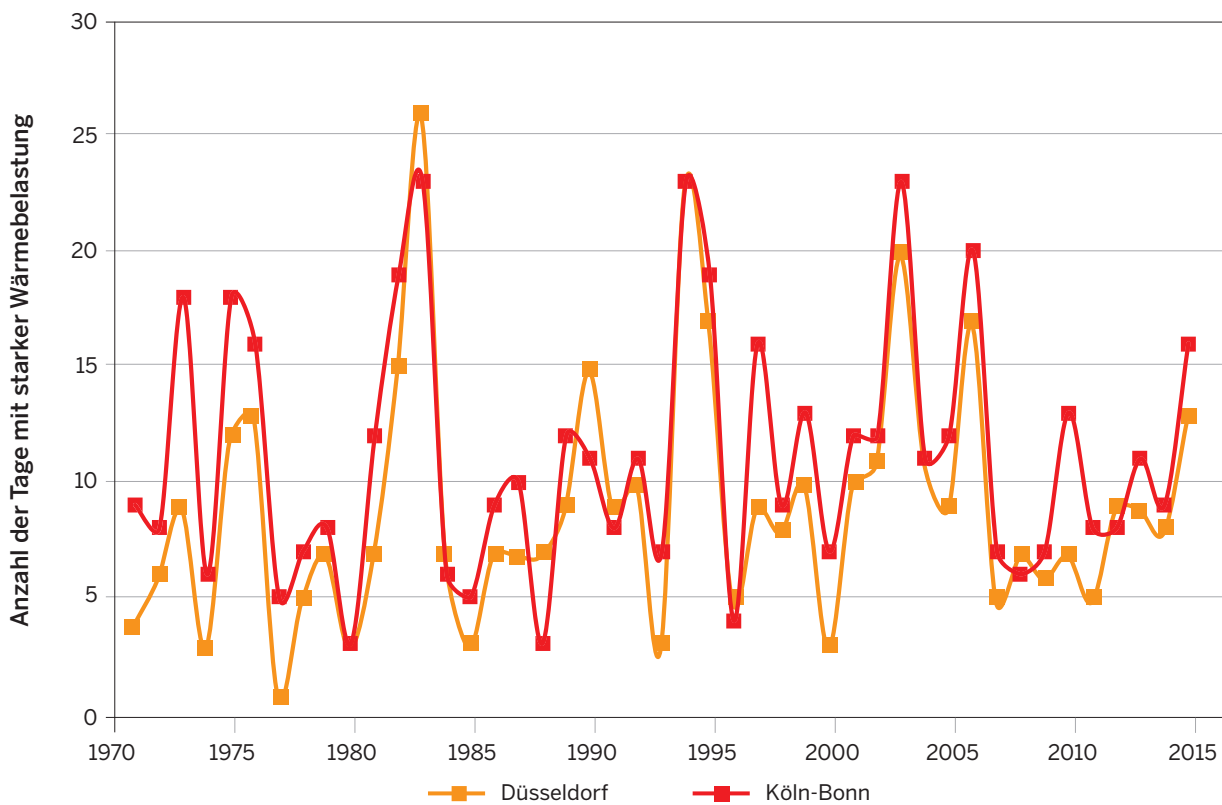


Abbildung 39: Tage mit starker Wärmebelastung (gefühlte Temperatur > 32 °C) im Zeitraum 1971–2015 in Düsseldorf und Köln/Bonn (jeweils Flughafenstation; Datenquelle: DWD)

3.3 Extremniederschläge und Stürme

Unter extremen Wetterereignissen werden neben außergewöhnlichen Temperaturen (Hitze und Kälte) auch extreme Niederschläge und Sturmereignisse verstanden. Während sich eine Zunahme der klimawandelbedingten Hitzeereignisse (bei gleichzeitiger Abnahme der Kälteereignisse) durch die steigenden Lufttemperaturen leicht belegen lässt, sind die Zusammenhänge zwischen dem Klimawandel und Veränderungen von Extremniederschlägen und Stürmen nicht so eindeutig. Betrachtet man die physikalischen Zusammenhänge, wirkt sich voraussichtlich die durch die Temperaturzunahme steigende Verdunstung auf die Niederschlagsverhältnisse aus. Dies kann in manchen Regionen zu einer Zunahme der Dürren führen, in anderen zur Erhöhung der Niederschlagssumme. Darüber hinaus begünstigt die durch die Verdunstung zur Verfügung stehende Energiemenge möglicherweise die Entstehung von Stürmen. Diese einfachen Beziehungen gelten jedoch nur, wenn alle weiteren Bedingungen gleich bleiben (KASANG 2016). Dennoch ist nicht jedes Extremereignis auf den Klimawandel zurückzuführen:

Auch zu früheren Zeiten sind außergewöhnliche Wetterphänomene aufgetreten. Extremereignisse sind somit Bestandteil der natürlichen Klimavariabilität.

Stürme und Starkregen richten in Städten häufig große Schäden an, da sie dort bedeutende infrastrukturelle Einrichtungen treffen können. Darüber hinaus sind Städte gegenüber Starkregenereignissen verletzlicher als Umlandbereiche, da aufgrund der hohen Versiegelung weniger Wasser in kurzer Zeit versickern kann und es darum schneller zu Überschwemmungen und Sachbeschädigungen kommt. Einige Beispiele aus den letzten Jahren sollen daher verdeutlichen, welche Folgen der Anstieg von extremen Niederschlägen und Stürmen nach sich ziehen kann.

Am 28.07.2014 wurde in Münster eine Niederschlagsmenge von 292 Litern pro Quadratmeter (l/m^2) im Zeitraum von sieben Stunden gemessen. Dies entspricht fast der vierfachen Menge des langjährigen Monatsniederschlags



im Juli in Münster von 76 l/m². Ursache waren mehrere Gewitter, die innerhalb weniger Stunden über Münster hinweg zogen. Die daraus resultierenden Überschwemmungen in vielen Teilen Münsters sorgten für großflächige Schäden: tausende vollgelaufene Keller, hunderte zerstörte Wohnungen und Häuser, überflutete Straßen und Stromausfälle. Auch der Verlust von zwei Menschenleben war zu beklagen (STADT MÜNSTER 2014). Laut dem Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (GDV) belief sich allein die Summe der Sachschäden bei 30.000 angezeigten Schäden auf rund 200 Millionen Euro (GDV 2015).

Bereits wenige Wochen vorher, am 09.06.2014 war NRW durch den Gewittersturm Ela getroffen worden. Die dabei auftretenden Böen erreichten Windgeschwindigkeiten von über 140 km/h (Beaufort 12). Ela wurde somit als Orkan klassifiziert. Dementsprechende Verwüstungen waren in mehreren Städten an Rhein und Ruhr die Folge:

unzählige entwurzelte Bäume, beschädigte Autos und der Zusammenbruch des Straßen- und Schienenverkehrs für mehrere Tage. Auch hier forderte das Extremereignis sieben Menschenleben (RUHNAU 2014). Der GDV meldete eine Sachschadenshöhe durch das Sturmtief Ela von rund 600 Millionen Euro (GDV 2015).

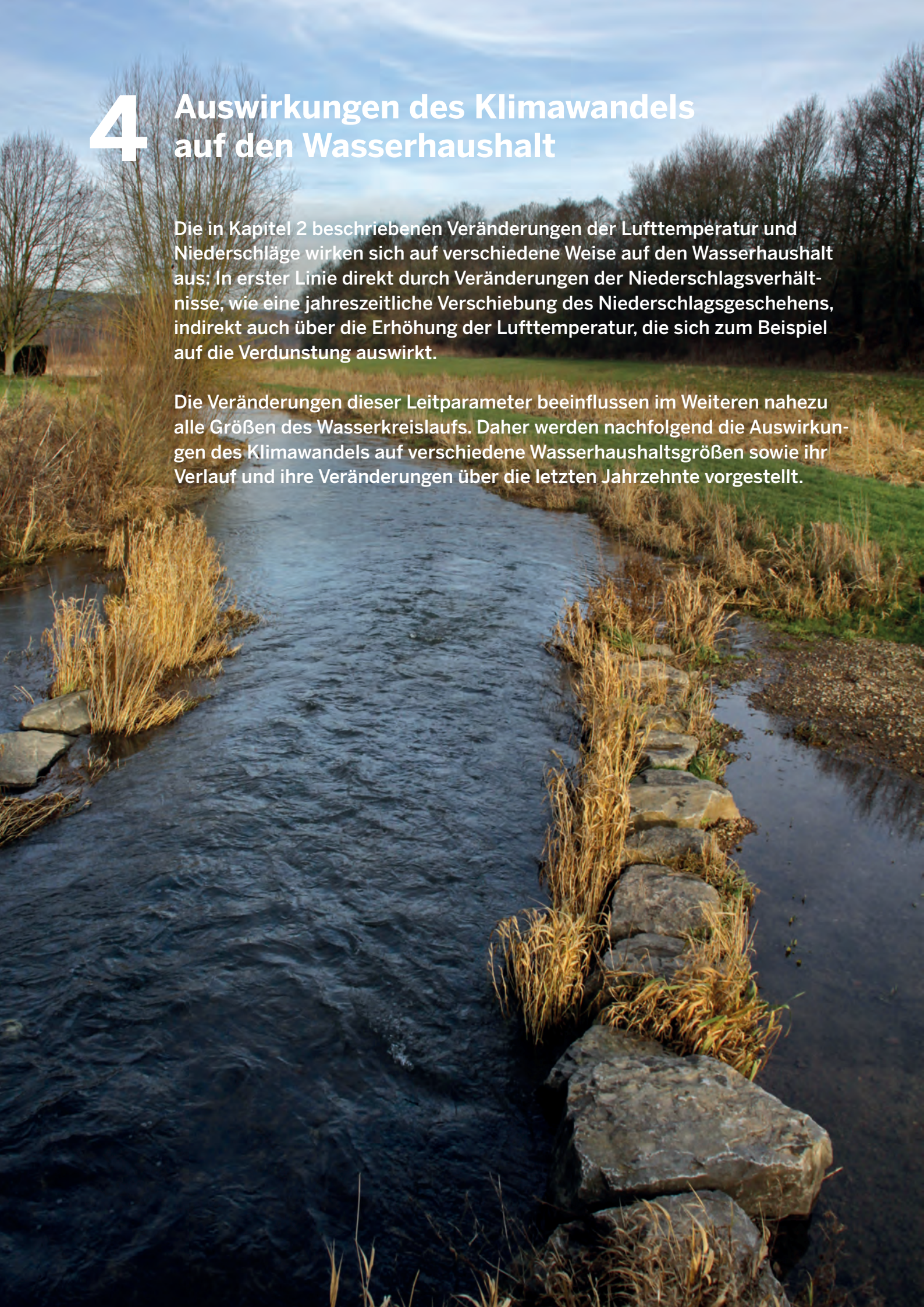
Durch die Auswertungen in Kapitel 2.4.2 konnte gezeigt werden, dass die Anzahl der Tage mit Starkniederschlagsereignissen leicht zunimmt. Dieser Sachverhalt wurde bereits in einer ausführlichen Untersuchung durch das Projekt ExUS für den Zeitraum 1951 bis 2008 aufgezeigt (AQUA_PLAN et al. 2010). Zukünftig wird für die mittleren Breiten eine Fortsetzung dieser Tendenz erwartet (IPCC 2014). Für Stürme ist die Datenlage noch nicht ausreichend, um Aussagen darüber treffen zu können, ob sich ihre Stärke oder Anzahl durch den Klimawandel verändert hat.



4 Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt

Die in Kapitel 2 beschriebenen Veränderungen der Lufttemperatur und Niederschläge wirken sich auf verschiedene Weise auf den Wasserhaushalt aus: In erster Linie direkt durch Veränderungen der Niederschlagsverhältnisse, wie eine jahreszeitliche Verschiebung des Niederschlagsgeschehens, indirekt auch über die Erhöhung der Lufttemperatur, die sich zum Beispiel auf die Verdunstung auswirkt.

Die Veränderungen dieser Leitparameter beeinflussen im Weiteren nahezu alle Größen des Wasserkreislaufs. Daher werden nachfolgend die Auswirkungen des Klimawandels auf verschiedene Wasserhaushaltsgrößen sowie ihr Verlauf und ihre Veränderungen über die letzten Jahrzehnte vorgestellt.



Das Wichtigste vorab:

- Die **Evapotranspiration** zeigt seit 1991 eine Zunahme von über 60 mm.
- Bedingt durch höhere Lufttemperaturen und daraus resultierende höhere Verdunstungs- und Wasserverbrauchswerte geht die **Grundwasserneubildung** zurück, wie an der Beispielstation St. Arnold belegt wird.
- Durch abnehmende Grundwasserneubildung sinkt der **Grundwasserstand**, wie am Beispiel der Grundwassermessstelle Hamminkeln dargestellt.
- Der **mittlere jährliche Abfluss** am Beispielpegel Feudingen/Lahn nimmt ab. Diese Entwicklung gilt auch für weitere antropogen weitgehend unbeeinflusste Pegel in NRW.
- Die mittleren und maximalen Werte der **Gewässertemperatur** am Rhein haben zugenommen.

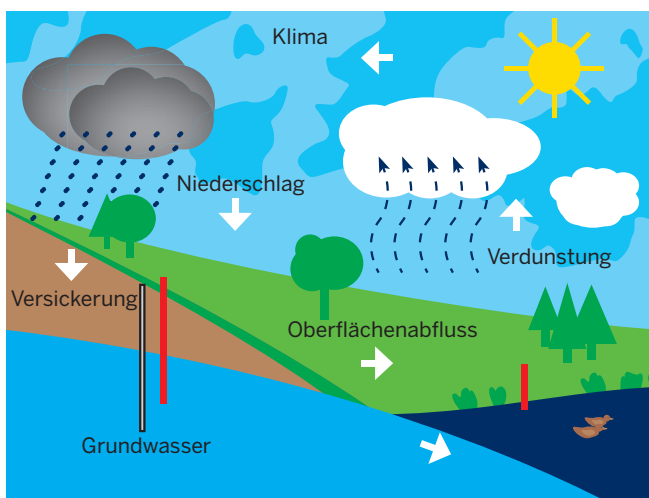


Abbildung 40: Der Wasserkreislauf

4.1 Evapotranspiration

Die Evapotranspiration wird als Verdunstung von einer bewachsenen Bodenoberfläche definiert und ist die Summe aus Evaporation (Verdunstung einer unbewachsenen Landoberfläche oder freien Wasserfläche) und Transpiration (Verdunstung der Pflanzenoberfläche durch biotische Prozesse). Die Evapotranspiration wird in aktuelle und potenzielle Evapotranspiration unterteilt. Die aktuelle Evapotranspiration beschreibt dabei die tatsächlich aufgetretenen und gemessenen Werte. Die potenzielle Evapotranspiration hingegen stellt die aufgrund klimatischer Gegebenheiten maximal mögliche Evapotranspiration bei theoretisch uneingeschränkter Wasserverfügbarkeit dar.

Auf die Evapotranspiration wirken sich sowohl Änderungen des Niederschlags als auch der Lufttemperatur aus. Dabei führen steigende Temperaturen durch den Klimawandel zu höheren Evaporationsraten. Sich verändernde Niederschläge beeinflussen darüber hinaus das

zur Verfügung stehende Wasserangebot, wie zum Beispiel das pflanzenverfügbare Bodenwasser. Geringere Niederschläge während der Vegetationsperiode führen zu einer eingeschränkten Wasserverfügbarkeit und somit zu einer Abnahme der aktuellen Evapotranspiration. Eine ausreichende Wasserversorgung im Winter – bei sich im Klimawandel erhöhenden Lufttemperaturen – kann hingegen zu einem Anstieg der Evapotranspiration in dieser Jahreszeit führen. Die Evapotranspiration besitzt somit eine hohe Klimawandelrelevanz. Außerdem haben Veränderungen der Evapotranspiration Auswirkungen auf verschiedene weitere Handlungsfelder, wie beispielsweise die Landwirtschaft, den Boden und die Biodiversität. Die potenzielle Evapotranspiration soll darum als neuer Indikator in das Klimafolgenmonitoring aufgenommen und jährlich aktualisiert werden (www.klimafolgenmonitoring.nrw.de).

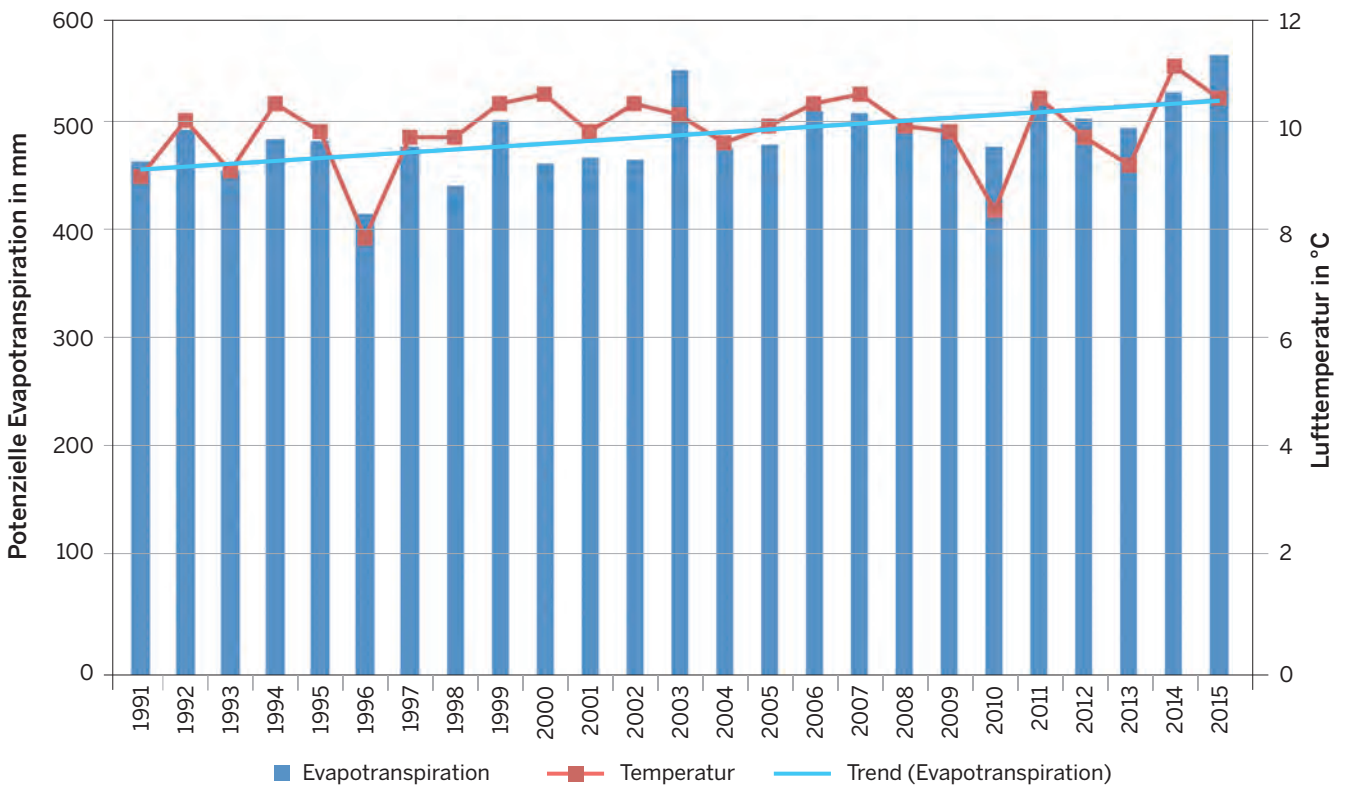
Für die Bestimmung der Evapotranspiration wurden Daten des DWD zur potenziellen Evapotranspiration über Gras ausgewertet. Diese wurden mit Hilfe eines agrarmeteorologischen Modells bestimmt (LÖPMEIER 1994). Als Grundlage für die Modellrechnungen dienen Stationsmesswerte, die über ein Interpolationsverfahren flächendeckend für NRW dargestellt werden können.

Die Entwicklung der Jahresmittelwerte der potenziellen Evapotranspiration für NRW im Zeitraum 1991 bis 2015 zeigt eine statistisch hochsignifikante Zunahme von über 60 mm (Differenz zwischen Anfang und Ende der Trendlinie; Abbildung 41). Darüber hinaus zeigt Abbildung 41 deutlich den Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und potenzieller Evapotranspiration durch den gleichförmigen Verlauf der beiden Zeitreihen.

Tabelle 5: Mittelwerte für die untersuchten Parameter aus dem Wasserhaushalt für NRW und Beispielstationen und deren Änderungen über den jeweiligen Messzeitraum (Datenquellen: DWD & LANUV)

Parameter	Messreihe	räumlicher Bezug	zeitlicher Bezug	Einheit	gesamte Messreihe
Evapotranspiration	1990–2015	NRW	KJ	mm	487,6
Klimatische Wasserbilanz	1961–2015	NRW	KJ	mm	314,7
Abfluss	1951–2015	Feudingen/Lahn	KJ	m ³ /s	0,6
Grundwasserneubildung	1966–2015	St. Arnold	WWJ	mm	399,3
Grundwasserstand					
mittel	1951–2015	Hamminkeln	WWJ	m ü. NHN	19,0
min.	1951–2015	Hamminkeln	WWJ	m ü. NHN	18,6
max.	1951–2015	Hamminkeln	WWJ	m ü. NHN	19,4
Gewässertemperatur					
mittel	1974–2015	Kleve-Bimmen	KJ	°C	13,5
max.	1974–2015	Kleve-Bimmen	KJ	°C	24,5

Verwendete Abkürzungen: KJ = Kalenderjahr, WWJ = Wasserwirtschaftsjahr, n. b. = nicht berechnet, da Werte nicht verfügbar oder Trend nicht signifikant, s. = signifikant, s. s. = sehr signifikant, h. s. = hochsignifikant, n. s. = nicht signifikant.

**Abbildung 41:** Jahressummen der Evapotranspiration und der Jahresmittel der Lufttemperaturen im Flächenmittel für NRW im Zeitraum 1991–2015 (Datenquelle: DWD)

	Klimanormalperioden				Änderung Zeitreihe	Trend Zeitreihe
	1951–1980	1961–1990	1971–2000	1981–2010		
	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	+ 62,6	h. s.
	n. b.	313,1	300,9	339,7	n. b.	n. s.
	0,7	0,7	0,6	0,6	– 0,15	s.
	n. b.	n. b.	416,2	419,9	– 114,4	s.
	19,2	19,1	18,9	18,9	– 0,8	h. s.
	18,7	18,7	18,5	18,5	– 0,7	h. s.
	19,6	19,5	19,2	19,3	– 0,9	h. s.
	n. b.	n. b.	n. b.	13,6	+ 1,5	h. s.
	n. b.	n. b.	n. b.	24,7	+ 2,5	h. s.

Betrachtet man die räumlichen Unterschiede der potenziellen Evapotranspiration in NRW im Zeitraum 1991 bis 2015 (Abbildung 42), ist deutlich der Einfluss der unterschiedlichen Temperaturverhältnisse zu erkennen (siehe Kapitel 2.1). Im Niederrheinischen Tiefland und der Niederrheinischen Bucht finden sich mit über 500 mm/a die höchsten Werte. Gleichzeitig weisen diese Regionen die höchsten Jahresmitteltemperaturen auf. In den höher gelegenen Regionen, wie der Eifel oder dem Sauer- und Siegerland, liegen die Werte bei 400 bis 450 mm/a. Am Kahlen Asten sinken sie auf 350 bis 400 mm/a. Dies spiegelt die geringeren Jahrestemperaturen in den Hochlagen der Mittelgebirgsregionen wider.

Der Temperatureinfluss wird auch bei Betrachtung des Jahresgangs der potenziellen Evapotranspiration deutlich: Die höchsten Werte treten im Sommer auf, in den Wintermonaten sind sie deutlich geringer (Abbildung 43). Der Einfluss des Niederschlags wird nicht berücksichtigt, da bei der potenziellen Evapotranspiration immer von einer ausreichenden Wasserversorgung ausgegangen wird. Gerade im Klimawandel könnte dies aber nicht mehr in allen Jahreszeiten und Monaten der Fall sein (siehe Kapitel 2.1 und 2.3). Aus den Abbildungen 4 und 14 kann bereits abgeleitet werden, dass im Sommer – während der Hauptvegetationszeit – die Temperaturen zugenommen haben, die Niederschlagssummen aber unverändert gleich geblieben sind. Das kann zu einer schlechteren Wasserverfügbarkeit führen.



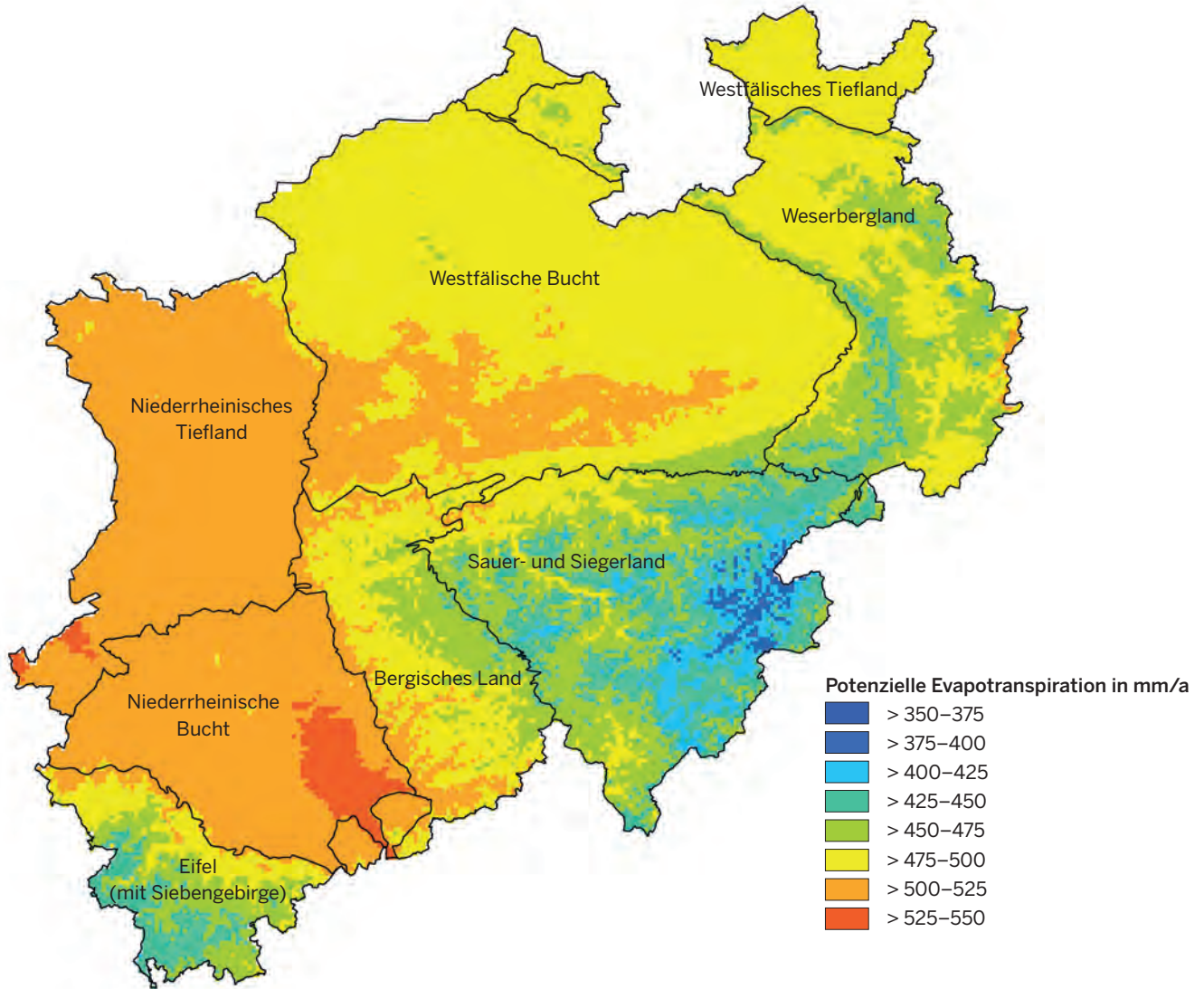


Abbildung 42: Mittlere Jahressumme der potenziellen Evapotranspiration über Gras in NRW im Zeitraum 1991–2015 (Datenquelle: DWD)

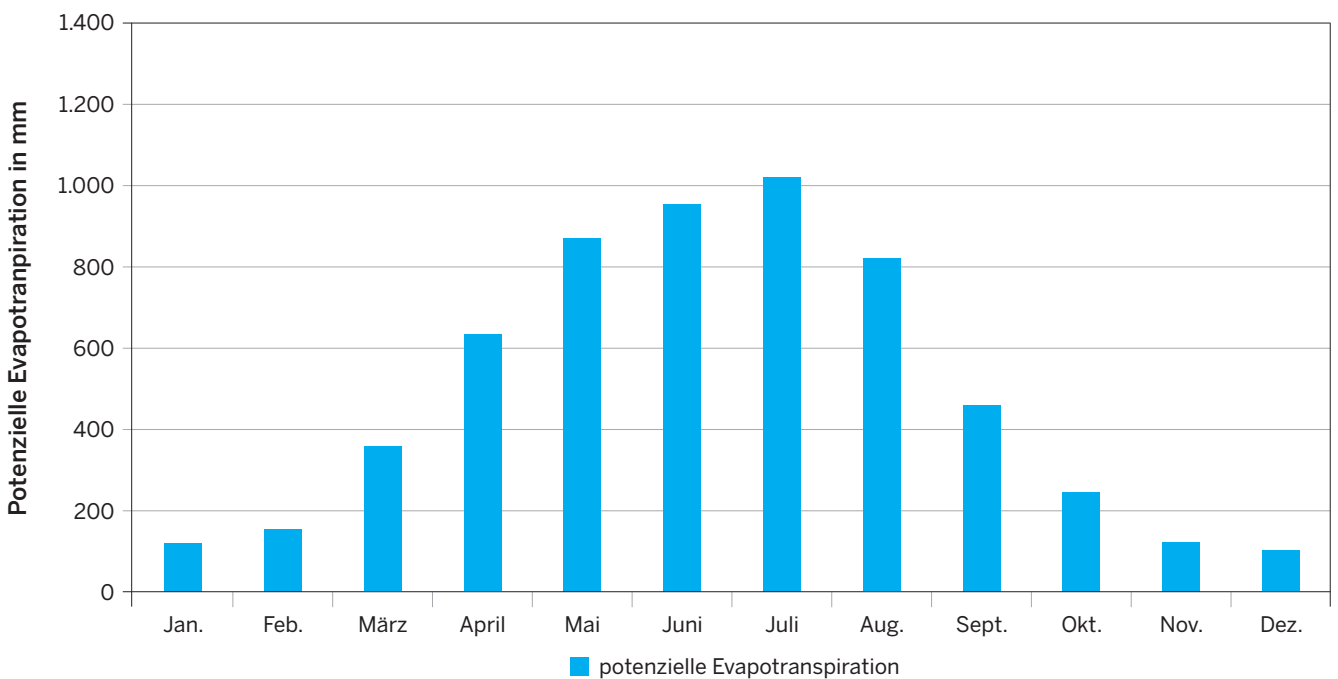


Abbildung 43: Jahresgang der mittleren Monatssumme der potenziellen Evapotranspiration für NRW im Zeitraum 1991–2015 (Datenquelle: DWD)

4.2 Klimatische Wasserbilanz

Die klimatische Wasserbilanz ist eine abgeleitete Größe, die sich aus der Differenz der Niederschlagshöhe und der potenziellen Evapotranspiration ergibt (siehe Kapitel 4.1). Sie stellt eine quantitative Gegenüberstellung von Wasserdargebot (Niederschlag) und -verlust (pot. Evapotranspiration) in einem bestimmten Gebiet für einen festgelegten Zeitraum dar. Mit der klimatischen Wasserbilanz wird beschrieben, wie sich die meteorologischen Bedingungen auf den Wasserhaushalt auswirken: Ist der Niederschlag größer als die Verdunstung, so ist die Wasserbilanz positiv und man spricht von einem humiden, also feuchten Klima. Im umgekehrten Fall heißt es trocken beziehungsweise arid.

Zukünftig kann, bedingt durch die Veränderungen der Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse, mit Auswirkungen durch den Klimawandel auf die klimatische Wasserbilanz gerechnet werden. Die klimatische Wasserbilanz ist seit 2014 ein Indikator im Klimafolgenmonitoring und wird jährlich aktualisiert (www.klimafolgenmonitoring.nrw.de).

Die klimatische Wasserbilanz ist sehr starken jährlichen Schwankungen unterworfen. Deshalb sollten auch hier, ebenso wie beim Niederschlag, für Trendaussagen möglichst lange Zeitreihen betrachtet werden. Für die klimatische Wasserbilanz liegen Werte seit 1961 vor (Abbildung 44). In diesem Zeitraum ist nach dem Mann-Kendall-Test bisher kein signifikanter Trend nachzuweisen. Dies gilt ebenso für die einzelnen Monate und Jahreszeiten.

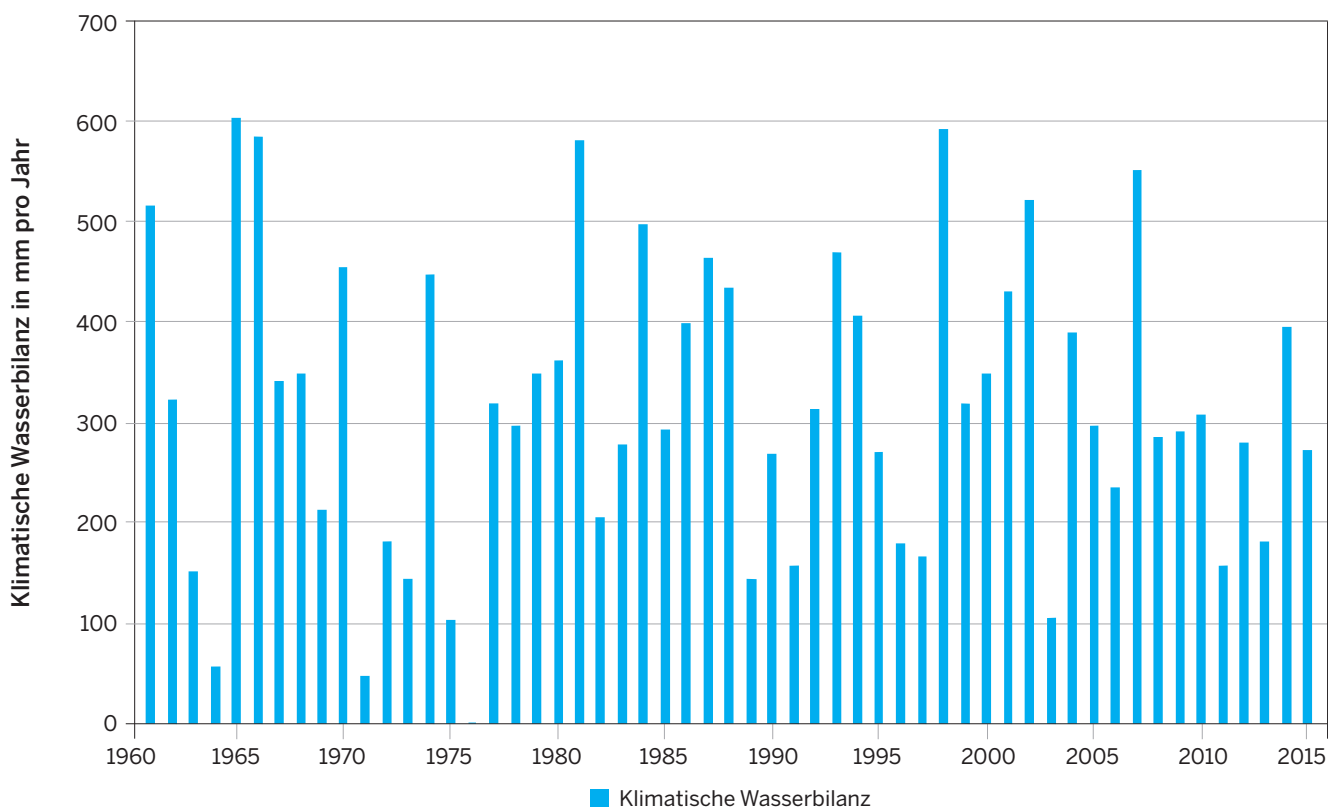


Abbildung 44: Jährliche Summen der klimatischen Wasserbilanz im Flächenmittel für NRW im Zeitraum 1961–2015 (Datenquelle: DWD)

Die räumliche Verteilung der klimatischen Wasserbilanz in NRW entspricht weitgehend den Karten der Niederschlagshöhe. Nur die absolute Größe der Werte ist deutlich niedriger. Im Jahresmittel ist die klimatische Wasserbilanz in NRW positiv. Im Zeitraum von 1981 bis 2010 betrug das Gebietsmittel 340 mm. Die größten Bilanzüberschüsse finden sich im Bergischen- sowie Sauer- und Siegerland mit Werten bis über 1.200 mm (Abbildung 45). Danach folgen das Weserbergland und die Eifel mit Werten bis zu 800 mm. Die niedrigsten Werte treten mit unter 200 mm

entlang des Rheingrabens und in Teilen der Westfälischen Bucht auf und sind in kleinräumigen Teilen der Niederrheinischen Bucht auch leicht negativ. Somit werden hohe Werte in Regionen erreicht, die sowohl eine niedrige Jahresmitteltemperatur als auch hohe Jahresniederschläge aufweisen. Im Gegensatz dazu sind niedrige Werte in Bereichen zu finden, die durch geringe Jahresniederschlagssummen und hohe mittlere Jahrestemperaturen geprägt sind.

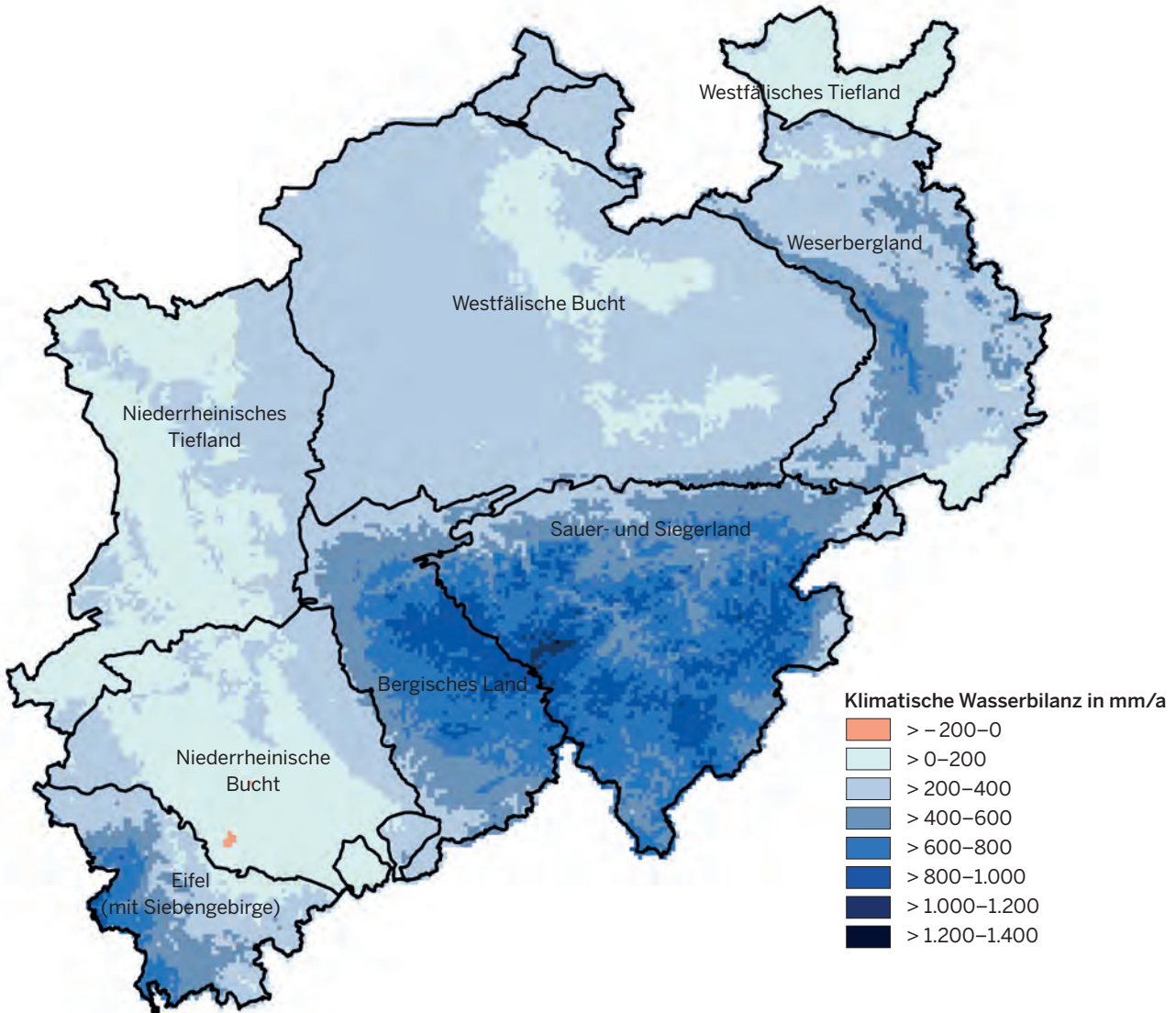


Abbildung 45: Mittlere jährliche klimatische Wasserbilanz in NRW im Zeitraum 1981–2010 (Datenquelle: DWD; Kartengrundlage: Geobasis NRW)

Die klimatische Wasserbilanz weist nicht nur eine hohe regionale, sondern auch eine hohe zeitliche Variabilität auf. Dies ist im Wesentlichen auf die starken Schwankungen der Niederschlagshöhe und der Temperatur im Jahresverlauf zurückzuführen. In den Monaten September bis März ist die klimatische Wasserbilanz als Gebietsmittel für NRW insgesamt positiv (Abbildung 46). Während dieser Monate führt die Versickerung des überschüssigen Wassers zur Erneuerung der Grundwasservorräte (siehe Kapitel 4.3). Darüber hinaus fällt beim Vergleich der beiden Zeiträume 1961 bis 1990 und 1986 bis 2015 auf, dass eine leichte Verschiebung der ariden Monate stattgefunden hat. Während im ersten Zeitraum im April noch eine positive klimatische Wasserbilanz auftrat, weist der Monat im Zeitraum 1986 bis 2015 eine negative Bilanz auf. Insgesamt tritt aktuell im Frühjahr somit eine stärkere Trockenheit auf. Da vor

allem die mittlere Temperatur im Frühling zugenommen hat, kann dies auf eine erhöhte Verdunstung zurückzuführen sein.

Regional kann der Jahresverlauf aber sehr unterschiedlich sein. So weisen zum Beispiel große Teile der Mittelgebirge (Bergisches Land, Sauer- und Siegerland, Weserbergland und Eifel) über das gesamte Jahr eine positive klimatische Wasserbilanz auf, jedoch schwanken die Werte stark zwischen bis zu 180 mm im Dezember und weniger als 30 mm im Juli (hier nicht dargestellt, siehe einzelne Monatskarten unter www.klimaatlas.nrw.de). Im Rheingraben treten hingegen bereits ab April größere Gebiete mit negativer Bilanz auf. Im Mai breiten sich diese entlang der Lippe aus. Die niedrigsten Werte werden im Juli erreicht.

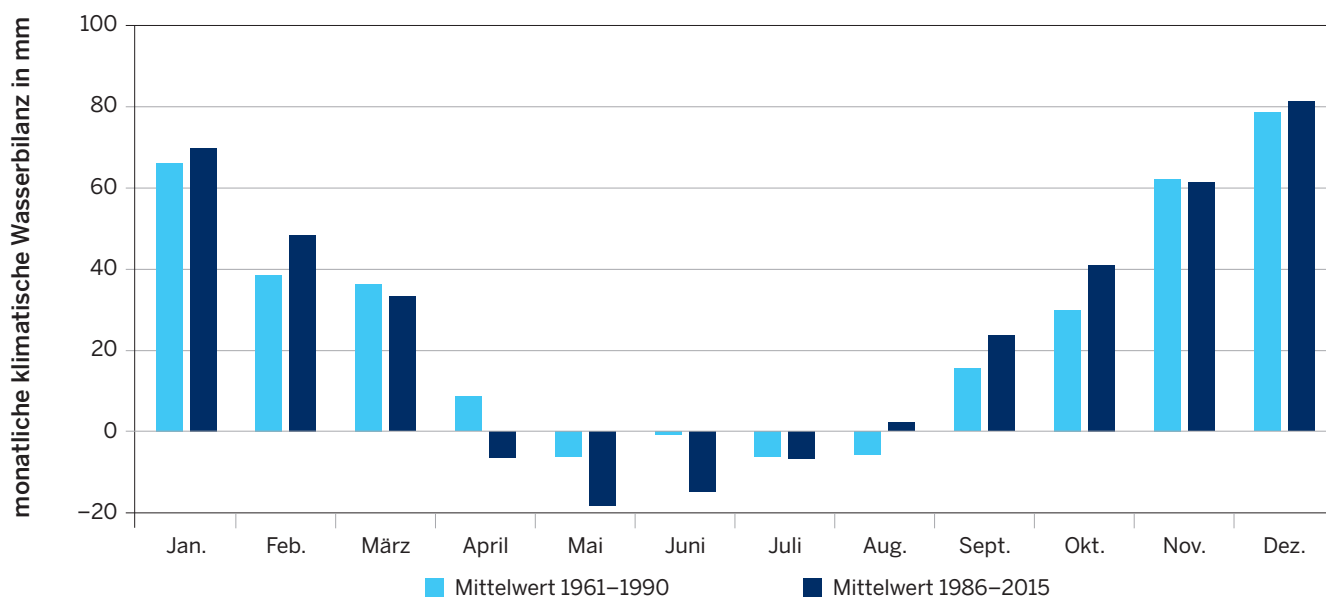


Abbildung 46: Jahresgang der mittleren monatlichen klimatischen Wasserbilanz als Gebietsmittel für NRW für die Zeiträume 1961–1990 und 1986–2015 (Datenquelle: DWD)

4.3 Grundwasserneubildung

Die Grundwasserneubildung wird als „Zugang von infiltriertem Wasser zum Grundwasser“ (= Sickerwasser, DIN 4049-3) definiert (siehe Abbildung 40). Somit wird mit Grundwasserneubildung der Anteil des Gesamtabflusses bezeichnet, der bis ins Grundwasser versickert. Die Grundwasserneubildung wird zum einen durch die Landnutzung und die Untergrundgegebenheiten beeinflusst, zum anderen spielen Niederschlagsverhältnisse und Verdunstungsprozesse eine Rolle. Steigende Temperaturen bewirken eine Zunahme der potenziellen Evaporation. Dies kann sich auf die Grundwasserneubildung auswirken. Die Grundwasserneubildung wird daher seit 2015 beispielhaft an der Lysimeterstation St. Arnold als ein Indikator im Klimafolgenmonitoring beobachtet und jährlich aktualisiert (www.klimafolgenmonitoring.nrw.de).

Die Karte zur Grundwasserneubildung (Abbildung 47) wurde mit Hilfe des Wasserhaushaltsmodelles mGROWA berechnet (HERRMANN et al. 2014). Sie zeigt, dass die räumliche Verteilung der Grundwasserneubildung in NRW eher heterogen ist und durch Untergrundeigenschaften beeinflusst wird. In den Tieflandbereichen erreicht die mittlere jährliche Grundwasserneubildung im Zeitraum 1971 bis 2000 meist Werte zwischen 50 und 300 mm/a. An Standorten mit kapillarem Aufstieg von Grundwasser kann die Grundwasserneubildung durch Grundwasserzehrung im Sommerhalbjahr negative Werte annehmen. Zusätzlich können auch künstliche Drainagen eine Grundwasserzehrung verursachen. In den Mittelgebirgen beeinflusst vor allem die hydraulische Durchlässigkeit des Gesteins die Grundwasserneubildung. Im rheinischen Schiefergebirge,

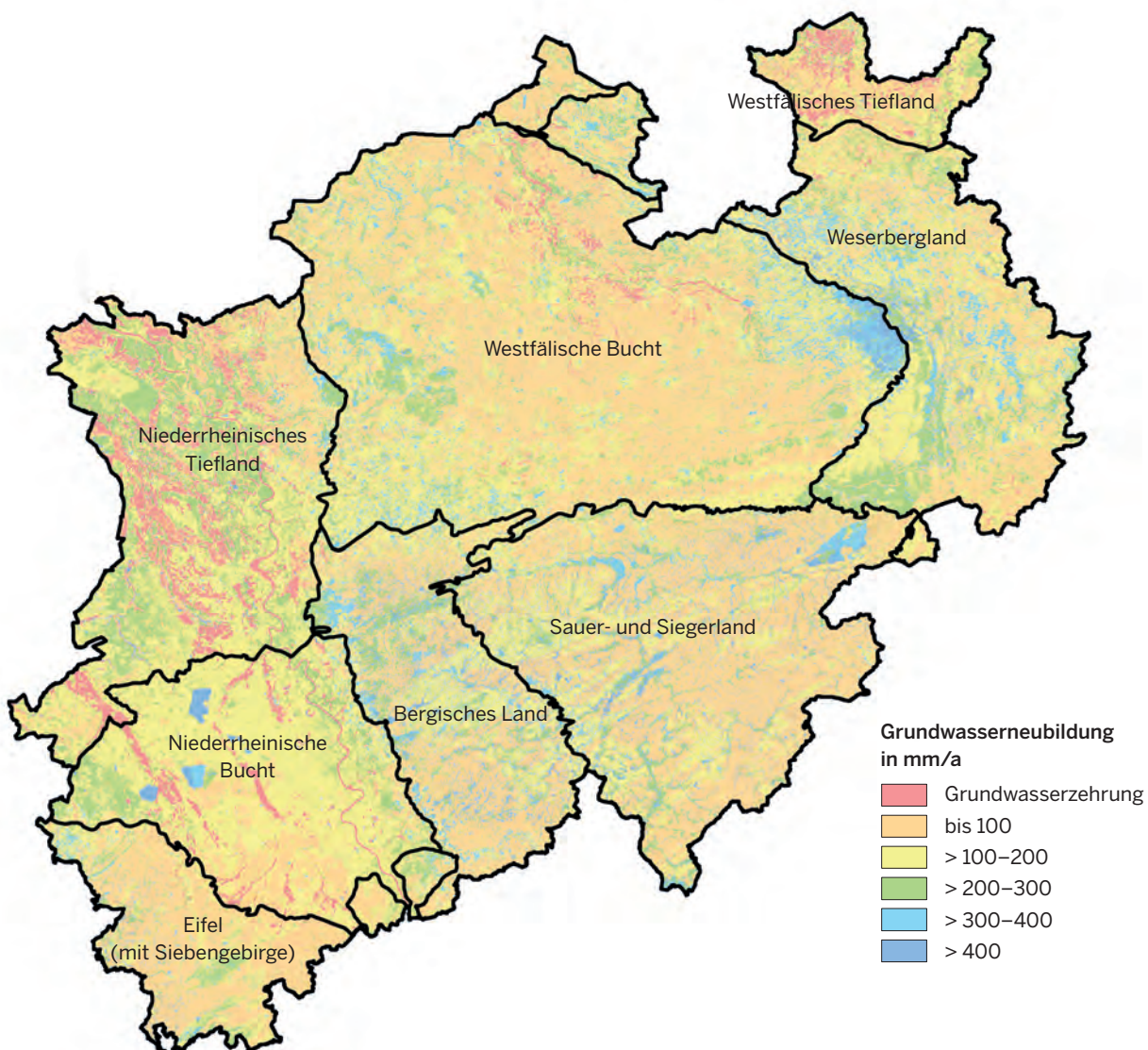


Abbildung 47: Mittlere jährliche Grundwasserneubildung in NRW für die KNP 1981–2010 simuliert mit mGROWA (Datengrundlage: DWD; Kartenquelle: HERRMANN et al. 2014)

das eine geringe Durchlässigkeit aufweist, beträgt sie 50 bis 100 mm/a. In Gebieten mit einer besseren hydraulischen Durchlässigkeit kann die Grundwasserneubildung auf 100 bis 300 mm/a ansteigen.

Eine zeitliche Veränderung der Grundwasserneubildung zeigen die Messungen an der Station St. Arnold, die seit 1966 mittels eines Lysimeters die Sickerwasserstände erfasst. Die mittlere jährliche Grundwasserneubildung ist seit 1966 um etwa 115 mm zurückgegangen (Differenz zwischen Anfang und Ende der eingezeichneten Trendlinie, Abbildung 48). Dieser Trend ist nach dem Mann-Kendall-Test statistisch signifikant. Der Einfluss des Niederschlags auf die Grundwasserneubildung wird im Jahr 1996 deutlich: Aufgrund der geringen Niederschläge zeigt auch

die Grundwasserneubildung mit 114 mm den niedrigsten Jahreswert der Zeitreihe. Trotzdem ist für den Niederschlag an der Station St. Arnold kein Trend nachweisbar. Daher kann die Abnahme der Grundwasserneubildung größtenteils mit einer erhöhten Verdunstung durch die klimawandelbedingte Temperaturerhöhung erklärt werden. Aufgrund der Komplexität des Themas sollten von diesem Standort jedoch keine allgemeinen Aussagen für ganz NRW abgeleitet werden.

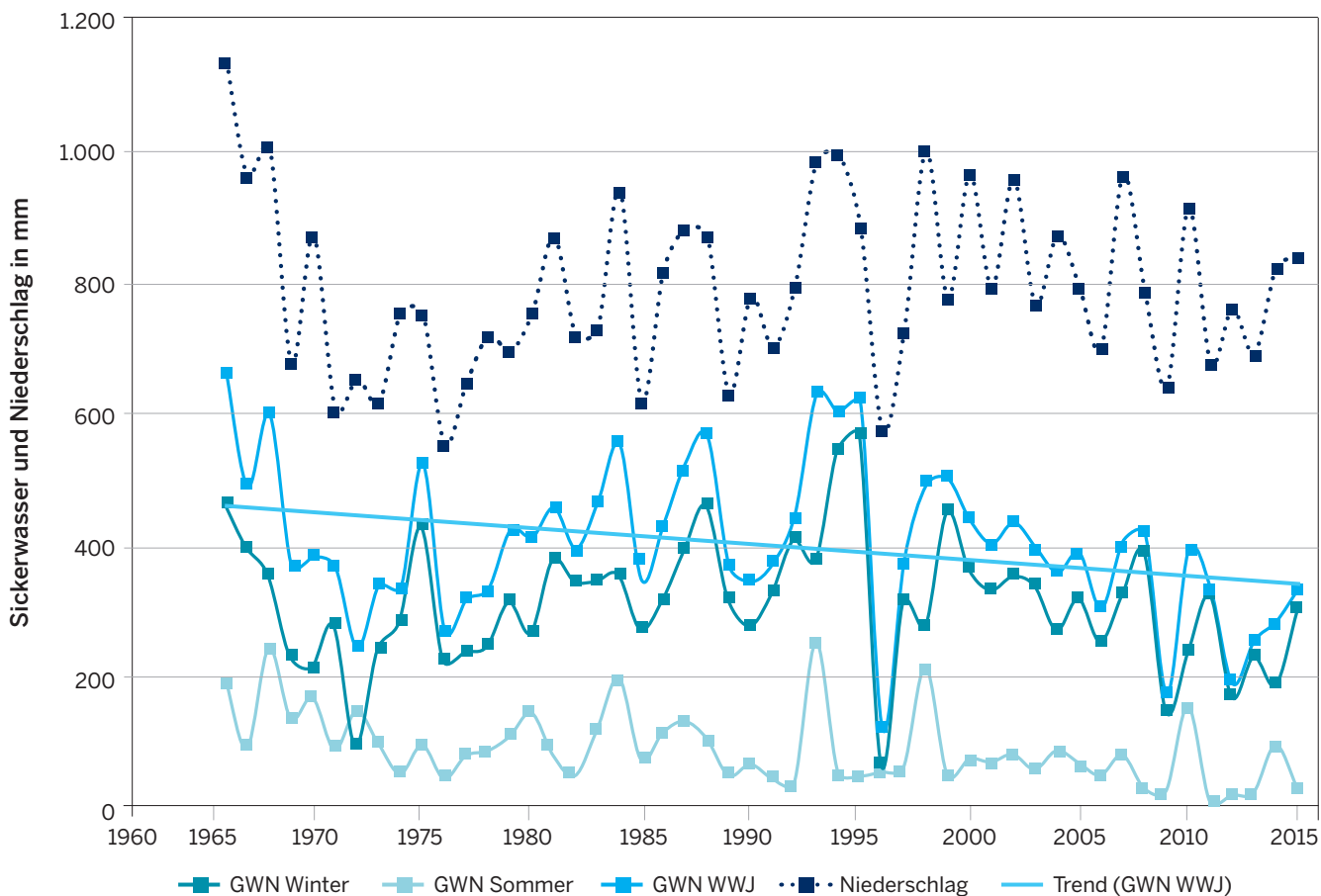


Abbildung 48: Mittlere Sickerwasserstände der Lysimeterstation St. Arnold im Zeitraum 1966–2015 für das hydrologische Sommerhalb-, Winterhalb- und Wasserwirtschaftsjahr (WWJ). Zusätzlich eingezeichnet sind die jährliche Niederschlagssumme an der Station sowie der lineare Trend für die jährliche Grundwasserneubildung (GWN).

4.4 Grundwasserstand

Wie viel Grundwasser sich in einem Gebiet neu bilden kann und welche Grundwasserstände sich dort einstellen, hängt von einer Vielzahl unterschiedlicher Einflussgrößen ab. Ändern sich die klimatischen Rahmenbedingungen, können sich die Grundwasserneubildung und in der Konsequenz auch der Grundwasserstand ändern. Dabei reagiert Grundwasser im Vergleich zu Oberflächengewässern eher träge und zeitlich verzögert. In den Grundwasserständen spiegeln sich demnach langfristige Änderungen der klimatischen Bedingungen wider. Dabei kann der Einfluss des Menschen das Signal sich verändernder Klimaparameter auf die Grundwasserstände überdecken, beispielsweise durch Grundwasserentnahmen oder Drainagen.

Die zeitliche Entwicklung des Grundwasserstandes wird exemplarisch an der Grundwassermessstelle Hamminkeln dargestellt. Die Station wird seit 2015 als ein Indikator im Klimafolgenmonitoring beobachtet und jährlich aktualisiert (www.klimafolgenmonitoring.nrw.de). Insgesamt wurden 29 langjährige Grundwassermessstellen des LANUV für den Zeitraum 1951 bis 2014 ausgewertet. Davon zeigten 21 Messstellen einen signifikant fallenden Trend für den mittleren Grundwasserstand im Wasserwirtschaftsjahr (November bis Oktober). Nur an zwei

Grundwassermessstellen konnte ein signifikant steigender Grundwasserspiegel nachgewiesen werden. Die Grundwassermessstelle Hamminkeln wurde exemplarisch für NRW ausgewählt, da der anthropogene Einfluss hier vergleichsweise gering ist und die Messwerte somit für eine Analyse der natürlichen Änderungen des Grundwasserstandes geeignet sind.

An den Messwerten der Grundwassermessstelle Hamminkeln ist zu erkennen, dass der Grundwasserstand seit Beginn der Messungen im Jahr 1951 um etwa 80 cm (Differenz zwischen Anfang und Ende der Trendlinie) gesunken ist (Abbildung 49). Der Trend der Messreihe ist nach dem Mann-Kendall-Test hochsignifikant.

Der Einfluss des Niederschlags auf den Grundwasserstand kann vor allem anhand der 1970er Jahre aufgezeigt werden. Diese waren besonders niederschlagsarm (siehe Kapitel 2.3, Abbildung 11 und Abbildung 13) und auch der Grundwasserstand lag in dieser Dekade besonders niedrig. Die Abnahme des Grundwasserstandes über den Gesamtzeitraum ist vermutlich, wie die Grundwasserneubildung auch (siehe Kapitel 4.3), auf die erhöhte Verdunstung und Grundwasserzehrung durch höhere Temperaturen zurückzuführen.

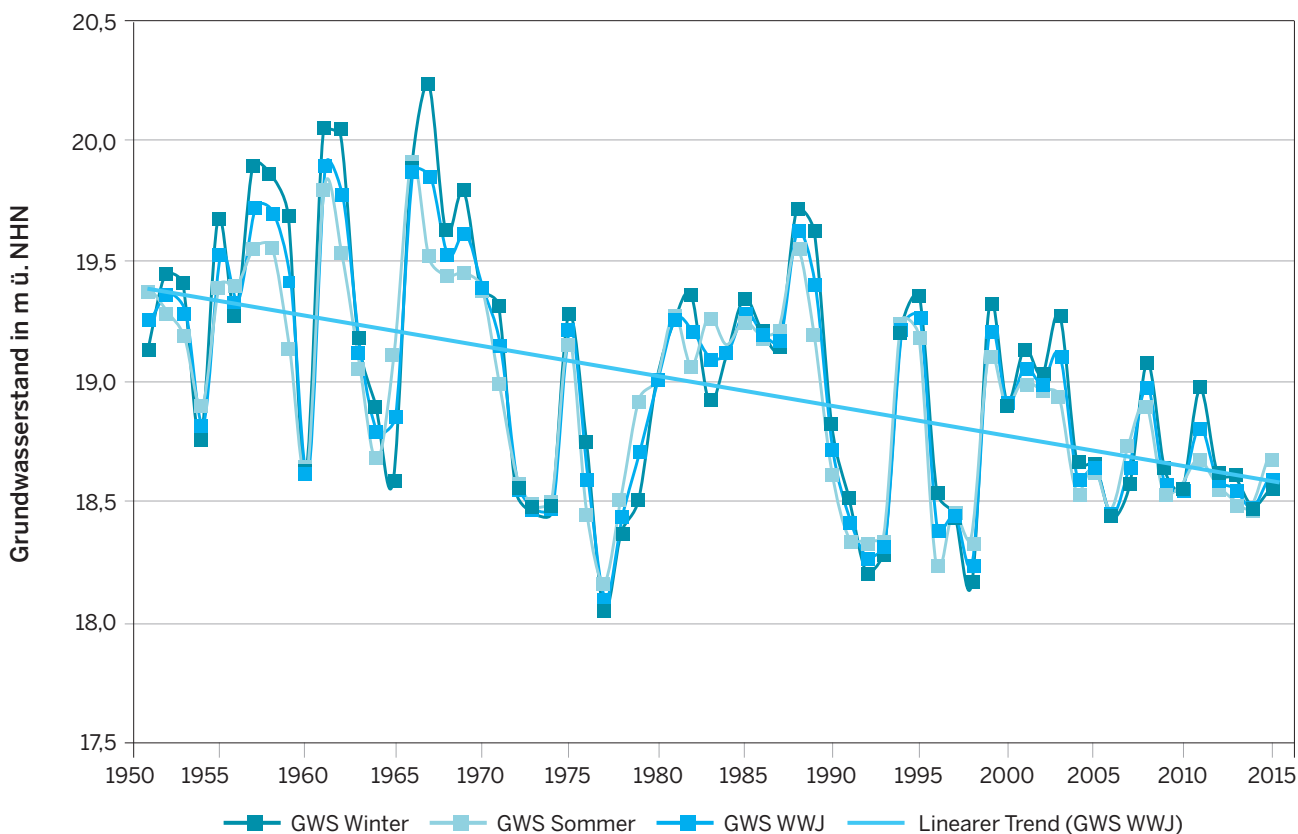


Abbildung 49: Jährlicher Grundwasserstand an der Station Hamminkeln im Zeitraum 1951–2015 für das hydrologische Winterhalb-, Sommerhalb- und Wasserwirtschaftsjahr

4.5 Gewässertemperatur

Höhere Lufttemperaturen wirken sich nicht nur über höhere Verdunstungswerte auf den Wasserhaushalt aus, sondern beeinflussen diesen auch durch steigende Wassertemperaturen. Die Wassertemperatur von Fließgewässern unterliegt, wie die Lufttemperatur auch, natürlichen Schwankungen im Tages- und Jahresverlauf. Zusätzlich kann die Wassertemperatur durch anthropogene Abwärmeeinleitung von Kraftwerken beeinflusst werden. Steigende Wassertemperaturen können sich auf der anderen Seite auf die Gewässerbiozönose, beispielsweise auf die Fischfauna, auswirken (siehe Kapitel 5.2.5).

Die zeitliche Entwicklung der Wassertemperatur wird am Beispiel der Station Kleve-Bimmen am Rhein dargestellt (Abbildung 50). An dieser Station werden die mittleren und maximalen Wassertemperaturen im Klimafolgenmonitoring als ein Indikator beobachtet und jährlich aktualisiert (www.klimafolgenmonitoring.nrw.de). Seit 1974 hat dort die Wassertemperatur um etwa 1,5 K zugenommen. Dieser Trend ist für diesen Zeitraum hochsignifikant. Die maximalen Wassertemperaturen haben mit 2,5 K sogar noch deutlicher zugenommen. Auch dieser Trend ist statistisch hochsignifikant.

Der Temperaturanstieg an der Station Kleve-Bimmen ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf eine Erhöhung der Lufttemperaturen infolge des Klimawandels zurückzuführen, da die anthropogenen Wärmeeinleitungen in den Rhein im Zeitraum 1989 bis 2004 abgenommen haben. Außerdem zeigten Auswertungen der Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) für den Zeitraum 1978 bis 2011 eine Temperaturerhöhung für Rekingen (Hochrhein) von 1,7 K, für Mainz (Oberrhein) von 1,3 K und für Koblenz (Mittelrhein) von 1,2 K. Für die Sommermonate liegen die Werte durchweg deutlich über 2 K (IKSR 2006 und 2013).

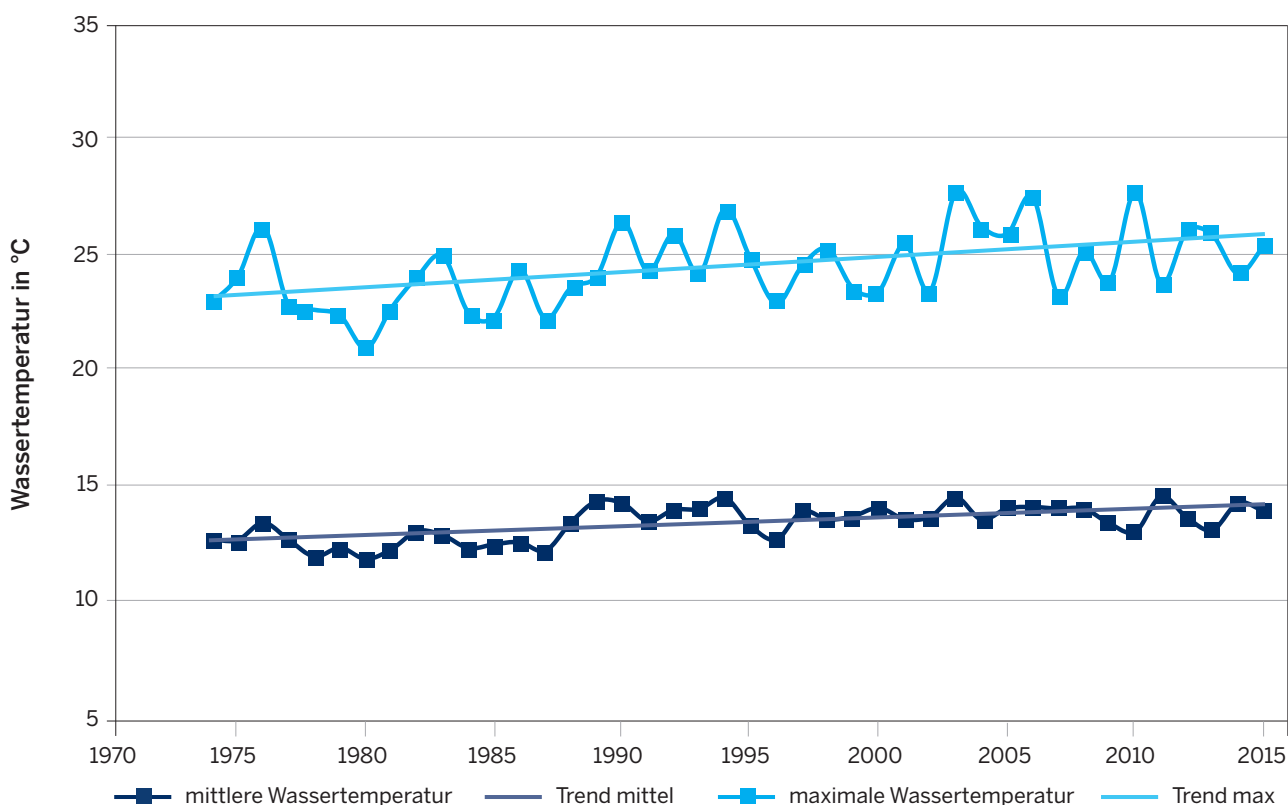


Abbildung 50: Mittlere und maximale jährliche Wassertemperatur an der Station Kleve-Bimmen im Zeitraum 1974–2015

4.6 Mittlerer Abfluss

Der Begriff Abfluss bezeichnet den oberirdischen Abfluss in Fließgewässern. Das natürliche Abflussgeschehen wird hier vor allem von der Menge und der jahreszeitlichen Verteilung der Niederschläge in den jeweiligen Einzugsgebieten bestimmt. Darüber hinaus spielen die Art (Regen oder Schnee) sowie die räumliche und zeitliche Verteilung der Niederschläge, die Morphologie der Einzugsgebiete sowie Verdunstungsprozesse eine Rolle. Auch der Mensch beziehungsweise Landnutzungsänderungen können das Abflussgeschehen beeinflussen. Somit kann sich der Klimawandel vor allem über jahreszeitliche Verschiebungen der Niederschläge (weniger Niederschlag im Sommer, mehr im Winter) und eine erhöhte Verdunstung auf den Abfluss auswirken.

Die zeitliche Entwicklung des mittleren jährlichen Abflusses wird exemplarisch am Pegel Feudingen/Lahn dargestellt. Dieser Pegel (Einzugsgebietsgröße 25,4 km²) dargestellt. Dieser Pegel ist weitestgehend anthropogen unbeeinflusst, sodass Veränderungen auf natürliche (klimatische) Prozesse zurückgeführt werden können. Anthropogen unbeeinflusst sind allerdings in der Regel eher Pegel mit einem geringen

Durchfluss und einem kleinen Einzugsgebiet. Der mittlere Abfluss am Pegel Feudingen/Lahn ist seit 2015 als ein Indikator im Umweltbereich „Wasser“ im Klimafolgenmonitoring aufgenommen und wird jährlich aktualisiert (www.klimafolgenmonitoring.nrw.de).

Seit 1951 hat der mittlere jährliche Abfluss am Pegel Feudingen/Lahn um ca. 0,15 Kubikmeter pro Sekunde (m³/s; ca. 21 %) abgenommen (Differenz zwischen Anfang und Ende der Trendlinie, Abbildung 51). Dieser Trend ist statistisch signifikant. Um die Einflussfaktoren auf das Abflussverhalten besser verdeutlichen zu können, ist in Abbildung 51 zusätzlich zum mittleren jährlichen Abfluss die jährliche Niederschlagssumme im Einzugsgebiet des Pegels dargestellt. Durch Schließung der Wasserbilanzgleichung kann daraus die Verdunstung plausibel abgeschätzt werden (ebenfalls Abbildung 51). Der Einzugsgebietsniederschlag zeigt in der Zeitreihe eine leichte Zunahme (statistisch nicht signifikant). Da gleichzeitig der Abfluss abgenommen hat, kann dies auf eine Zunahme der Verdunstung seit Mitte der 1980er Jahre zurückzuführen sein.



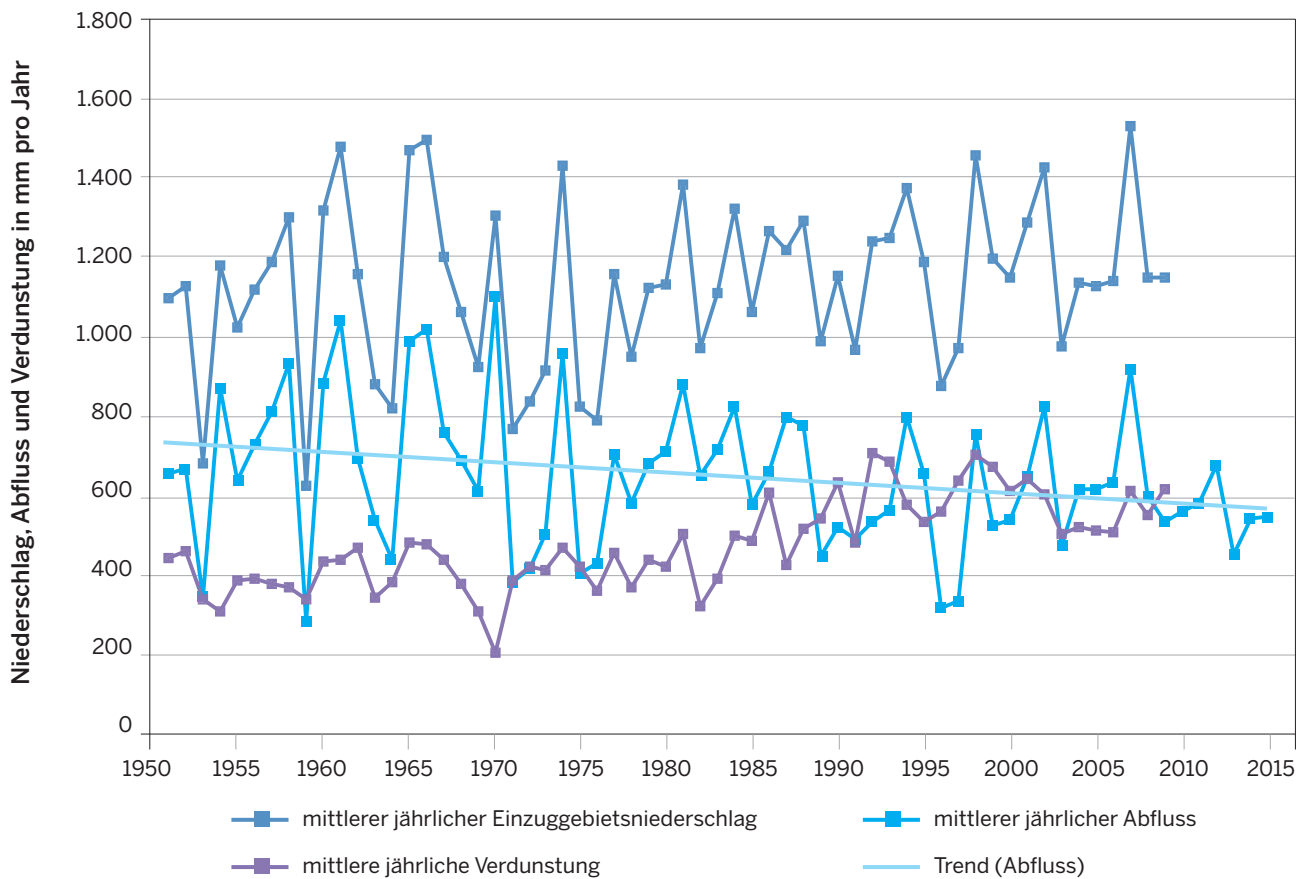


Abbildung 51: Mittlerer jährlicher Abfluss (Kalenderjahr) am Pegel Feudingingen/Lahn im Zeitraum 1951–2014, ergänzt um den jährlichen Einzugsgebietsniederschlag im Zeitraum 1951–2009 sowie die daraus berechnete Verdunstung



5 Auswirkungen des Klimawandels auf die Biodiversität

Die globale Erwärmung hat bereits messbare Spuren in der Natur von NRW hinterlassen. Veränderungen der Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse sowie die zunehmende Häufigkeit von Extremereignissen haben einen direkten Einfluss auf Jahresrhythmus, Verhalten, Fortpflanzung, Konkurrenzfähigkeit und Nahrungsbeziehungen von Arten. Arealverschiebungen einzelner Arten und ganzer Ökosysteme können die Folge sein. So haben beispielsweise die angestiegenen Temperaturen zu einer Veränderung der phänologischen Jahreszeiten und einer Verlängerung der Vegetationsperiode geführt. Wärmeliebende Arten breiten sich aus, während sich das Verbreitungsbild von kälteliebenden Arten eher ausdünnert.



Das Wichtigste vorab:

- Die **Vegetationszeit** hat sich zwischen 1951 und 2015 um 15 Tage verlängert.
- Beginn und Dauer der **phänologischen Jahreszeiten** haben sich verändert.
- Bei der **Buche** verschieben sich die **phänologischen Phasen**.
- Der **Grünspecht** hat von milderen Wintern profitiert und sich in NRW ausgebreitet.
- Das Verbreitungsbild **wärmeliebender Vogelarten** verdichtet sich, während kälteliebenden Arten eher abnehmen.
- **Wildtiere** wie der Rothirsch profitieren von milden Wintern.
- Der **photoperiodisch gesteuerte Fortpflanzungsrhythmus** beim Reh kann sich an veränderte Vegetationsphasen nicht anpassen.
- Steigende Jahresmitteltemperaturen und vermehrte Starkregenereignisse wirken sich auf die Fitness von **Fischlebensgemeinschaften** aus.
- **Lebensraumtypen** können durch den Klimawandel gefördert oder beeinträchtigt werden.
- In NRW haben sich bereits viele **wärmeliebende Neobiota** etabliert.
- Bestimmte **Krankheitserreger und Überträger von Krankheiten** können durch steigende Temperaturen begünstigt werden.

Tabelle 6: Mittelwerte für die untersuchten Parameter der Biodiversität und deren Änderungen über den jeweiligen Messzeitraum (Datenquellen: DWD & LANUV)

Parameter	Messreihe	Einheit	Klimanormalperioden				Änderung Zeitreihe	Trend Zeitreihe	
			gesamte Messreihe	1951– 1980	1961– 1990	1971– 2000			1981– 2010
Phänologie									
Vegetationsperiode	1951–2015	Tage	210,7	206,9	208,2	212,7	213,7	+ 14,6	h. s.
Frühling	1951–2015	Tage	102,2	101,2	101,5	103,7	102,3	n. b.	n. s.
Sommer	1951–2015	Tage	90,2	90,9	88,8	88,9	89,2	– 3,8	s.
Herbst	1951–2015	Tage	65,4	58,0	62,4	66,3	70,8	+ 28,0	h. s.
Winter	1951–2015	Tage	107,1	114,9	112,3	106,1	102,7	– 31,2	h. s.
1. Heuschnitt	1951–2015	Tag im Jahr	153,5	156,4	154,3	152,2	150,9	– 9,7	h. s.
1. Silageschnitt	1991–2015	Tag im Jahr	135,6	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	– 9,6	s. s.
Phänologie Buche									
Austrieb	2001–2015	Tag im Jahr	120,5	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. s.
Blattverfärbung	2001–2015	Tag im Jahr	288,5	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. s.
Vegetationszeit	2001–2015	Tage	168,0	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. s.
STI									
wärmeliebend	2006–2015	Index	104,8	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	+ 9,6	h. s.
kälteliebend	2006–2015	Index	98,4	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	+ 4,9	s. s.
neutral	2006–2015	Index	102,6	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	– 2,8	h. s.

Verwendete Abkürzungen: STI = Species Temperature Index, n. b. = nicht berechnet, da Werte nicht verfügbar oder Trend nicht signifikant, s. = signifikant, s. s. = sehr signifikant, h. s. = hochsignifikant, n. s. = nicht signifikant.

5.1 Phänologie

Die Phänologie ist die Lehre vom Einfluss des Wetters, der Witterung und des Klimas auf den jahreszeitlichen Entwicklungsgang und die Wachstumsphasen der Pflanzen und Tiere (SCHIRMER et al. 1987). Sie bewegt sich damit im Grenzbereich zwischen Biologie und Klimatologie. Zu den phänologischen Ereignissen zählen beispielsweise im Frühjahr das Sprießen und Blühen von Pflanzen oder die Zugzeiten von wandernden Vögeln und Schmetterlingen. Phänologische Phasen werden hauptsächlich durch Temperatur und Strahlung gesteuert. Daneben wirken sich weitere Umwelteinflüsse, wie biotische und edaphische Faktoren oder die Wasserversorgung, auf ihre Abfolge aus.

Anders als direkte Temperaturmessungen spiegelt die Phänologie also eine Reaktion der Natur auf ihre Umwelt wider. Daher ist sie ein wichtiger und besonders sensibler Bioindikator für den Klimawandel. Aus diesem Grund werden eine Reihe phänologischer Indikatoren seit Einrichtung des Klimafolgenmonitoring in verschiedenen Umweltbereichen (Ökosysteme und Biodiversität, Land- und Forstwirtschaft) beobachtet und jährlich aktualisiert (www.klimafolgenmonitoring.nrw.de).

5.1.1 Beginn und Dauer verschiedener Phänophasen

Die Vegetationsperiode bezeichnet den sich wiederholenden Jahresteil, in dem die Pflanzen photosynthetisch aktiv sind, also wachsen, blühen und Früchte tragen. Ihre Dauer wird durch die Zeitspanne zwischen dem (relativ frühen)

Blühbeginn der Salweide und der Blattverfärbung der Stieleiche als phänologischer Zeiger für den Eintritt des Spätherbstes erfasst. In Mitteleuropa zeichnen sich vor allem die Frühlingsphasen durch eine starke Korrelation mit der Temperatur aus (maßgeblich ist die Temperatur der einer Entwicklungsphase vorausgehenden zwei bis drei Monate). Weitere Einflussfaktoren sind die Tageslichtlänge und die Zusammensetzung des Lichtspektrums. Der Eintritt der Herbstphasen dagegen wird von zahlreichen anderen Faktoren (zum Beispiel Niederschlagsmenge im Sommer, Einstrahlung) mitbestimmt.

Der DWD erhebt deutschlandweit Beobachtungsmeldungen aus der Natur. In NRW umfasst das Beobachtungsnetz über den gesamten Zeitraum seit 1951 etwa 700 verschiedene Stationen, von denen derzeit noch 118 betrieben werden. An etwa 90 Prozent dieser Stationen werden Daten zur Vegetationsperiode erhoben.

Die Länge der Vegetationsperiode zeigt die für Klimagrößen typischen witterungsbedingten jährlichen Schwankungen (Abbildung 52). Die Trendanalyse des Zeitraums von 1951 bis 2015 ergibt, dass sich die Vegetationsperiode in NRW um insgesamt etwa 15 Tage verlängert hat (Differenz zwischen Anfang und Ende der Trendlinie und Tabelle 6). Dieser Trend ist nach Mann-Kendall statistisch hochsignifikant.

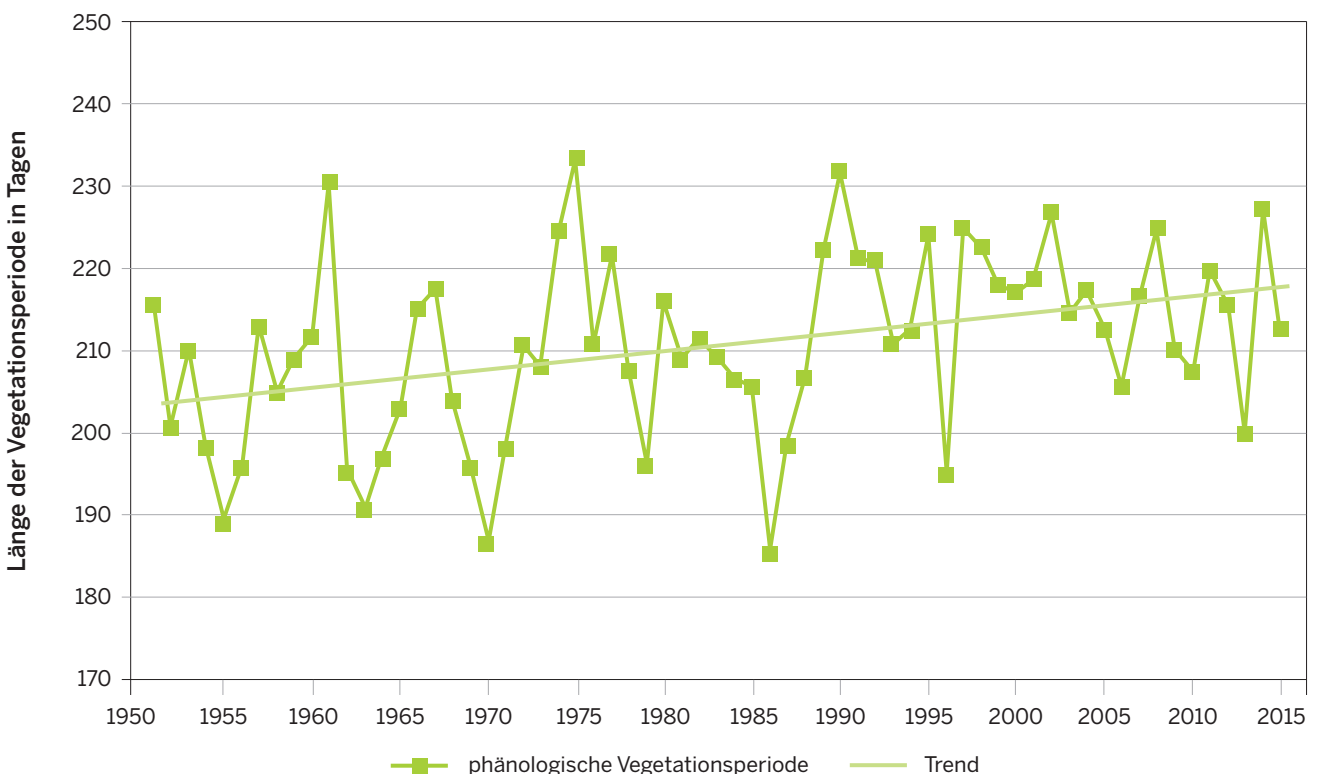


Abbildung 52: Länge der Vegetationsperiode (Blühbeginn der Salweide bis Blattverfärbung Stieleiche) in NRW für den Zeitraum 1951–2015 (Datenquelle: DWD)

Tabelle 7: Phänophasen der Vegetations- und Jahreszeiten in NRW – Vergleich der mittleren Eintrittsdaten der KNP 1951–1980 und 1981–2010 (Datenquelle: DWD)

phänologische Vegetationsperiode	Pflanze	phänologische Phase	Eintrittstag 1951–1980	Eintrittstag 1981–2010
Beginn	Salweide	Beginn der Blüte	21. März	18. März
Ende	Stieleiche	Blattverfärbung	14. Oktober	17. Oktober
phänologische Jahreszeit				
Vorfrühling	Hasel	Beginn der Blüte	24. Februar	14. Februar
Frühsommer	Schwarzer Holunder	Beginn der Blüte	05. Juni	27. Mai
Frühherbst	Schwarzer Holunder	erste reife Früchte	04. September	25. August
Winter	Stieleiche*	Blattfall	01. November	03. November

* = der Blattfall Stieleiche wurde für die Jahre 1956–1991 extrapoliert

Bei Betrachtung der Mittelwerte beider sich nicht überschneidender Klimanormalperioden im Messzeitraum zeigt sich, dass von 1951 bis 1980 der Blühbeginn der Salweide im Mittel um den 21. März lag, zwischen 1981 und 2010 aber bereits um den 18. März einsetzte (Tabelle 7). Die Blattverfärbung der Stieleiche begann hingegen in der aktuellen Klimanormalperiode im Mittel zwei Tage später als im Zeitraum 1951 bis 1980. Die Verlängerung der Vegetationsperiode hat demnach zwei Ursachen: auf der einen Seite die Vorverlegung des Beginns, auf der anderen ihr verspätetes Ende.

Die phänologischen Jahreszeiten werden am Eintrittszeitpunkt typischer Leitpflanzenphasen festgemacht. So beginnt der Frühling mit der Blüte der Hasel, der Sommer mit der Blüte des Holunders (Tabelle 7). Die Phasen zeigen dabei eine enge Korrelation mit den mittleren Lufttemperaturen der Monate vor dem jeweiligen Phaseneintritt. Beim phänologischen Frühjahr, Sommer und Herbst bedingen erhöhte Durchschnittstemperaturen eine Vorverlegung der Phasen. Der Spätherbst (Blattverfärbung der Stieleiche und gleichzeitig Ende der Vegetationsperiode) verschiebt sich jedoch nach hinten. Dadurch verzögert sich auch der Blattfall der Stieleiche und damit der Beginn des phänologischen Winters.

Auch die Länge der einzelnen phänologischen Jahreszeiten haben sich verändert, was besonders anschaulich an der so genannten „doppelten phänologischen Uhr“ in Abbildung 53 abzulesen ist. Es ist deutlich zu sehen, dass sich in der Klimanormalperiode 1981 bis 2010 vor allem Winter und Herbst im Vergleich zur Klimanormalperiode 1951 bis 1980 verändert haben: Der Herbst dauerte in der letzten Klimanormalperiode im Mittel fast 13 Tage länger, während der Winter etwa zwölf Tage kürzer war. Damit haben sich die Längen der einzelnen Jahreszeiten einander angenähert: 1951 bis 1980 war der Winter mit 115 Tagen



Mit der Blüte des Holunders beginnt der Sommer

die mit Abstand längste Jahreszeit und damit fast doppelt so lang wie der Herbst, der die kürzeste phänologische Jahreszeit darstellte. Zwischen 1981 bis 2010 dauerten Winter und Frühling im Mittel 103 beziehungsweise 102 Tage, gefolgt vom Sommer mit 89 Tagen und dem Herbst mit 71 Tagen. Der Beginn von Frühling, Sommer und Herbst hat sich deutlich nach vorne verlagert, die Länge von Frühling und Sommer sich aber kaum verändert.

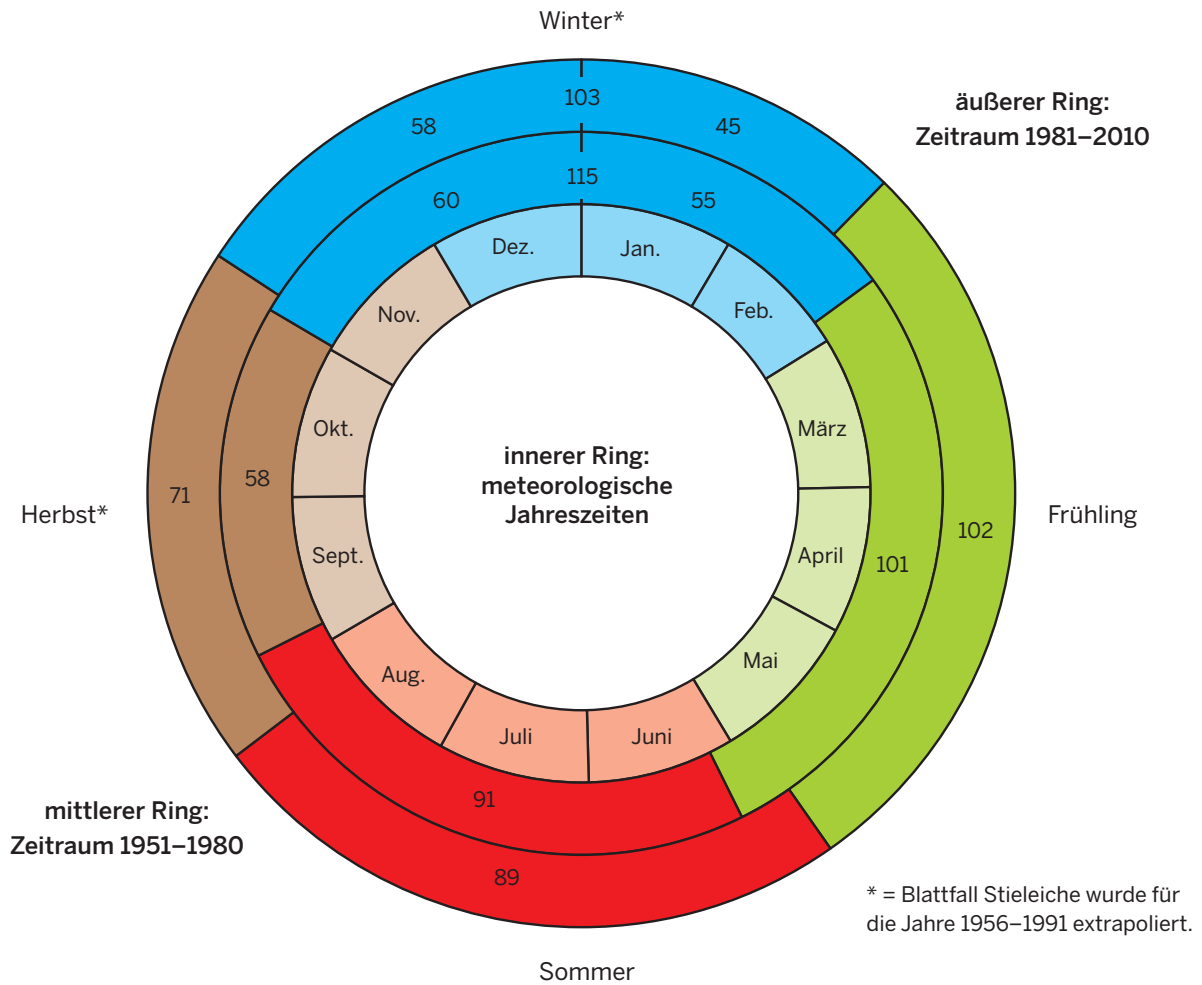


Abbildung 53: Phänologische Jahreszeiten in NRW – Vergleich der KNP 1951–1980 und 1981–2010 (Datenquelle: DWD)

5.1.2 Beobachtungen an der Buche

Die Buche ist in NRW die am weitesten verbreitete Baumart. Ihr Vorkommen erstreckt sich vom Flachland bis in die Hochlagen des Sauerlandes. Da sie in der Vergangenheit keinen Züchtungsprogrammen unterlegen hat und in der Regel auf natürlichem Wege verjüngt wird, kann ihr Vorkommen im Wesentlichen als autochthon angesehen werden. So eignet sie sich in besonderem Maße als Indikator, um die Folgen des Klimawandels aufzuzeigen, vor allem wenn die Beobachtungen auf Langfristigkeit ausgelegt sind. Daher wird im Klimafolgenmonitoring NRW der mittlere Austrieb sowie die Vegetationszeit der Buche als ein Indikator in der Kategorie „Forstwirtschaft“ beobachtet und jährlich aktualisiert (www.klimafolgenmonitoring.nrw.de).

Im Rahmen des forstlichen Umweltmonitorings führt das LANUV seit 2001 auf sechs Dauerbeobachtungsflächen phänologische Beobachtungen an Buchen durch, um die Reaktionen des Waldes auf den Klimawandel darzustellen (Abbildung 54). Auf den Flächen werden an insgesamt 222 Einzelbäumen phänologische Daten erhoben, aus denen jährlich ein mittlerer Austriebs- und Verfärbungstermin sowie die Dauer der Vegetationszeit berechnet werden. Im Gegensatz zum DWD, der phänologische Untersuchungen an Einzelbäumen in der freien Landschaft oder im siedlungsnahen Raum durchführt, werden hier geschlossene Waldbestände beobachtet. Dies entspricht dem natürlichen Vorkommen des Waldbaums Buche: Würde der Mensch überhaupt keinen Einfluss mehr auf die Natur nehmen, würden sich auf fast allen Standorten in NRW dichte Buchenwälder einstellen.



Austrieb der Buche



Blattverfärbung der Buche

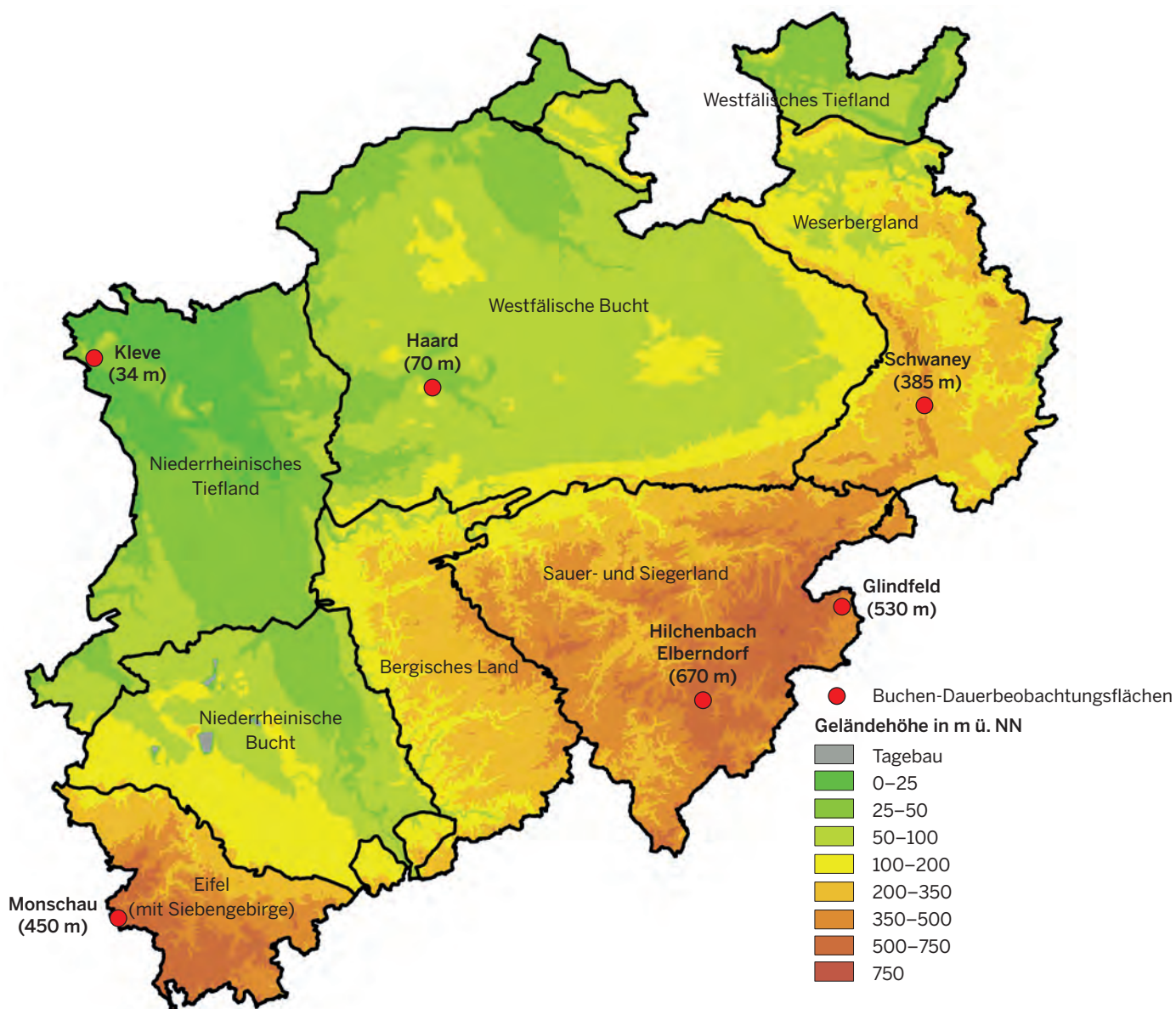


Abbildung 54: Lage und Namen der Buchen-Dauerbeobachtungsflächen NRW (Kartengrundlage: Geobasis NRW)

Das Austriebsverhalten der Buche auf den Dauerbeobachtungsflächen schwankt – insbesondere seit 2007 – stark (Abbildung 55). Dennoch ergibt sich während der letzten 15 Jahre ein tendenziell früherer Austriebstermin von etwa neun Tagen. Der Trend ist nach dem Mann-Kendall-Test allerdings statistisch nicht signifikant und daher auch nicht in Abbildung 56 eingezeichnet. Diese zeigt neben dem Blattaustrieb der Buche auch die Blattverfärbung und die Länge der Vegetationszeit.

Jahre mit frühem Austrieb zeichnen sich durch hohe Temperaturen im Frühjahr und durch eine in der Regel starke Blüte der Buche aus. Offensichtlich führen die Blütenanlagen, die sich in den gleichen Knospen wie die Blattanlagen befinden, zu einem zusätzlichen Austriebsimpuls. Darüber hinaus wird auch die Anlage der Blütenknospen, die bereits im Frühsommer des Vorjahres erfolgt, durch die Temperatur beeinflusst. Hohe Temperaturen in diesem Vorjahreszeitraum haben in den vergangenen Jahren zu einer Häufung von Blüte- beziehungsweise Fruchtjahren geführt. Insofern lassen die Ergebnisse darauf schließen, dass die Klimaveränderung einen zunehmenden Einfluss auf das phänologische Geschehen bei der Buche gewinnt.

Die herbstliche Blattverfärbung wird wesentlich weniger durch die Temperatur gesteuert. Hier spielen eher genetische Faktoren, Sommertrockenheit und zurückgehende Tageslängen eine Rolle. Auf den Dauerbeobachtungsflächen schwankt der Verfärbungstermin daher auch wesentlich geringer als dies beim Austrieb der Fall ist (Abbildung 55). Ein Trend lässt sich nicht nachweisen. Jahre mit starker Fruchtbildung (Fruktifikationsjahre) wie 2009, 2011 oder 2014 haben offensichtlich keinen Einfluss auf die Verfärbung. Im Jahr 2003 ist bei außergewöhnlicher Trockenheit ein durchschnittlicher Verfärbungstermin festzustellen. Im Jahr 2011, das zu Beginn der Vegetationsperiode sehr trocken war, zeigt sich bei gleichzeitig frühem Austrieb eine sehr zeitige Verfärbung. Der Zeitpunkt der Trockenphase innerhalb der Vegetationszeit scheint also ebenfalls einen Einfluss auf die Blattverfärbung zu haben.

Die Länge der Vegetationszeit der Buche errechnet sich als Anzahl der Tage zwischen dem mittleren Blattaustrieb und der mittleren Blattverfärbung. Da sich der Zeitpunkt der Blättentfaltung tendenziell verfrüht, der Termin der Verfärbung jedoch annähernd gleich bleibt, ergibt sich im



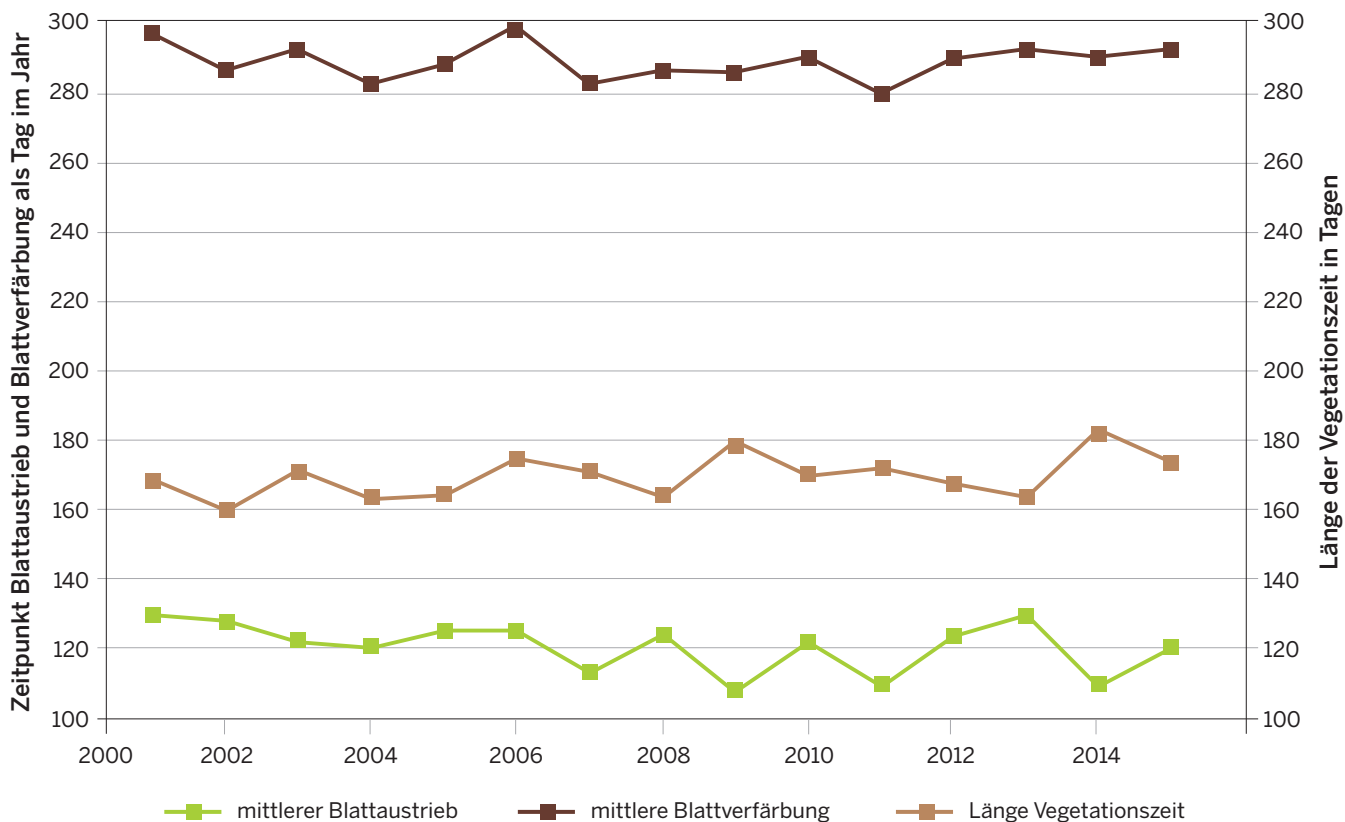


Abbildung 55: Mittlere phänologische Ereignisse der Buche im Mittel der sechs Dauerbeobachtungsflächen in NRW



Trend eine zunehmende Tendenz bei der Vegetationszeit um etwa acht Tage im Zeitraum 2001 bis 2015 (ebenfalls Abbildung 55). Diese ist im Wesentlichen durch hohe Frühjahrstemperaturen bedingt.

Die aktuellen Veränderungen bei den phänologischen Ereignissen der Buche können als Reaktion auf die Klimaerwärmung verstanden werden. Daten der Waldzustandserhebung zeigen bei der Buche darüber hinaus in den vergangenen 30 Jahren einen sich tendenziell verschlechternden Kronenzustand (MKULNV 2015 b). Diese Entwicklung erfährt in den Blüte- und Fruchthahren jeweils einen deutlichen Schub. So ist hinsichtlich des Blattaustriebes und der Länge der Vegetationszeit einerseits eine Anpassung an den Klimawandel, hinsichtlich des Kronenzustandes jedoch eine abnehmende Vitalität, bedingt durch die temperaturinduzierte übermäßige Blüten- und Fruchtbildung, festzustellen.

5.2 Tierpopulationen

Das Klima ist ein bestimmender Faktor für die Entwicklung und Verbreitung von Tier- und Pflanzenarten. Je weniger flexibel eine Art auf sich verändernde klimatische Bedingungen reagiert, desto stärker wird sie in ihrem Bestand zurückgehen. Gleichzeitig können Arten, die besser an die sich wandelnden klimatischen Verhältnisse angepasst sind, ihre Populationen vergrößern oder in neue Gebiete einwandern. Oft ist es schwierig zu beurteilen, ob Veränderungen durch den Klimawandel oder andere Faktoren, beispielsweise durch die Landnutzung, bedingt sind. Zurzeit übt in NRW in der Regel die Landnutzung im Vergleich zum Klimawandel den größeren Einfluss auf die Verbreitung von Arten aus.

5.2.1 Bestandsentwicklung beim Grünspecht

Für Standvögel, d. h. für Vogelarten, die ganzjährig in NRW leben, ist der Winter die Jahreszeit mit der höchsten Mortalität. Durch mildere Winter als Folge der Klimaerwärmung kann sich die Überlebenswahrscheinlichkeit bei Standvögeln verbessern was zur Folge hat, dass ihre Bestände ansteigen.

Die sogenannte „Kälteempfindlichkeit“ ist bei Vogelarten sehr unterschiedlich ausgeprägt. Während zum Beispiel der Schwarzspecht als recht kälteresistent gilt, sind vom Grünspecht in Kältewintern (beispielsweise 1962/63 oder 1978/79) massive Bestandseinbrüche dokumentiert, die erst nach Jahren wieder ausgeglichen werden konnten. Der Grünspecht als sogenannter Erdspecht ernährt sich auch im Winter vornehmlich von Erdameisen. Er ist kaum in der Lage bei längeren Frostperioden mit hohen Schnee-

lagen auf andere Nahrung auszuweichen. Vom Ausbleiben derartiger extremer Kältewinter konnte der Grünspecht in den letzten Jahren profitieren und seinen nordrhein-westfälischen Bestand kontinuierlich erhöhen. Dies führte auch zu einer deutlichen Arealausweitung in NRW, was im Vergleich der beiden Verbreitungsdichtekarten aus Daten der Ökologischen Flächenstichprobe (ÖFS) für die Jahre 2006 und 2015 deutlich wird (Abbildung 56).

Abbildung 56 zeigt, dass der Grünspecht 2006 vornehmlich in den wärmebegünstigten Regionen des Rheintals und im Ballungsraum Ruhrgebiet seine Verbreitungsschwerpunkte hatte. Das Rheintal zeichnet sich durch höhere Jahresmitteltemperaturen und weniger Eis- und Frosttage als der Rest NRWs aus (siehe Kapitel 2.1 und 2.2). Bedingt durch stadtklimatische Effekte sind darüber hinaus Ballungsräume wie das Ruhrgebiet durch höhere Temperaturen als das Umland geprägt (siehe Kapitel 3) und damit im Winter weniger Frost ausgesetzt. Diese milderen Bedingungen haben den Grünspecht in den genannten Regionen in der Vergangenheit begünstigt.

Zwischen 2006 und 2015 konnte der Grünspecht auf der einen Seite seine Bestände in den Verbreitungsschwerpunkten des Rheinlandes und des Ruhrgebietes deutlich verdichten. Auf der anderen Seite ist ihm in diesem Zeitraum aber auch die Wieder- beziehungsweise Neubesiedlung der unteren und mittleren Bergregionen gelungen. So wurde er 2015 in NRW bis in Höhen von 600 m nachgewiesen. Der Grünspecht hat damit von einer Häufung relativ milder Wintern zwischen 2006 und 2015 profitieren können.

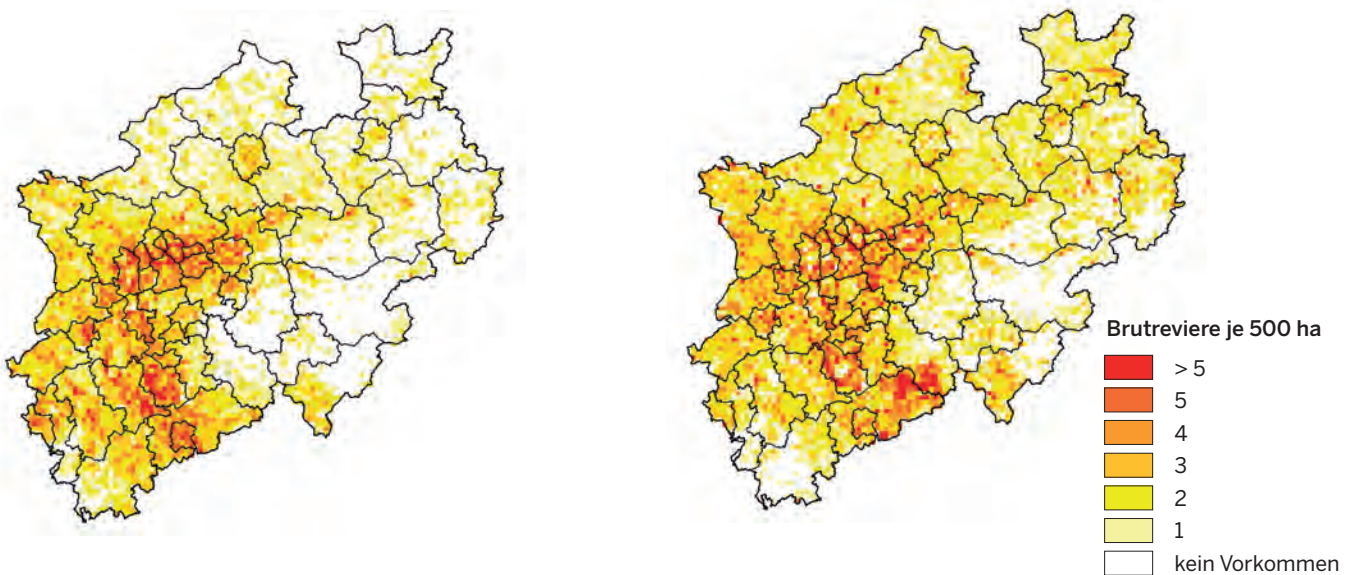


Abbildung 56: Verbreitung-Dichtekarten des Grünspechtes in 2006 (links) und 2015 (rechts). Das Brutrevier des Grünspechtes ist zwischen 50 und 200 ha groß, vereinzelt auch größer (Datenquelle: ÖFS, Kartengrundlage: Geobasis NRW).

5.2.2 Bestandsentwicklung ausgewählter Brutvogelarten

Tier- und Pflanzenarten reagieren je nach Sensitivität unterschiedlich auf Veränderungen des Klimas. Wie kaum eine andere Tiergruppe werden aber speziell Brutvogelarten durch ihr zum Teil ausgeprägtes Zugverhalten und den damit verbundenen jährlichen Aufenthaltswechseln bis über Tausende von Kilometern sehr unterschiedlich vom Klimawandel beeinflusst. Um den Einfluss von Klimaveränderungen auf Vögel zu untersuchen, entwickelten DEVIKTOR et al. im Jahre 2008 den Community Temperature Index (CTI). Er bildet Verschiebungen in Artengemeinschaften durch Änderungen der Temperatur ab. Der CTI basiert auf so genannten Species Temperature Index-Werten (STI), die jeweils die mittlere Temperatur eines Verbreitungsgebietes einer Art in Europa wiedergeben. Im Klimafolgenmonitoring NRW wird die Verbreitung wärmeliebender Vogelarten als ein Indikator in der Kategorie „Ökosysteme und Biodiversität“ beobachtet und jährlich aktualisiert (www.klimafolgenmonitoring.nrw.de).

Auf die Verbreitung (Areal) und die Populationsgrößen von Brutvogelarten hat die Intensität der Landnutzung nach wie vor einen dominanten Einfluss. Daneben wirkt nach derzeitigem Kenntnisstand der Klimafaktor als mehr oder weniger großer zusätzlicher Indikator. Beide Einflüsse

sind nur schwer voneinander zu trennen, was die Analyse der Effekte von Klimaveränderungen auf die Biodiversität anspruchsvoll werden lässt.

In Abbildung 57 wurde das STI-Modell auf Grundlage der landesweit repräsentativen Brutvogelarten aus der ÖFS für NRW angewendet. Dabei werden 30 Arten, die relativ hohe durchschnittliche Temperaturwerte (über 13 °C) von Arealen bevorzugen, in einer Gruppe zusammengefasst. Hierzu zählen beispielsweise der Grünspecht, der Pirol oder der Steinkauz. Eine weitere Gruppe wird von 20 Arten gebildet, die eher in Arealen mit kühleren Bedingungen vorkommen (unter 11 °C). Innerhalb dieser Gruppe befinden sich zum Beispiel das Wintergoldhähnchen, der Tannenhäher oder die Weidenmeise. Daneben wird eine Gruppe mit Arten, die einen mittleren STI-Wert aufweisen, identifiziert (beispielsweise Kohlmeise, Buchfink, Amsel und Mönchsgrasmücke).

Die Abbildung 57 zeigt, dass sich die wärmeliebenden Arten im Mittel in NRW ausbreiten, während die eher kälteliebenden Arten zurückgehen. Insgesamt führt dies dazu, dass sich der CTI seit 2006 erhöht. Dieser Befund deutet darauf hin, dass sich möglicherweise auch in NRW im Mittel die Brutareale beziehungsweise Verbreitungsbilder ausgewählter wärmeliebender Brutvogelarten nach Norden beziehungsweise Nordosten verschieben.

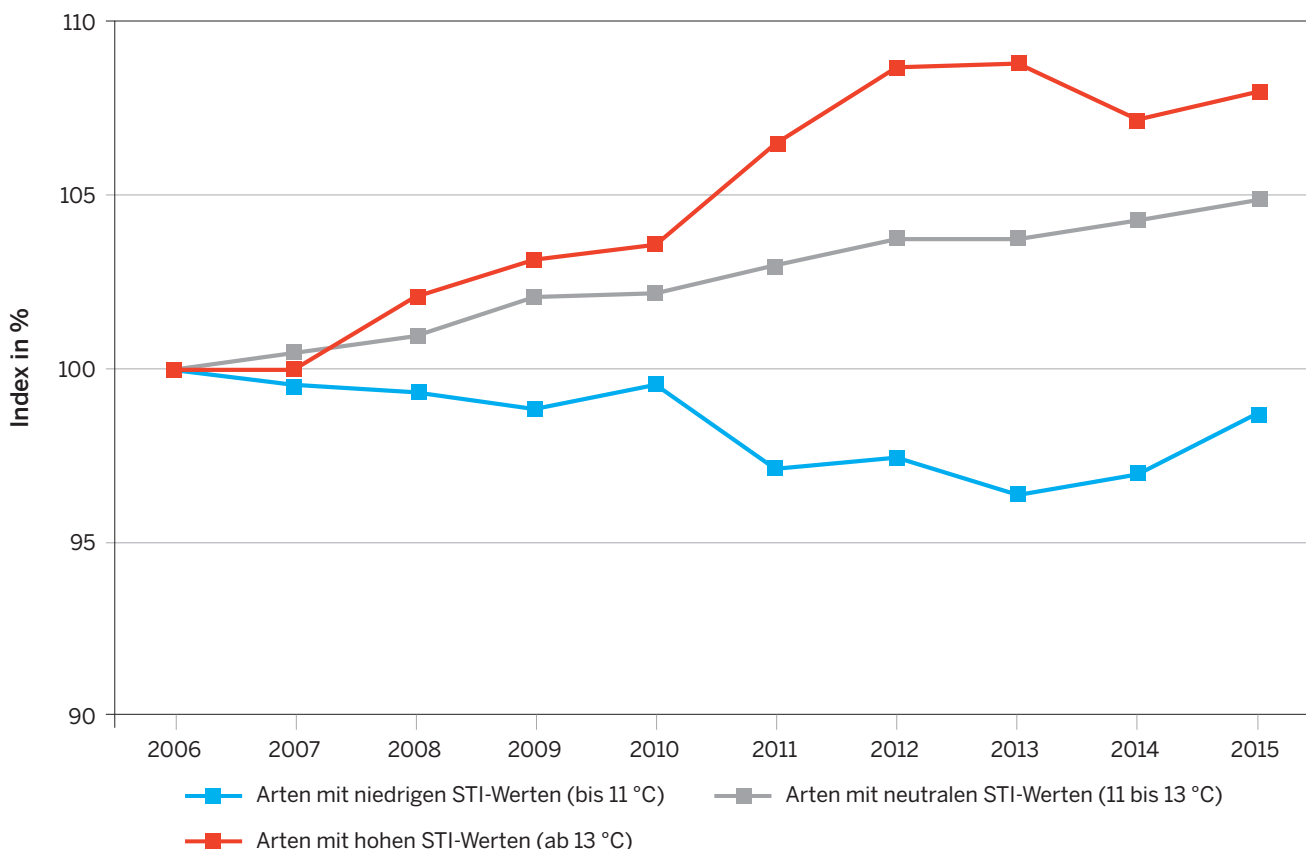


Abbildung 57: Entwicklung der Species Temperature Index (STI)-Wertsommen von Brutvogelarten in NRW (Datenquelle: ÖFS)

5.2.3 Die Wintersituation für den Rothirsch

Warmblütige Pflanzenfresser wie der Rothirsch sind während des Winters in unserer Kulturlandschaft vielfältigen Belastungen ausgesetzt: Die Nahrung ist knapp, qualitativ schlechter als im Sommer und die schützenden Täler, in die das Rotwild vor den großflächigen Rodungen im frühen Mittelalter vor dem Wintereinbruch gezogen ist, werden heute vom Menschen für Siedlungen und Verkehrswege beansprucht. Hingegen erleichtern weniger lange Schnee- und Frostphasen in den Mittelgebirgen als Folge des Klimawandels die Wintersituation für das Wild.

Die Hirscharten auf der Nordhalbkugel können sich jahreszeitlich-regional an die lebensfeindlichen Bedingungen im Winter anpassen. Zu den Überwinterungsstrategien des Rothirsches zählen beispielsweise das Absenken der Körpertemperatur und die Einstellung der Verdauung auf faserreichere und nährstoffärmere Nahrung. Der gesamte Stoffwechsel schaltet in eine Art „Energiesparmodus“. Ein Zeichen hierfür ist eine niedrigere Pulsfrequenz und ein abgesenktes Aktivitätsniveau (Abbildung 58).

An einen frühen Winter sind Wildtiere in ihrem jahreszeitlichen Rhythmus gut angepasst. Ein später Wintereinbruch, wenn die Stoffwechseluhr bereits auf den Frühling eingestellt ist, bereitet dem Wild hingegen Probleme. Die Jahresperiodik wird primär durch die Tageslänge gesteu-

ert. Zusätzlich gibt es im Verdauungssystem Anpassungen an die gerade zur Verfügung stehende Vegetation. Strenge Winter, wenn Gräser und Kräuter von Schnee bedeckt sind, erhöhen die Bedeutung von Baumrinde und Zweigen. Diese bleiben auch bei Schnee als Nahrung erreichbar. Dadurch steigt das Risiko von Wildschäden. Nach bestimmten Kriterien dürfen Jäger das Wild auch im Winter füttern, um Wildschäden zu minimieren. Die Winterfütterung in der Kulturlandschaft ist also nicht wegen der Strenge des Winters notwendig. Sie stellt vielmehr eine Kompensation des durch menschliche Einflüsse ausgelösten Nahrungsmangels dar. Dieser resultiert aus dem Verlust von Lebensräumen, die durch den Wintersport noch weiter eingeschränkt werden. Für die Wildtiere endet die Notzeit mit der Buschwindröschenblüte im Frühling.

Ein Indikator für die Wintersituation aus Sicht der großen Wildtiere sind die Tage mit einer Schneedecke von mindestens 5 cm Höhe. Höhere Schneelagen bedeuten nicht nur weniger Nahrung und schwierigere Lebensbedingungen, sondern über den Wintersport zusätzliche Störungen im Lebensraum. Darum ist es im Winter besonders wichtig, dass sich Touristen an vorgegebene Wegegebote halten. Wintersportkonzepte, die Ruhezone für Wildtiere vorsehen, sind ein probates Mittel, um die Situation zu entschärfen.

Rotwild im Winter



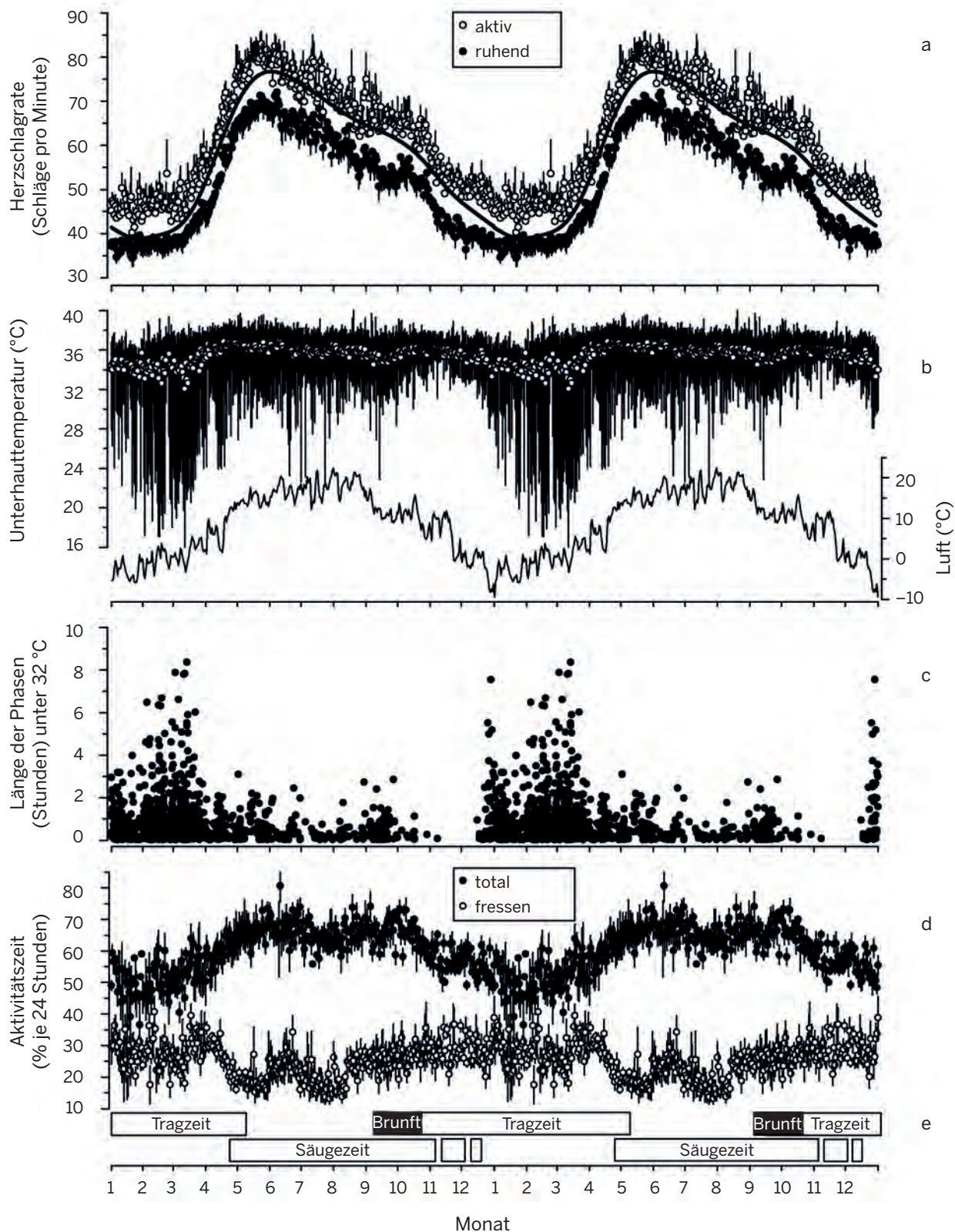


Abbildung 58: Physiologische Anpassungen beim Rotwild im Winter (ARNOLD 2004)

Durch den Klimawandel haben sich in NRW die Tage mit Schneedecken über 5 cm seit 1955 bereits sehr signifikant reduziert (vergleiche auch Kapitel 2.5). Auch die Anzahl der Eistage pro Jahr ist rückläufig (siehe Kapitel 2.2.2). Weniger Schneetage bedeuten weniger Wintersport und damit mehr verfügbarer Lebensraum für das Wild, wie Ergebnisse des Pilotprojektes Monschau-Elsenborn in der Eifel zeigen (SIMON et al. 2008). Der Trend zu milderen Wintern bedeutet für das Wild bessere Überlebenschancen. Damit ist das Rotwild eine Art, die in NRW vom Klimawandel langfristig profitieren könnte.



Skigebiet im Sauerland

5.2.4 Fortpflanzungsrhythmus beim Rehwild

Rehwild ist in Europa weit verbreitet. Es ist mit seinem Fortpflanzungsrhythmus an den Wechsel der Jahreszeiten angepasst. Dieser Fortpflanzungsrhythmus ist photoperiodisch über die Tageslänge kontrolliert. Die Tageslängen sind durch die Bahn der Erde um die Sonne festgelegt und nehmen im Jahresverlauf immer zum gleichen Zeitpunkt zu oder ab. Gleichzeitig verschiebt sich die Vegetationsperiode durch den Klimawandel. Dadurch sind die Tage bei Beginn der Vegetationszeit kürzer und der Fortpflanzungserfolg beim Rehwild kann beeinträchtigt werden.

Die Paarungszeit des Rehwildes fällt in den Sommer. Nach einer Keimruhe beginnt die Einnistung der Eizelle erst im späten Dezember bis Anfang Januar. Dieser Vorgang wird über die Photoperiode (Tageslänge) gesteuert. Die Tageslänge ist ein Umweltsignal, das zuverlässig und weit im voraus – unabhängig von Witterungsereignissen – den Verlauf und die Richtung der Jahreszeiten anzeigt: Zu-

nehmende Tageslänge kündigt Frühjahr und Sommer an, abnehmende Herbst und Winter (PESCHKE 2005).

Der Geburtstermin für die Kitze fällt in die Monate Mai und Juni (RIECK 1955). Die Fleckfärbung der Jungtiere macht diese in den in dieser Jahreszeit blühenden Wiesen für Feinde „optisch“ unsichtbar. Nahrung ist für die Kitze ausreichend verfügbar und enthält genügend Nährstoffe und wenig schwer verdauliche Rohfaser. Außerdem ist der Energiebedarf der Muttertiere in der Zeit des Säugens hoch und kann in dieser Jahreszeit am ehesten über das gute Nahrungsangebot ausgeglichen werden.

Der Sommer ist für das erwachsene Wild sehr energiezehrend: Das weibliche Wild säugt die Kitze, die Rehböcke befinden sich in der Brunft. Gleichzeitig ist jetzt die beste Jahreszeit, um Fettreserven für den Winter aufzubauen. Nur durch diese Anpassung an den Jahresrhythmus kann das Rehwild den Winter unbeschadet überleben.

Das Pflanzenwachstum wird nicht nur durch das Licht, sondern wesentlich durch die klimatischen Bedingungen beeinflusst. Das Klima in NRW zeigt seit Beginn der 1980er Jahre eine deutlich stärkere Erwärmung als in den vorangegangenen Jahrzehnten seit 1881 (siehe Kapitel 2.1). Auch nehmen die mittleren Niederschläge vor allem im Winter zu. In der Folge hat sich seit 1951 der Beginn der Vegetationsperiode um ca. sieben Tage nach vorne verlagert und um etwa 15 Tage verlängert (siehe Kapitel 5.1). Dadurch haben sich auch die Mahdtermine nach vorne geschoben (Abbildung 59): Sowohl der erste Heuschnitt (Ernte nach der Grasblüte, Gras wird vor Verfütterung getrocknet), als auch der erste Silageschnitt (Ernte vor der Grasblüte, Gras wird vor Verfütterung vergoren) werden in NRW im Mittel zwischen 1991 und 2015 um fast zehn Tage früher vorgenommen. Der Trend des ersten Heuschnittes ist nach dem Mann-Kendall-Test hochsignifikant, der des ersten Silageschnittes sehr signifikant. Fiel bis Ende der 1980er Jahre der erste Heuschnitt in der Regel in die ersten beiden Juniwochen, wird seit Anfang der 1990er Jahre zunehmend bereits in der letzten Maiwoche gemäht. Noch kritischer verhält es sich mit dem ersten Silageschnitt: Dieser ist seit 1991 in das phänologische Beobachtungsprogramm des DWD aufgenommen und findet in der Regel schon Mitte Mai, vereinzelt auch Anfang Mai statt. Damit fallen die ersten Mahdtermine in NRW zunehmend mit der Geburt der Rehkitze zusammen.

Auf der einen Seite verlagern sich die Mahdtermine nach vorne, auf der anderen wird ihre Anzahl gesteigert. Durch das häufige Mähen werden die Wiesen artenärmer. Wird mehr als zweimal im Jahr gemäht, können viele Pflanzen nicht mehr zur Blüte kommen. So werden vor allem schnittunempfindliche bodenkriechende Pflanzen oder Rosettenpflanzen gefördert. Dadurch, dass ein Großteil der Wiesen innerhalb eines Landschaftsraums häufiger

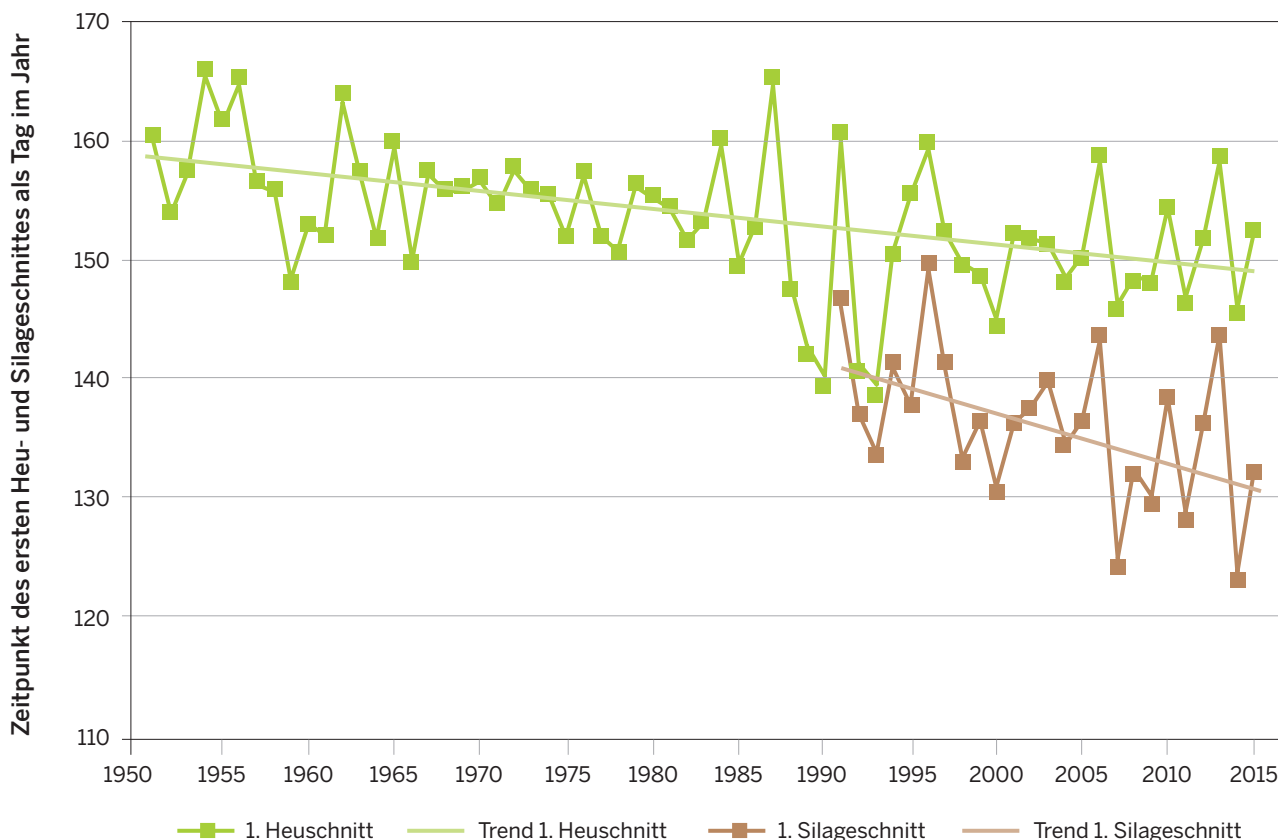


Abbildung 59: Mittlerer Zeitpunkt des jeweils ersten Heu- und Silageschnittes in NRW (Datenquelle: DWD)

gemäht wird, geht darüber hinaus die versetzte Phänologie der Pflanzengesellschaften – gekennzeichnet durch beispielsweise unterschiedliche Hauptblühzeiten verschiedener Wiesentypen – im ländlichen Raum verloren. Für das Rehwild sind aber großer Artenreichtum sowie ein versetztes Nahrungsangebot überlebenswichtig (BLÜTHGEN et al. 2016, STEVENSON et al. 2015).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich der an die Tageslänge geeichte Fortpflanzungsrythmus beim Rehwild an die Änderungen in der Pflanzenphänologie, bedingt durch die Erwärmung des Klimas sowie die daraus folgende veränderte anthropogene Nutzung, nicht anpassen kann. Das Fehlen von leichtverdaulicher, nährstoffreicher aber rohfaserarmer Nahrung gerade in den Monaten der Jungenaufzucht hat negative Folgen auf die Populationsentwicklung. Der Zuwachs an gesunden immunkompetenten Rehen nimmt in der Folge ab und dadurch wird eine verlangsamte Populationsentwicklung erwartet (PLARD et al. 2013).

5.2.5 Lebensgemeinschaften bei Fischen

Eine Klimaveränderung kann sich über unterschiedliche Wirkungspfade negativ auf Fische auswirken, zum Beispiel temperaturbedingt durch Erhöhung der Gewässertemperatur oder hydrologisch durch Verschlämzung als Folge von Starkregenereignissen. Diese Störungen im Lebensraum können das Verhalten bei Fischen ändern (zum Bei-

spiel Einstellen der Nahrungsaufnahme) und in der Folge den Fitnesszustand einer Fischpopulation verschlechtern.

Starkregenereignisse können zu erhöhter Erosion führen und damit die Gefahr der Gewässerverschlämzung vergrößern. Hierdurch werden die Laichmöglichkeiten, insbesondere von Salmoniden (Lachs- und Forellenfische), stark beeinträchtigt. Eine Temperaturerhöhung der Gewässer ist besonders bei Fischarten mit engen Temperaturtoleranzbereichen problematisch (zum Beispiel Quappe oder Bachforelle). Fische haben jahreszeitlich und in verschiedenen Lebenszyklen unterschiedliche Temperaturansprüche, weshalb bei der Abschätzung des Einflusses des Klimawandels alle Lebensstadien berücksichtigt werden müssen. Beispielsweise sind die Gonadenreifung und das Laichgeschäft an spezielle Temperaturen gekoppelt. Bei zu warmen, aber auch zu kalten Temperaturen kann es zu verminderter Reproduktion oder gar zum Totalverlust einer Fischgeneration kommen. Gleichzeitig wird bei ansteigender Temperatur auch das Risiko für Fischkrankheiten erhöht (MKULNV 2014).

Weiterhin führt die Temperaturerhöhung zu Verschiebungen in der Ausbreitung einzelner Arten. Höhere Temperaturen bedeuten für Stillgewässer die Gefahr des Austrocknens und somit des Lebensraumverlustes für speziell angepasste, konkurrenzschwächere Arten (zum Beispiel Karausche, Schlammpeitzger). Außerdem

treten Sauerstoffdefizite häufiger auf, was zu vermehrtem Fischsterben führen kann. In Fließgewässern sind besonders die Fischgemeinschaften der Oberläufe betroffen, da hier kälteliebende Arten vertreten sind. Ihr Lebensraum verkleinert sich von der bachabwärts gelegenen Grenze her und gleichzeitig verhindert der durch den Klimawandel bedingte sommerliche Wassermangel ein Ausweichen in die bachaufwärts gelegenen Habitate (MUNLV 2009 & BUNZEL-DRÜKE 2011).

Für die Fließgewässerbewertung im Rahmen der EU-Wasserrahmenrichtlinie werden nicht einzelne Fischarten betrachtet, sondern die aktuell vorkommenden Fischlebensgemeinschaften (= Fischgewässertypen) im Vergleich zu einem natürlichen Zustand bewertet. In NRW konnten sieben verschiedene „Fischlebensgemeinschaftsgruppen“ mit ähnlichen Temperaturschwellenwerten abgegrenzt

werden (MKULNV 2014). Diese lassen Rückschlüsse darauf zu, welche Lebensgemeinschaften besonders durch die Temperaturerhöhung betroffen sein werden. Abbildung 60 zeigt die beiden besonders gegenüber einer Temperaturerhöhung sensiblen Gruppen E (Forellnbäche im Mittelgebirge) und Gruppe F (Äschengewässer im Lippe- und Karstbereich).

Aufgrund zum Teil ganz unterschiedlicher Wirkfaktoren sind Prognosen zu den erwarteten Veränderungen schwierig (MUNLV 2009). Anthropogene Veränderungen können mögliche negative klimatische Folgen noch verstärken. Beispielsweise bedingen Querbauwerke eine stärkere Wassererwärmung in Staubeichen und vermindern zusätzlich die Ausweichmöglichkeiten der Fische in klimatisch günstigere Gewässerbereiche oder Nebengewässer.

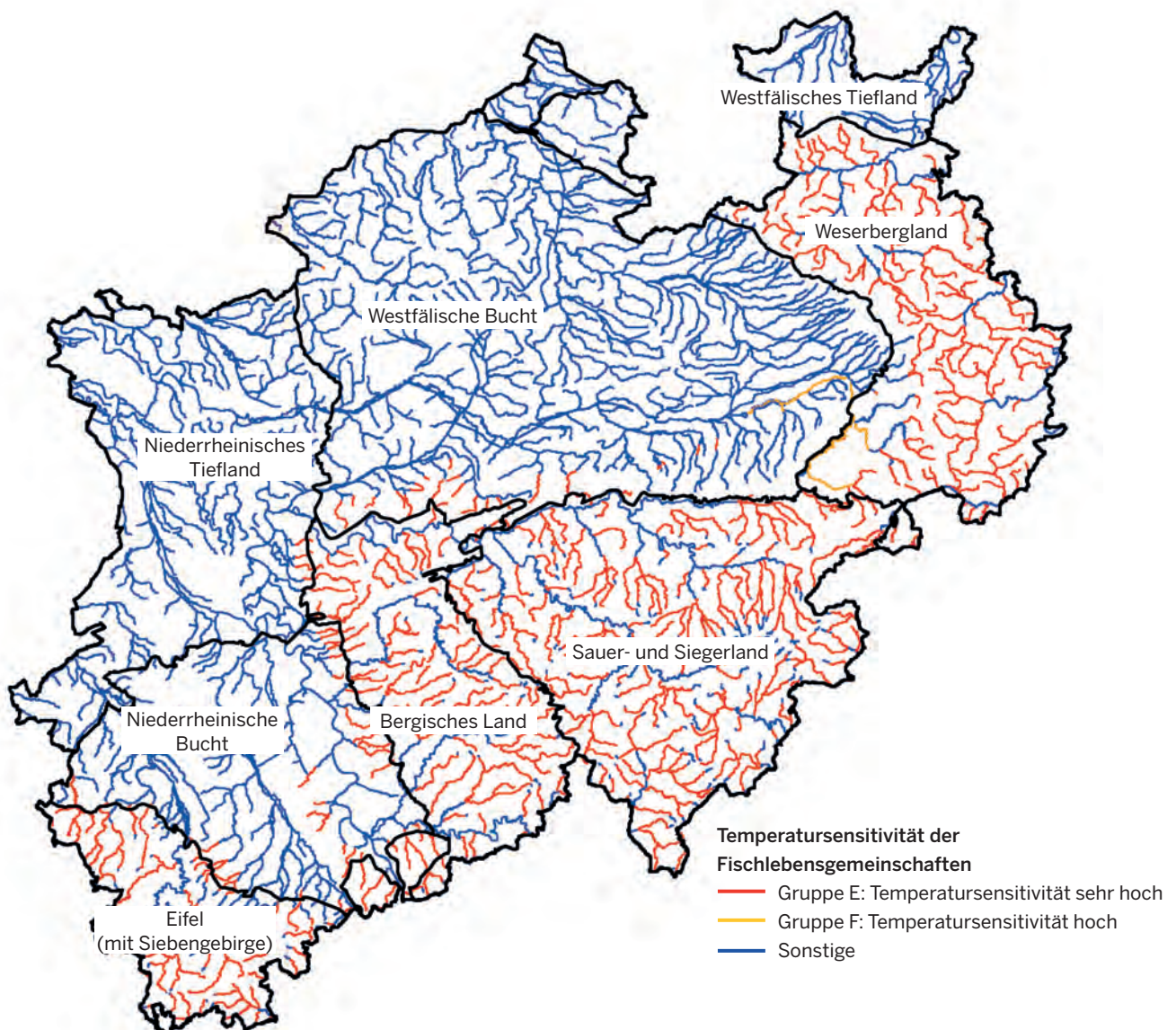


Abbildung 60: Vorkommen von besonders gegenüber einer Temperaturerhöhung sensiblen Fischlebensgemeinschaften in NRW (Kartengrundlage: Geobasis NRW)

5.3 Lebensräume

Die Arten einer Lebensgemeinschaft reagieren unterschiedlich auf das sich ändernde Klima. Deshalb verschieben sich Pflanzengesellschaften und Tiergemeinschaften nicht nur entlang von Klima- oder Höhengradienten, sondern verändern sich auch in ihrer Artenzusammensetzung.

Eine Studie im Auftrag des nordrhein-westfälischen Umweltministeriums untersuchte die nach Paragraph (§) 30 Bundesnaturschutzgesetz geschützten Biotope¹ und die nach Anhang 1 der FFH-Richtlinie² zu schützenden Lebensraumtypen hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit in Bezug auf den Klimawandel (MKULNV 2010). Die Lebensraumtypen können durch den Klimawandel gefördert oder beeinträchtigt werden, je nach standörtlich-ökologischen Ansprüchen. Neutral wäre der Klimawandel für einen Lebensraumtyp, wenn weder das Areal noch die Artenausstattung sich veränderten. Weil aber viele schutzwürdige Lebensraumtypen verinselt in der Kulturlandschaft liegen und Arten unterschiedliche Wanderungsgeschwindigkeiten zeigen, ist nicht damit zu rechnen, dass sie sich verlustfrei entlang der Höhen- oder Klimagradienten verschieben können. Von einer Verschlechterung eines Lebensraumtyps kann auch gesprochen werden, wenn sich zwar nicht seine Ausdehnung, wohl aber die Zahl der hoch spezialisierten Arten zugunsten weit verbreiteter Arten verringert.

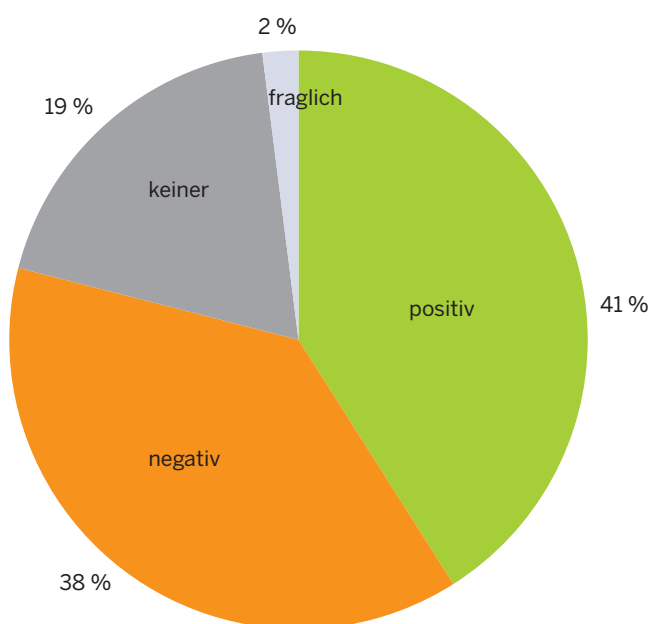


Abbildung 61: Einfluss des Klimawandels auf die schutzwürdigen Lebensräume in NRW (n = 48) (Quelle: MKULNV 2010)

Von den 48 untersuchten schutzwürdigen Lebensraumtypen werden voraussichtlich gleich viele vom Klimawandel profitieren, wie unter ihm leiden (Abbildung 61): Etwa jeweils 40 Prozent werden positiv oder negativ beeinflusst. Etwa ein Fünftel der Lebensräume bleiben unbeeinflusst.

Genau wie bei den Arten besteht auch bei den Lebensraumtypen ein Zusammenhang zwischen der Anpassung an feuchte Lebensbedingungen und der Beeinträchtigung durch den Klimawandel. So gibt es nach Experteneinschätzung in den Feuchtlebensräumen 29 bis 57 Prozent negativ vom Klimawandel betroffene Arten. Die durch Trockenheit charakterisierten Lebensraumtypen (Heiden, Kalkmagerrasen, Sandmagerrasen oder Orchideen-Buchenwälder) werden dagegen vom Klimawandel eher profitieren (Abbildung 62).

Unter sommerlicher Austrocknung durch erhöhte Verdunstung und verringerte Sommerniederschläge leiden besonders Quellen sowie Moore und Sümpfe. An oberflächennah vernässten Moorstandorten sammeln sich unter Sauerstoffarmut Torfe an. In sommerlichen Austrocknungsphasen kommt es zur oberflächennahen Durchlüftung der Torfe, zur Torfzersetzung und in der Folge zur Eutrophierung. Dazu kommt, dass die meisten Moorstandorte durch Torfgewinnung und Melioration (Kultivierung) bereits vorgeschädigt sind.

Auch in den Feucht- und Nasswäldern bewirkt sommerliche Austrocknung die Mineralisation von Humus und Torf. Stickstoffzeiger wie Brennnessel und Brombeere nehmen in austrocknenden Bruchwäldern und nassen Auenwäldern an Deckung zu. Weniger gravierend hingegen ist der Klimawandel voraussichtlich für die wechsellückigen Auenwälder.

Etwa ein Viertel des Landes ist von Wäldern bedeckt, in den Mittelgebirgen liegt der Waldanteil bei über 50 Prozent. Die Laubwälder trockener Standorte, wie die alten Eichenwälder auf Sandebenen, die Orchideen-Buchenwälder und die Labkraut-Eichen-Hainbuchenwälder, werden voraussichtlich positiv auf den Klimawandel reagieren. Je trockener der Standort, desto geringer ist die Konkurrenzkraft der Buche und desto mehr Licht dringt durch das Kronendach in die Strauch- und Krautschicht. Der Stieleichen-Hainbuchenwald feuchter Standorte wird vermutlich der einzige Waldtyp sein, der negativ vom Klimawandel beeinflusst wird, da er von Trockenphasen bedroht ist.

¹ BNatSchG-§ 30-Biotope sind grundsätzlich gesetzlich geschützt, auch wenn für sie keine Schutzgebietssatzung erlassen wird.

² Richtlinie 92/43/EWG zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wild lebenden Tiere und Pflanzen; Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie.

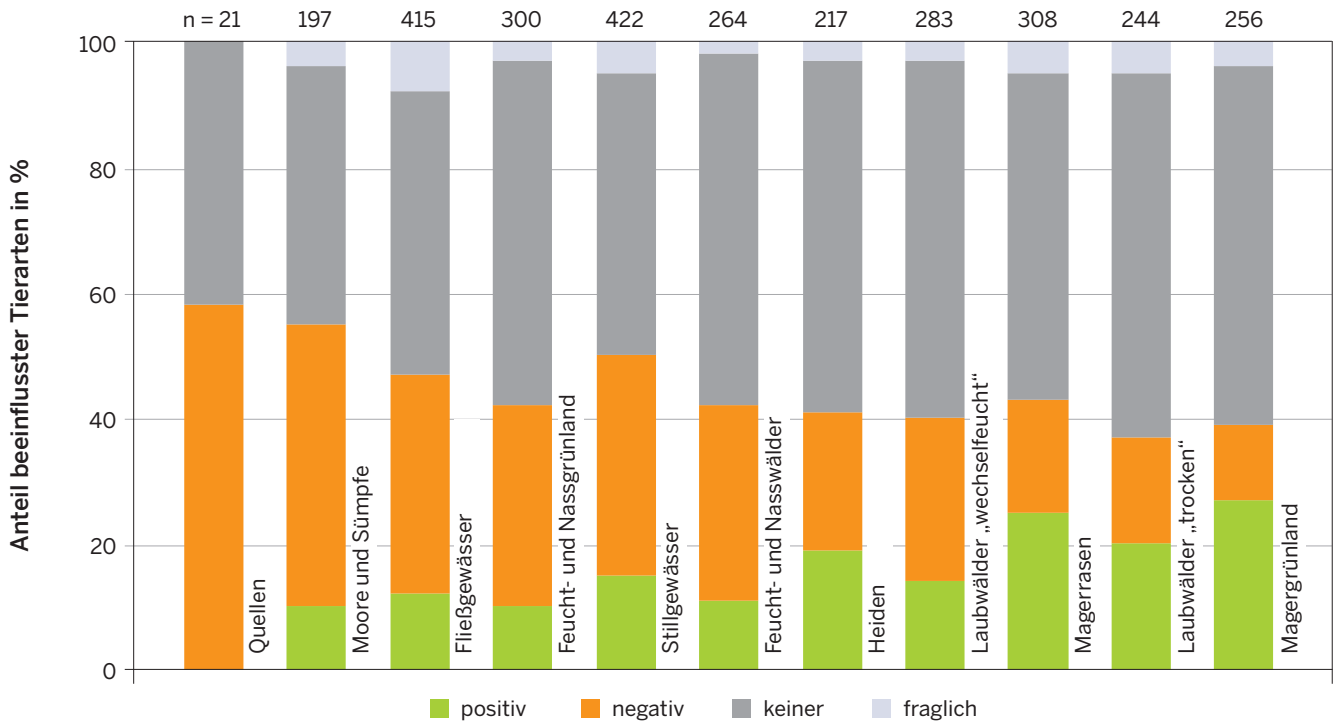


Abbildung 62: Empfindlichkeitsanalyse – Einfluss des Klimawandels auf ausgewählte Tierarten der untersuchten Lebensraumtypen (Quelle: MKULNV 2010)

Die an nährstoffarme Standorte angepassten Calluna-Heiden sowie die Sand-, Silikat- und Kalkmagerrasen werden überwiegend durch den Klimawandel gefördert. Die Mehrzahl ihrer Arten profitiert von der Wärme, dem lückenhaften Bewuchs und den milderen Wintern. Lediglich die Feuchtheiden werden nicht begünstigt. Sie werden von Trockenheit und Torfzersetzung beeinträchtigt, was sich negativ auf die Bestände der Glockenheide und einiger spezialisierter Laufkäferarten auswirkt.

Unter den Grünlandgesellschaften ist zwischen Berg- und Flachland zu unterscheiden. Während man vor allem den Grünländern magerer, trockener Lagen eine positive Entwicklung prognostiziert, werden im Bergland zum Beispiel bei den Bergmähwiesen negative Entwicklungen erwartet. Für Feucht- und Nassgrünland ist die Prognose ebenfalls deutlich negativ, da bei sinkendem Bodenwassergehalt ein früheres und stärkeres Graswachstum einsetzt, welches schwachwüchsige Feuchtgrünarten auskonkurriert.



Wasserlebensräume leiden bei starker sommerlicher Erwärmung unter Sauerstoffarmut, manche darüber hinaus unter Anreicherung von Schadstoffen bei Niedrigwasser oder gar Austrocknung. Betroffen davon sind insbesondere die Pflanzen- und Tierarten der Quellen. In den Bachoberläufen verringert sich der Lebensraum für die an kühles, sauerstoffreiches Wasser angepassten Arten, zu

denen beispielsweise Äsche und Bachforelle gehören (siehe Kapitel 5.2.5). Vor allem im niederrheinischen Tiefland und in der niederrheinischen Bucht zeigt sich seit einigen Jahren, dass verschiedene Warmwasser liebende Neophyten bessere Lebensbedingungen finden und im Begriff sind, sich zu etablieren (siehe nachfolgendes Kapitel 5.4).



Zwei trockene Lebensraumtypen, die voraussichtlich vom Klimawandel profitieren: links die Heide, rechts die Glatthaferwiese



Zwei feuchte Lebensraumtypen, die voraussichtlich negativ vom Klimawandel beeinflusst werden: links ein Moorstandort, rechts ein feuchter Walzenseggen-Erlenbruch

5.4 Einwanderung von Neobiota

Sowohl die Artenzusammensetzung als auch die Strukturen der Lebensgemeinschaften ändern sich durch gebietsfremde, neu eingeschleppte Arten. In unseren gemäßigten Breiten haben vor allem die an wärmere Klimazonen angepassten Arten eine Chance, sich in Konkurrenz zu den heimischen Arten zu behaupten und sich als fester Bestandteil in der Natur zu etablieren. Diese werden durch die im Klimawandel ansteigenden Temperaturen gefördert.

Arten, die nach der Entdeckung Amerikas 1492 beabsichtigt oder unbeabsichtigt in die heimische Natur eingeführt bzw. eingeschleppt wurden, nennt man Neobiota. Die überwiegende Mehrzahl der wild wachsenden Neobiota ist unproblematisch. Besonders erfolgreiche Neobiota können sich aber so stark auf Kosten der heimischen Arten ausbreiten, dass sie als Schädlinge gelten müssen. Diese Arten werden invasiv genannt. Sie verursachen häufig auch wirtschaftliche Schäden und stellen im Einzelfall auch eine Gesundheitsgefahr dar. Bereits heute stammen rund 60 Prozent der in Deutschland wild lebenden invasiven Arten aus wärmeren Klimazonen und werden durch den Klimawandel weiter gefördert (Abbildung 63).

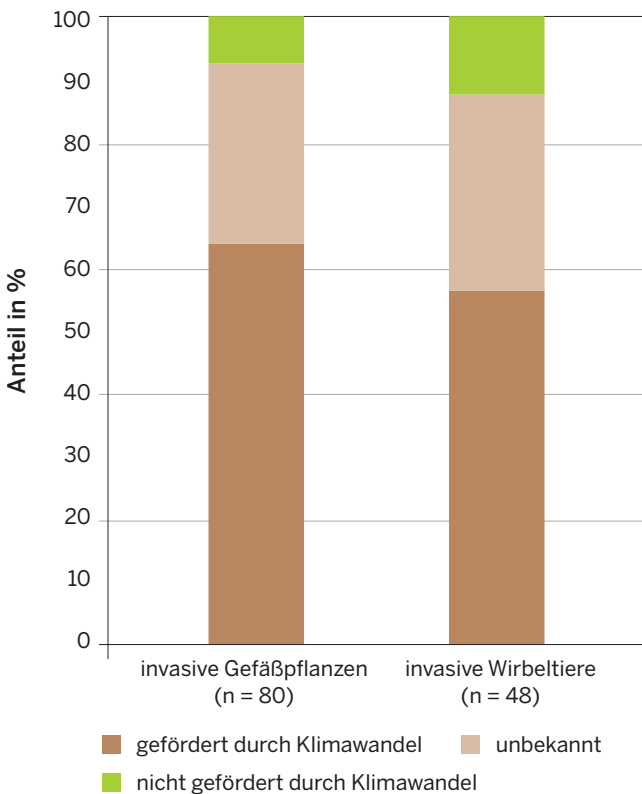


Abbildung 63: Anteil der durch den Klimawandel geförderten invasiven und potenziell invasiven Pflanzen- und Tierarten (NEHRING et al. 2013 & 2015)



Die eingewanderte Körbchenmuschel profitiert von den höheren Wassertemperaturen des Rheins. Am Ufer können sich Schalenablagerungen bilden.

Besonders viele Neobiota finden sich in den Flussauen, in denen die Ausbreitung von Pflanzen- und Tierarten durch Verfrachtung mit der fließenden Welle und durch Überflutungen besonders schnell vonstatten geht. Die Vegetation der Kiesbänke und der Ufersäume in NRW ist in weiten Teilen von Neophyten geprägt. Der Wärmegenuss und die zunehmenden Stickstofffrachten fördern großblättrige und rasch wachsende Arten. Unter den Gefäßpflanzen haben sich eine Reihe von sogenannten C4-Pflanzen, zum Beispiel Fuchsschwanzarten oder verschiedene Gräser (Hirse, Elefantengras) etabliert, die über einen besonderen Kohlenstoffstoffwechsel verfügen. Dieser ermöglicht es ihnen, bei geschlossenen Spaltöffnungen ohne Gasaustausch Kohlenstoff zu fixieren und damit bei Wasserstress besser zu wachsen.

Auch unter Wasser wird die Besiedlung nach Biomasse und Individuenzahl von Neobiota dominiert. Im Rhein sind unter den Kleintieren bis zu 90 Prozent der Biomasse gebietsfremde Arten, vornehmlich aus der Schwarzmeerregion. Diese Arten wurden nach dem Bau des Rhein-Main-Donau-Kanals mit dem Binnenschiffsverkehr eingeschleppt. Wie an Land sind auch unter Wasser neben der Erwärmung zahlreiche andere Faktoren, vor allem die anthropogen veränderten Gewässerstrukturen, verantwortlich für die nachhaltige Umwälzung des Faunenspektrums. Auch hier gilt: Viele der prosperierenden Neulinge lieben das wärmere Wasser und brauchen milde Winter. Zu ihnen zählen beispielsweise die Körbchenmuschel, deren Schalen am Rande des Stroms ausgedehnte Ablagerungen von Muschelschalen bilden, der Große Höckerflohkrebs, der als potenter Räuber inzwischen nahezu alle größeren Fließgewässer und Kanäle besiedelt oder der Signalkrebs, der bis in die Bachoberläufe der Mittelgebirge aufsteigt.



Das Brasilianische Tausendblatt ist stark in Ausbreitung begriffen. Wie hier in der Groesbecke am nördlichen Niederrhein kann es Massenbestände bilden.

Unter den Wasserpflanzen breiten sich der Große Wassernabel und das Brasilianische Tausendblatt aktuell stark aus. Die invasiven Wasserpflanzen wachsen rasch und können innerhalb weniger Wochen große Teile des Gewässers bedecken. In der Folge bringen Faulschlamm- und Sauerstoffschwund kleinere Gewässer zum „Umkippen“.



Der invasive Große Wassernabel breitet sich aktuell stark aus und kann Gewässer innerhalb weniger Wochen komplett bedecken



Ein Beispiel für ein am Wasser lebendes Säugetier ist die aus Südamerika stammende Nutria. Die Art wurde von Pelztierzüchtlern nach Mitteleuropa eingeführt. Aus der Gefangenschaft entwichene oder freigelassene Tiere haben an verschiedenen Orten des Landes frei lebende Kolonien gegründet. Nutrias sind frostempfindlich, was in harten Wintern des vergangenen Jahrhunderts immer wieder zum Erlöschen von Kolonien geführt hat. Inzwischen gibt es eine landesweit beständige und im Zuge der Klimaerwärmung stark anwachsende Nutria-Population in NRW, insbesondere im Tiefland. Als selektive Pflanzenfresser haben Nutrias am Niederrhein große Wasserpflanzen- und Röhrichtbestände vernichtet und damit die Struktur der Auenlandschaft nachhaltig verändert. In den letzten Jahren scheinen die Nutria-Populationen jedoch zu

stagnieren. Über die Ursachen können bisher keine klaren Aussagen getroffen werden.

Ein besonders auffälliger Neubürger ist der die großen Städte am Rhein (Köln, Bonn und Düsseldorf) bewohnende Halsbandsittich (TEAM SAMMELBERICHT NRW 2013). Der auffällige, eigentlich in den Subtropen heimische Vogel stammt aus Käfig- und Volierenhaltung. Er brütete erstmals 1969 in Köln. Inzwischen wird sein Bestand auf 4.200 Individuen geschätzt. Die Höhlenbrüter sammeln sich abends im Innenstadtbereich auf großen Stadtbäumen zu mehreren hundert Tieren, wo es mitunter durch den Lärm und die Ausscheidungen der Tiere zu Konflikten mit den Anwohnern kommt. Dazu gesellen sich 200 bis 250 Individuen des aus Indien stammenden Großen



Diese Nutria hat einen strengen Winter überlebt, aber ein Stück ihres Schwanzes ist abgestorben



Der Große Alexandersittich breitet sich in den wärmebegünstigten Ballungsgebietes aus

Alexandersittichs, der dem Halsbandsittich sehr ähnlich sieht und sich von der häufigeren Art durch den bräunlichen Schulterfleck und das breitere, schwarze Halsband unterscheidet. Er brütete erstmals 1985 in Köln. Beide Sitticharten vermehren sich bisher ausschließlich in den

wärmebegünstigten Ballungsgebieten am Rhein, der Große Alexandersittich bisher nur moderat. In Kälte winters erliden sie wie die Nutria Bestandseinbrüche. Negative Auswirkungen der beiden Sitticharten auf die heimische Tierwelt sind bisher nicht nachgewiesen.

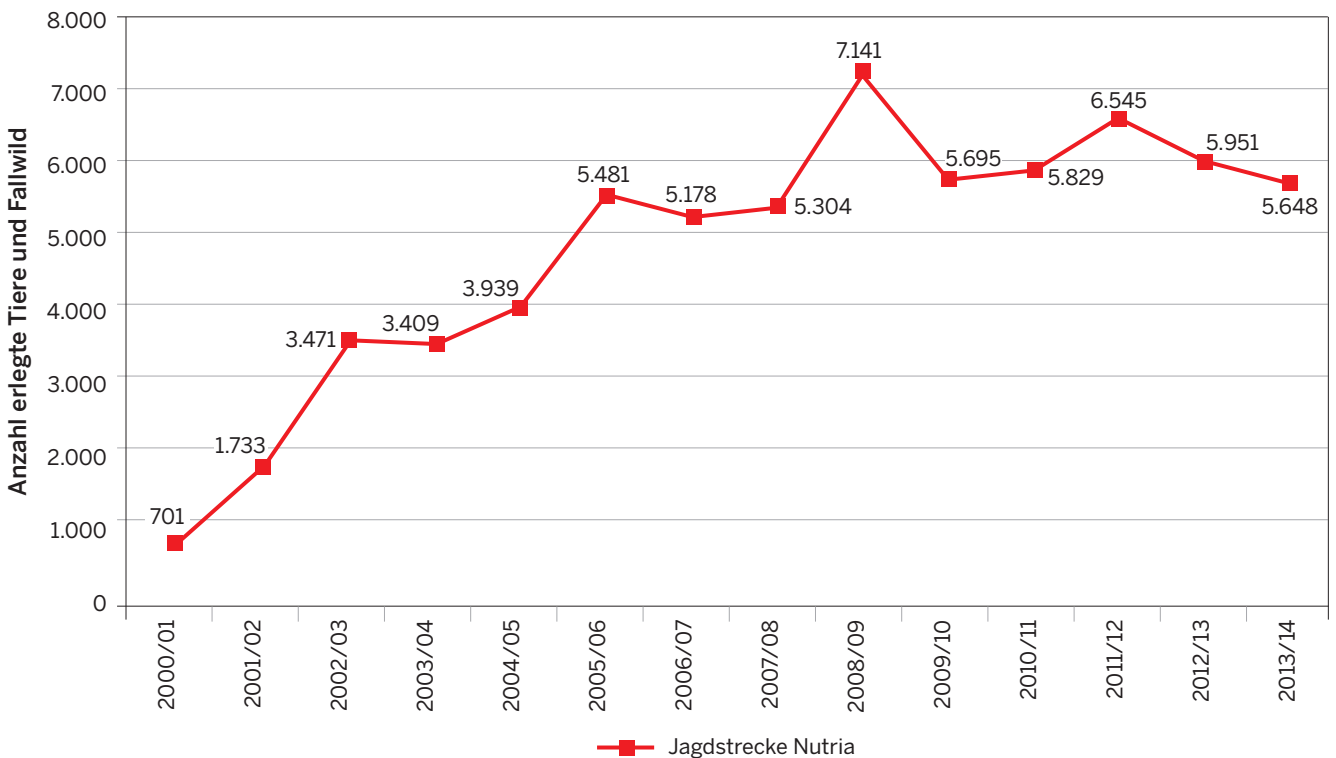


Abbildung 64: Nutrias – erlegte Tiere und Fallwild aus der Jagdstreckenerhebung in NRW im Zeitraum 2000/01 bis 2013/14

5.5 Tierkrankheiten

Pflanzen und Tiere erweitern als Folge des Klimawandels ihre Verbreitungsareale über große Teile Mittel- und Nordeuropas (siehe Kapitel 5.2 und 5.4). Dieser Prozess umfasst auch Wirte (Krankheitsträger) und Vektoren (Organismen, die Krankheiten von Wirt zu Wirt übertragen) von Parasiten und pathogenen Mikroorganismen.

Die Erwärmung des Klimas begünstigt insbesondere die Verbreitung von Insekten oder Zecken übertragener Infektionskrankheiten in Europa. Bis vor wenigen Jahren kam diesen in unseren Regionen wenig Bedeutung zu. Mit dem Auftreten der Blauzungkrankheit (Blue tongue virus = BTV) 2006 und des Chikungunyafiebers 2007 in Italien hat sich diese Einschätzung geändert. Die 1905 erstmals für Südafrika beschriebene BTV ist ein Vertreter der Gattung Orbivirus und kann Wiederkäuer und Kamele infizieren. Das Virus wird durch Mücken (Gnitzen der Gattung *Culicoides*) übertragen. Bei der Ausbreitung der Mücken (=Vektoren) in den europäischen Mittelmeerraum wird klimatischen Veränderungen eine wichtige Rolle zugeschrieben. 2006 wurde der erste Ausbruch der BTV nördlich der Alpen in den Niederlanden, in Belgien und Deutschland verzeichnet. Die Krankheit verbreitete sich rapide nordwärts. Das Virus konnte sogar überwintern und führte bis 2008 in zehn europäischen Ländern zu neuen Ausbrüchen (FAES et al. 2006, BRUGGER et al. 2013, BOENDER et al. 2014). Wildrinder gelten als besonders anfällig. Aber auch andere Wildwiederkäuer wie Rot-, Sika-, Dam-, Reh- und Muffelwild erkrankten. Der heiße Sommer des Jahres 2006 dürfte die Verbreitung der BTV begünstigt haben. Die Quelle des Eintrags ist noch immer unbekannt, doch haben Wind, Niederschläge, Temperatur und Landschaftsstruktur die Ausbreitung der BTV über einen heimischen Vektor (Gnitzen) ermöglicht (FRIEDRICH et al. 2010).

Die einheimische Zecke (Holzbock) ist Vektor für eine Vielzahl von Krankheiten, wie beispielsweise die Lyme Borreliose, die Granulocytäre Anaplaslose, das Fleckfie-

ber oder die Frühsommer-Meningoenzephalitis (FSME) (GEHRINGER et al. 2012). Die Aktivität der Zecken wird wesentlich von Umweltvariablen, hauptsächlich Temperatur und Feuchtigkeit bestimmt. Eine relative Feuchtigkeit von etwa 80 Prozent ist für das Überleben notwendig. Gebiete mit mäßigen bis hohen Niederschlägen, eine Vegetation mit hoher Feuchtigkeit (Laubdecke und Boden bleiben über Tag feucht) eignen sich als Lebensraum.

Zu den Faktoren, die die Ausbreitung der Zecken vorantreiben, zählen klimatische Veränderungen. Milde Winter und Niederschläge begünstigen das Überleben und die Entwicklung (MEDLOCK et al. 2013). So kam es in Westdeutschland innerhalb von nur zehn Jahren zu einem Anstieg der Lyme Borreliose: im Naturschutzgebiet Siebengebirge waren 14 Prozent der Zecken aus der Zeit Mai bis Oktober 2001 positiv für *Borrelia burgdorferi*. Im Vergleich mit Daten aus den 15 Jahren zuvor war die Infektionshäufigkeit signifikant erhöht (KAMPEN et al. 2004).

Darüber hinaus verkürzt sich der Lebenszyklus der Zecken unter optimalen Bedingungen bedeutend. Seit Jahren ist ein zunehmender Befall von Rehwild mit Ektoparasiten, namentlich Zecken, augenfällig (LUTZ 2009). Speziell der Gemeine Holzbock *Ixodes ricinus* hat eine Vorliebe für Rehwild (VOR et al. 2010, KNIFFER et al. 2011). Fehlt Rehwild als bevorzugtes Wirtstier, werden Mäuse, deren Populationen durch milde Winter ebenfalls begünstigt werden, und andere Wirtstiere maßgeblich befallen (HARTELT et al. 2008, JAENSON et al. 2012, JORE et al. 2014).

Für das Jagdjahr 2009 konnte der Befall von Dam-, Muffel- und Rehwild durch Anaplaslose und Babesien in unterschiedlichen Jagdrevieren untersucht werden (Tabelle 8). Beide Krankheitserreger werden durch Zecken übertragen. Die Rolle insbesondere des Rehwildes, aber auch der beiden weiteren untersuchten Wildwiederkäuer, als Reservoir für diese Vektoren scheint sich damit bestätigt zu haben.

Tabelle 8: Nachweis zeckenbürtiger Erreger in Dam-, Reh- und Muffelwild im Jagdjahr 2009 (KAUFFMANN et al. 2012)

Tierart	Brüggen-Bracht			NP Vogelsang			Siegen-Wittgenstein		
	Anzahl	A+ (%)	B+ (%)	Anzahl	A+ (%)	B+ (%)	Anzahl	A+ (%)	B+ (%)
Damwild	43	31 (72)	3 (7)						
Muffelwild				38	27 (71)	0	1	0	0
Rehwild				28	28 (100)	13 (46)	5	5 (100)	2 (40)
Gesamt	43	31 (72)	3 (7)	66	55 (83)	13 (20)	6	5 (83)	2 (33)

A+ = Anaplasma positiv B+ = Babesia positiv

6

Auswirkungen des Klimawandels auf den Boden

Die durch den Klimawandel veränderten Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse wirken sich unmittelbar auf den Boden aus. Wenn die natürlichen Bodenfunktionen gestört sind, so werden Böden empfindlicher gegen Wasser- und Winderosion. Die Bodentemperatur, der Bodenwasserhaushalt und das Bodengefüge verändern sich ebenso wie die Humusgehalte und Humusvorräte – mit kaum abzuschätzenden Folgen. Daher ist der Erhalt naturnaher Böden und der Schutz der natürlichen Bodenfunktionen eine wichtige Aufgabe.



Das Wichtigste vorab:

- Veränderungen der Lufttemperatur und des Niederschlags wirken sich auf den Boden aus. Der Boden erfüllt zudem wichtige Funktionen zum Klimaschutz und zur Anpassung an den Klimawandel.
- Die sommerliche **Regenerosivität** (April bis November) hat zugenommen.
- Die **Bodentemperaturen** in unterschiedlichen Tiefen sind gestiegen.
- Für Wälder lässt sich in einzelnen Jahren durch Wasserhaushaltsmessungen **Trockenstress** nachweisen.
- Die Datenreihen zur Entwicklung der **Humusvorräte** von Ackerböden in drei Naturräumen NRWs sind noch zu kurz, um einen Trend aufzeigen zu können.

Tabelle 9: Mittelwerte für die untersuchten Parameter des Bodens und deren Änderungen über den jeweiligen Messzeitraum

Parameter	Messreihe	räumlicher Bezug	Einheit	Klimanormalperioden					Änderung Zeitreihe	Trend Zeitreihe
				gesamter Zeitraum	1951–1980	1961–1990	1971–2000	1981–2010		
Regenerosivität	1937–2007	NRW	KJ/m ² mm/h	57,1	56,5	53,2	53,9	n. b.	+ 16,8	s. s.
Bodentemperatur										
5 cm	1993–2015	Waldfeucht	°C	11,6	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	+ 1,3	h. s.
50 cm	1993–2015	Waldfeucht	°C	11,4	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	+ 1,1	s. s.

Verwendete Abkürzungen: n. b. = nicht berechnet, da Werte nicht verfügbar oder Trend nicht signifikant, s. s. = sehr signifikant, h. s. = hochsignifikant.

Die möglichen Einflussfaktoren des Klimawandels auf den Boden wurden bereits in der Broschüre „Klimawandel und Boden – Auswirkungen der globalen Erwärmung auf den Boden als Pflanzenstandort“ (MKULNV 2011) dargestellt. Die Landesregierung hat deshalb auch im Klimaschutzplan NRW (MKULNV 2015 a) als ein Arbeitsfeld die Überwachung der klimabedingten Veränderungen des Bodenzustands und der Bodenqualität definiert. In Abbildung 65 ist die Lage der Untersuchungsstandorte eingezeichnet, an denen langjährige Bodenmesswerte gewonnen werden.

Darüber hinaus haben Böden ihrerseits einen Einfluss auf die Klimaentwicklung. Sie fungieren als wichtigster terrestrischer Kohlenstoffspeicher und dienen vor allem im Sommer zur Kühlung der unteren Atmosphäre, was insbesondere in Städten von Bedeutung ist. Die Wiederherstellung und der Erhalt von Böden mit hoher Kühlleistung im städtischen Raum gehört damit zu den Maßnahmen im Handlungsfeld Boden im Klimaschutzplan NRW (MKULNV 2015 a).



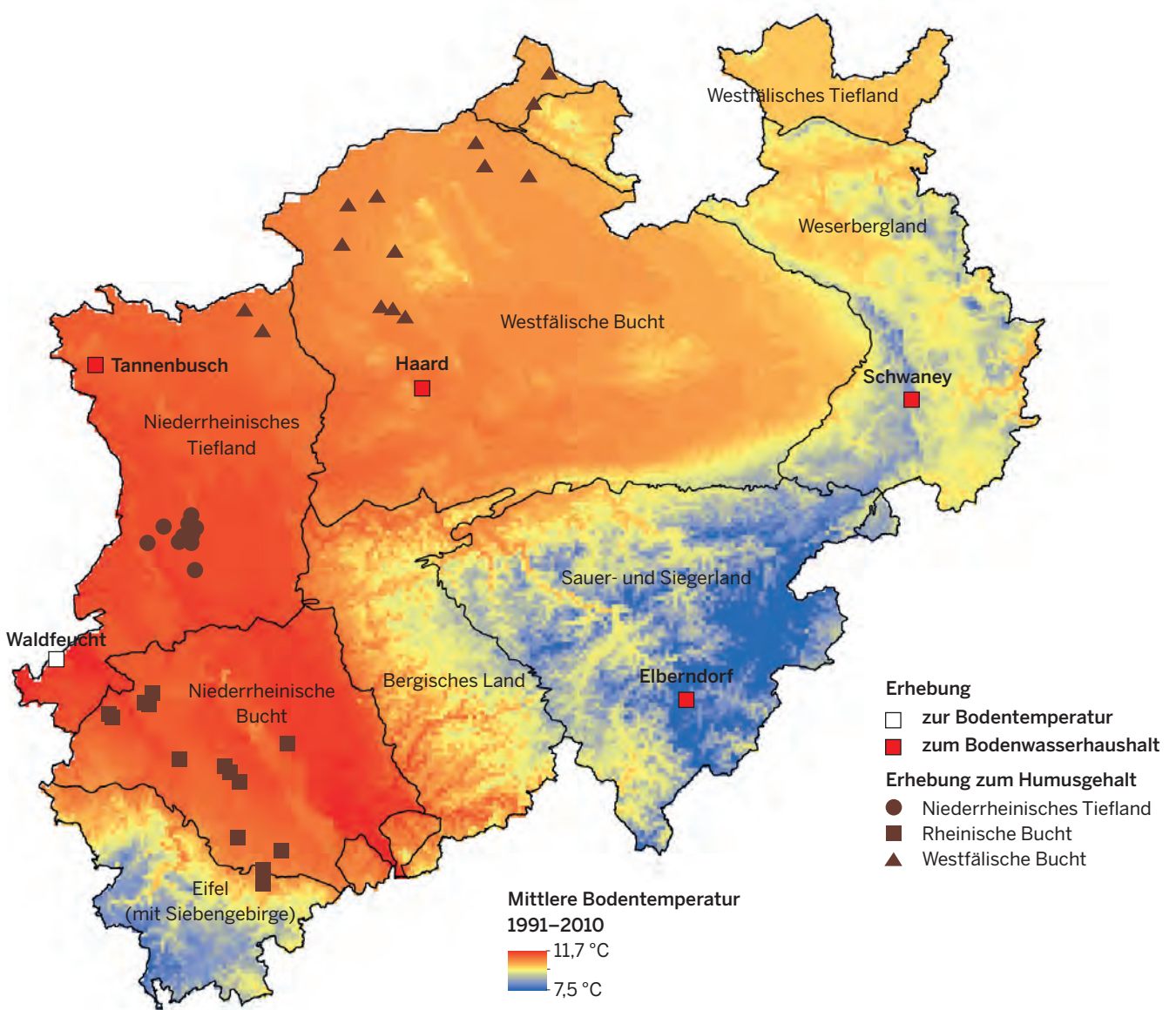


Abbildung 65: Standorte mit langjährigen Bodenmesswerten; Hintergrundkarte: Mittlere Bodentemperaturen in 5 cm Tiefe im Zeitraum 1991–2010 (Datenquelle der Hintergrundkarte: DWD, Kartengrundlage: Geobasis NRW)



6.1 Potenzielle Wassererosionsgefährdung

Bodenerosion wird vor allem durch intensive Starkregen bei unzureichender Bodenbedeckung und entsprechender Hangneigung ausgelöst. Eine Zunahme von Starkregenereignissen erhöht damit auch die Bodenerosion.

Als Indikator für die Zu- oder Abnahme der potenziellen Wassererosionsgefährdung der Böden durch den Klimawandel wird in NRW die Regenerosivität genutzt. Dieser Indikator wurde im Rahmen eines Projektes für den Zeitraum 1937 bis 2007 untersucht und als Indikator in das Klimafolgenmonitoring NRW im Umweltbereich „Boden“ aufgenommen (www.klimafolgenmonitoring.nrw.de). Die Daten zur Erfassung der Regenerosivität werden alle zehn Jahre ausgewertet. Deshalb liegt noch keine Aktualisierung zum letzten Klimabericht (LANUV 2010) vor.

Von 1937 bis 2007 konnte für zehn Messstationen im Ruhrgebiet eine signifikante Zunahme der „sommerlichen“ Regenerosivität (April bis November) von etwa vier Prozent pro Dekade registriert werden (Abbildung 66). Diese Entwicklung erfolgte jedoch nicht stetig, sondern in mindestens zwei Perioden mit einem Rückgang in den 1970er Jahren. Im Zeitraum von 1973 bis 2007 war eine deutliche, hochsignifikante Zunahme der Regenerosivität von 20 Prozent pro Dekade festzustellen. Auswertungen von 53 weiteren für den Zeitraum 1973 bis 2007 verfügbaren Stationen bestätigen die Ergebnisse.



Starkregen kann auf landwirtschaftlichen Flächen zu Erosion führen

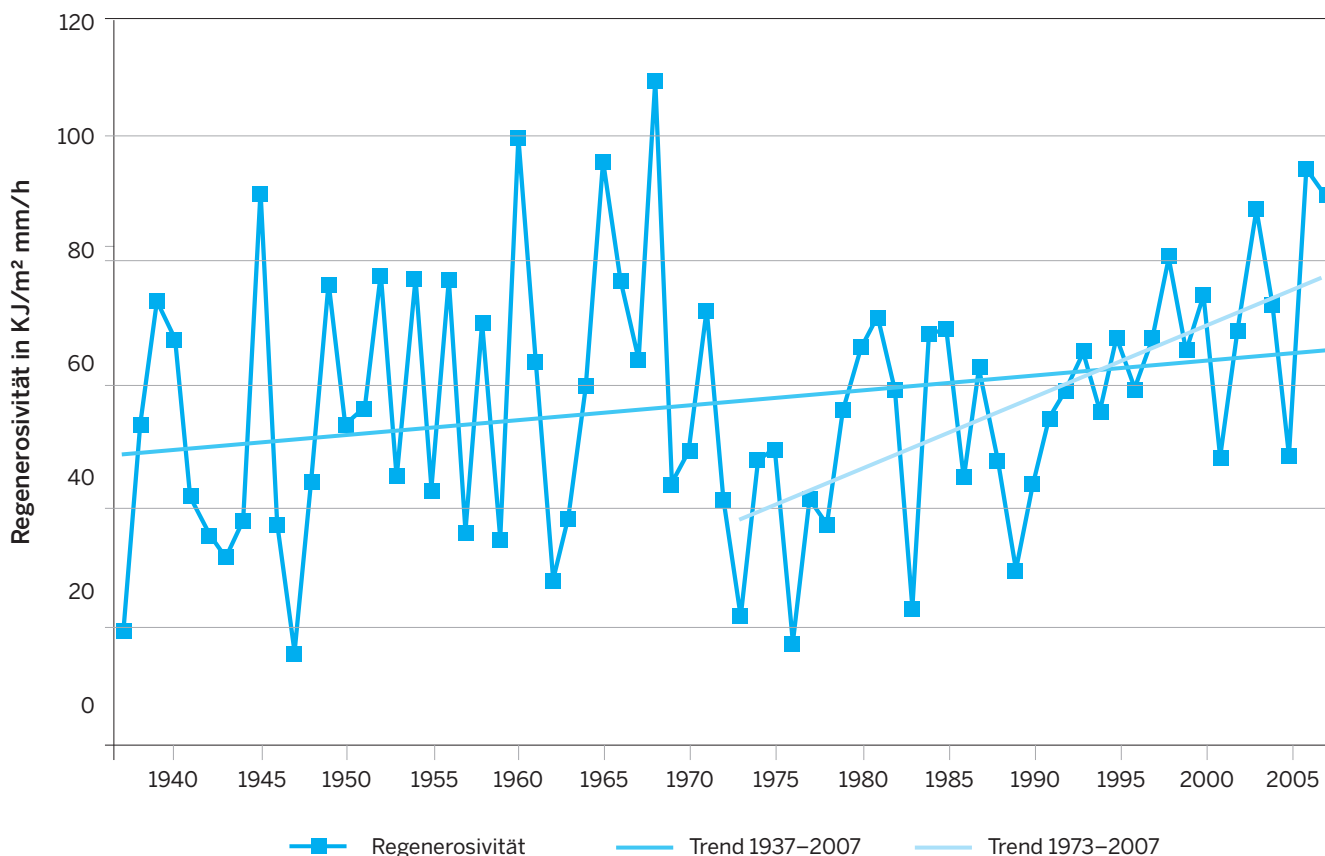


Abbildung 66: Entwicklung der Regenerosivität (R) von April bis November im Mittel für zehn Stationen im Ruhrgebiet im Zeitraum 1937–2007 beziehungsweise 1973–2007 (NEUHAUS et al. 2010)

6.2 Bodentemperatur

Die Bodentemperatur wird von der Lufttemperatur beeinflusst. Sie unterliegt wie diese natürlichen Schwankungen im Laufe eines Tages und Jahres. Auf der anderen Seite beeinflusst sie ihrerseits die Aktivität von Bodenorganismen und die damit in Verbindung stehende Entwicklung von Humus im Boden. Die Bodentemperatur wird an der Beispielstation Waldfeucht als ein Indikator im Klimafolgenmonitoring im Umweltbereich „Boden“ von Beginn an geführt und jährlich aktualisiert (www.klimafolgenmonitoring.nrw.de).

Abbildung 65 zeigt die räumliche Verteilung der mittleren Bodentemperaturen in 5 cm Tiefe im Zeitraum 1991 bis 2010 in NRW. Dabei entspricht die Verteilung der der mittleren Lufttemperaturen in NRW (siehe Kapitel 2.1, Abbildung 3): Besonders hohe mittlere Bodentemperaturen von fast 12 °C werden entlang des Rheingrabens registriert. In den Mittelgebirgsregionen von NRW liegen die mittleren Bodentemperaturen dagegen um 7,5 °C. Dieser Zusammenhang verdeutlicht den direkten Einfluss der Lufttemperaturen auf die Bodentemperaturen.

Höhere Lufttemperaturen und zunehmende Sonnenscheindauer führten in den vergangenen Jahren zu einem Anstieg der Bodentemperaturen, wie beispielhaft an der Station Waldfeucht in Abbildung 67 dargestellt ist. Im Zeitraum von 1993 bis 2015 hat demnach die mittlere Boden-

temperatur in 5 cm Tiefe an der Station Waldfeucht um 1,3 K zugenommen. In 50 cm Tiefe wurde ein Anstieg um etwa 1,1 K registriert. Dies entspricht einer Zunahme von 0,5 K pro Jahrzehnt. Die Lufttemperatur in 2 m Höhe erhöhte sich für den entsprechenden Zeitraum um 0,8 K. Die Werte ergeben sich jeweils aus der Differenz von Anfang und Ende des jeweiligen eingezeichneten Trends. Der Trend der Bodentemperatur in 5 und 50 cm Tiefe ist nach dem Mann-Kendall-Test statistisch sehr signifikant. Der Trend der Lufttemperatur ist für diesen Zeitraum signifikant.

Die Bodenmessstationen Aachen und Essen des DWD verfügen über die längsten Aufzeichnungszeiträume ab 1951 in NRW. Sie zeigen beide mit 0,4 K pro Jahrzehnt in 100 cm Tiefe einen ähnlichen Temperaturanstieg (Koch 2010).

Die Beobachtung, dass die Bodentemperaturen stärker steigen als die Lufttemperaturen lassen vermuten, dass neben der Lufterwärmung und der Zunahme der Sonnenscheindauer noch weitere Faktoren zur Erhöhung der Bodentemperaturen beitragen. Denkbar ist eine höhere Energiezufuhr in den Boden durch eine andere Verteilung der Niederschläge im Jahr. Aber auch eine erhöhte Bodenorganismenaktivität, bedingt durch die bereits gestiegenen Bodentemperaturen, kann einen Einfluss haben.

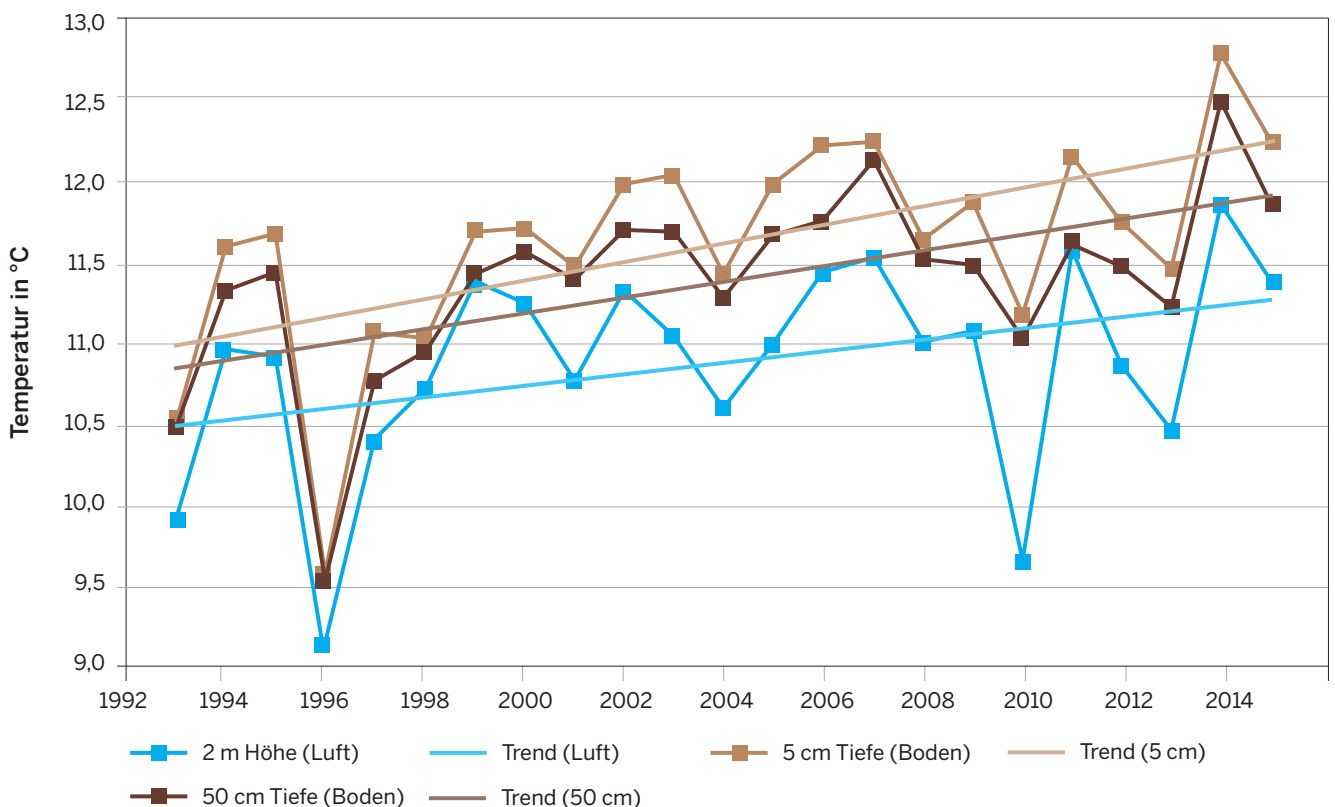


Abbildung 67: Jahresmittel der Lufttemperatur in 2 m Höhe und der Bodentemperaturen unter Grünland in 5 cm sowie in 50 cm Tiefe ab dem Jahr 1993 an der Station Waldfeucht

6.3 Bodenwasserhaushalt im Wald

Rund 27 Prozent der Fläche von NRW ist mit Wald bedeckt und leistet unter anderem einen wertvollen Beitrag zur Regulierung der Wasserflüsse im Naturhaushalt. Grundsätzlich sind Wälder an das Wasser- und Wärmeangebot des jeweiligen Standortes gut angepasst. Da es aber noch schwierig ist zu beurteilen, wie die unterschiedlichen Waldtypen auf den Klimawandel reagieren, erhebt das LANUV im Rahmen des forstlichen Umweltmonitorings auf vier intensiv untersuchten Flächen (Abbildung 65) Daten zum Wasserhaushalt von Wäldern (Tabelle 10).

Im Bergland (Flächen Schwaney und Elberndorf) geht im langjährigen Durchschnitt der größte Teil aus dem Niederschlagswasser direkt in die Tiefenversickerung über und verlässt das Waldökosystem. Im Unterschied hierzu verdunsten im Tiefland (Flächen Tannenbusch und Haard) bereits 60 bis 80 Prozent des Niederschlags im Kronenraum der Bestände (Interzeption und Transpiration). Eine Zunahme warmtrockener Wetterlagen würde somit vor allem die Wälder im Tiefland einem erhöhten Trockenstressrisiko aussetzen.

Wie gut die Wälder Trockenphasen überstehen hängt entscheidend davon ab, wieviel pflanzenverfügbares Wasser der Boden speichern kann. Die Spanne für den maximalen Wasservorrat reicht von 300 mm in einem Lössboden am unteren Niederrhein (Tannenbusch) bis 80 mm im tonreichen Kalkverwitterungslehm im ostwestfälischen Bergland (Schwaney). Mit rund 200 mm zeigt der potenzielle Wasservorrat in der westfälischen Bucht auf einem sandigen Boden (Haard) eine mittlere Größenordnung. Unter diesen Bedingungen sind sehr unterschiedliche Reaktionsmuster im Wasserhaushalt der Wälder auf den Klimawandel möglich.

Die Bodensaugspannung zeigt an, wie stark das Wasser im Boden gebunden ist. Unter trockenen Verhältnissen stellen sich hohe und bei Wassersättigung niedrige Werte ein. An der Station Haard lassen sich die Abfolge von trockenen und feuchten Jahren gut erkennen (Abbildung 68).

Tabelle 10: Wasserhaushalt in Waldbeständen

Fläche	Messzeitraum	Waldtyp	FN	I	E	T	OA	TS
Tannenbusch	1997–2015	Eichenmischwald	855	28 %	6 %	51 %	3 %	12 %
Haard	1995–2015	Buchenwald	870	20 %	3 %	38 %	0 %	38 %
Schwaney	2007–2015	Buchenmischwald	1.061	11 %	5 %	29 %	2 %	54 %
Elberndorf	1996–2015	Fichtenwald	1.440	18 %	2 %	25 %	3 %	52 %

Verwendete Abkürzungen: FN = Freiflächenniederschlag in mm, I = Interzeption, E = Evaporation, T = Transpiration, OA = Oberflächenabfluss und TS = Tiefenversickerung, gemittelt über den jeweiligen Messzeitraum.



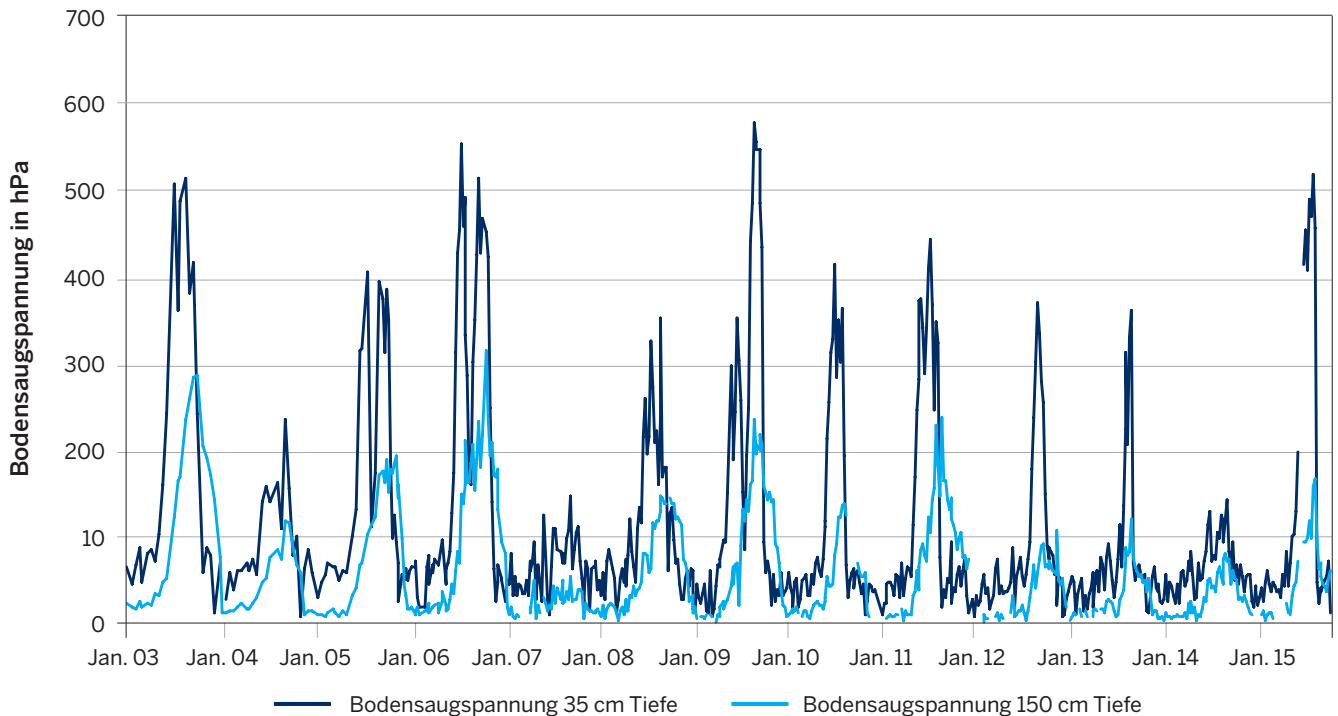


Abbildung 68: Verlauf der Bodensaugspannung unter Buchenwald in der westfälischen Bucht (Haard)

Während sich der Bodenwasservorrat in der Vegetationszeit verringert, wird er im Winterhalbjahr regelmäßig wieder aufgefüllt. Hohe Bodensaugspannungen von mehr als 500 Hektopascal (hPa) sind bisher in den Sommermonaten der relativ heißen Jahre 2003, 2006, 2009 und 2015 gemessen worden (Abbildung 68). Trockene Verhältnisse können mit zeitlicher Verzögerung auch im Unterboden auftreten. Eine außergewöhnlich gute Wasserversorgung der Waldbestände zeigt sich in der Haard 2007 und 2014. 2007 war für ganz NRW das dritt-niederschlagsreichste Jahr (vergleiche Kapitel 2.3, Abbildung 13).

Mit der Transpirationsdifferenz (T_{diff}) wurde ein weiterer Indikator für die Wasserversorgung von Pflanzen entwickelt. T_{diff} gibt die Differenz zwischen der bestmöglichen und der wirklichen Wasserversorgung an. Je geringer die Werte, desto besser sind die Bedingungen für die Bäume. Wie der Verlauf von T_{diff} in Abbildung 69 erkennen lässt, heben sich im Beobachtungszeitraum fünf Jahre durch hohe Werte hervor. Einerseits bestätigen die für 2003, 2006 und 2015 berechneten Werte die angespannte Wasserversorgung der Bäume, die auch aus der Bodensaugspannung erkennbar ist (Abbildung 68). Andererseits weist T_{diff} für zwei weitere Jahre (2010 und 2013) auf Trockenstress hin. Insofern erweist sich Trockenstress im Wald als eine komplexe Wechselbeziehung zwischen meteorologischen und bodenhydrologischen Einflussgrößen.



Mit Tensiometern wird die Bodensaugspannung gemessen

Eine zeitliche Entwicklung ist bisher weder bei der Bodensaugspannung noch an der Transpirationsdifferenz der Bäume festzustellen. Vielmehr deutet die große Variabilität im Wasserhaushalt darauf hin, dass extreme Situationen eine Folge des Klimawandels im Wald sind. Der Umstand, dass Wälder mit verstärkter Fruktifikation, Reduktion der Belaubungsdichte und Zuwachsrückgängen auf extreme Wettersituationen reagieren, unterstreicht die Schlüsselrolle, die dem pflanzenverfügbaren Wasservorrat im Boden zukommt.

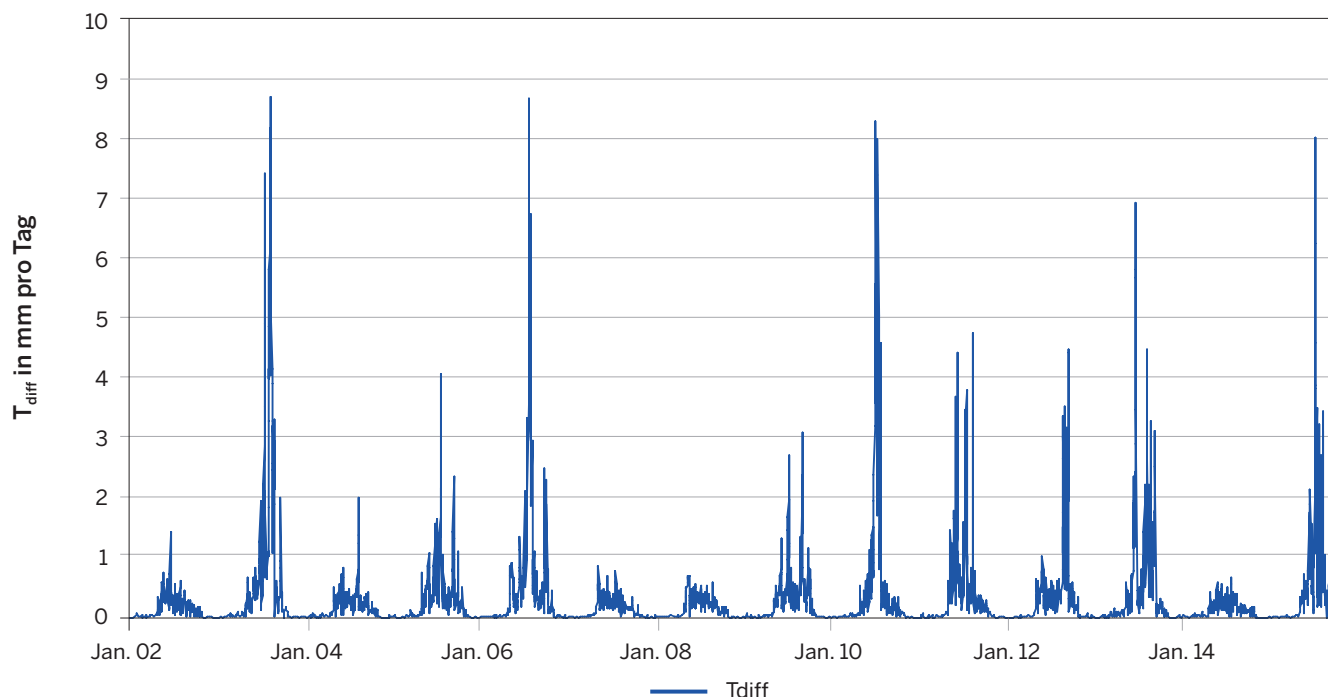


Abbildung 69: Verlauf der Transpirationsdifferenz der Buchen in der Westfälischen Bucht (Haard)

6.4 Humusgehalte und -vorräte in den Böden

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Humusgehalte in Ackerböden sind von besonderer Bedeutung für die Landwirtschaft. Aus diesem Grund wird seit 2009 ein Bodenmonitoring auf Ackerflächen in NRW, gemeinsam mit dem Geologischen Dienst (GD), der Landwirtschaftskammer NRW (LWK) und der Universität Bonn durchgeführt. In Abbildung 65 ist die Lage der insgesamt 45 Untersuchungsflächen dargestellt. Jeweils 15 Flächen liegen im Niederrheinischen Tiefland, in der Rheinischen und der Westfälischen Bucht. In diesen Regionen ist der Anteil an ackerbaulich genutzten Flächen besonders hoch. Bei der Auswahl wurden die Bodenart, die prognostizierte

Bodentemperatur und Niederschlagsveränderungen und die Bewirtschaftung berücksichtigt.

Abbildung 70 stellt für die drei Regionen, jeweils aus 15 Untersuchungsflächen zusammengefasst, die mittleren Humusvorräte in den Oberböden und den Unterböden seit dem Jahr 2009 dar. Die Ermittlung der Humusvorräte erfolgt alle drei Jahre.

Im Zeitraum von 2009 bis 2015 haben sich die Humusvorräte im Mittel über die untersuchten Regionen betrachtet nicht signifikant verändert. Der Betrachtungszeitraum ist aber zur Erfassung von Veränderungen des Humusvorrats noch sehr kurz.

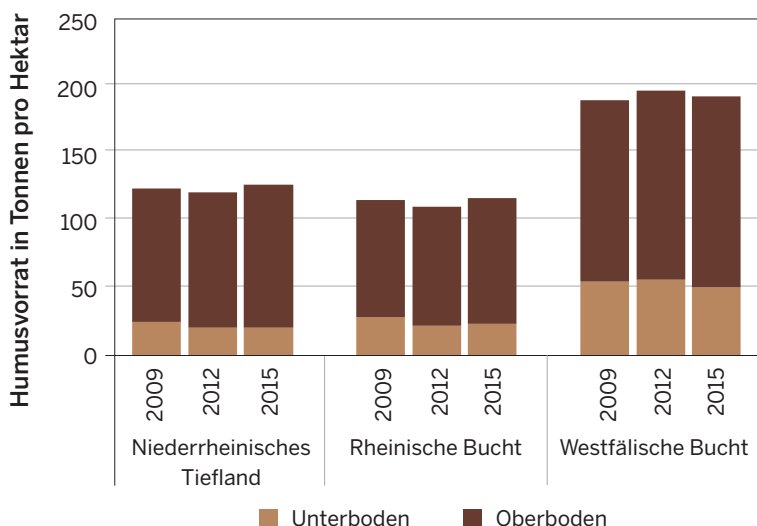


Abbildung 70: Veränderung der Humusvorräte auf Ackerflächen in 0–60 cm Bodentiefe

Ein Vergleich der Regionen zeigt, dass trotz der eher sandigen Böden der Westfälischen Bucht die Humusvorräte sowohl im Ober- als auch im Unterboden hier deutlich über den Humusvorräten der Rheinregionen mit ihren fruchtbaren Lössböden liegen. Einen entscheidenden Einfluss auf den Humusgehalt der Böden haben neben dem Klima die Bewirtschaftung und die (ehemaligen) Grundwasserstände. Einige der Böden im Untersuchungskollektiv aus der Westfälischen Bucht haben (früher) hohe Grundwasserstände gehabt und enthalten daher „historisch bedingt“ höhere Kohlenstoffvorräte und somit Humus.

7 Fazit

Der Klimawandel ist in NRW angekommen. Die Jahresmitteltemperaturen in allen Regionen NRWs sowie in allen Jahreszeiten sind seit Beginn der Messungen im Jahr 1881 angestiegen. Von den 20 wärmsten Jahren seit Messbeginn lagen elf im 21. Jahrhundert und nur vier vor 1990. Es werden mehr Heiße Tage und weniger Frost- und Schneetage in NRW gemessen. Durch die steigenden Temperaturen haben sich die Niederschlagsmuster verändert: die mittleren Niederschlagssummen haben seit 1881 zugenommen – am deutlichsten im Winter. Die Anzahl der Trockenen Tage hat abgenommen, Tage mit Starkniederschlägen haben hingegen zugenommen.



Die Folgen der meteorologischen Veränderungen sind für die Menschen in NRW vor allem in den Städten und Ballungsräumen spürbar: hier kommt es im Sommer durch stadtklimatische Effekte verstärkt zu Hitzebelastung.

Auch das häufigere Auftreten von Starkregenereignissen und Stürmen in Städten rückt vor allem durch immense Schäden an Gebäuden und Infrastruktur mehr und mehr in das öffentliche Interesse.

Der Klimawandel hat sich bereits auf die Natur und die Umwelt in NRW ausgewirkt. Dies zeigen Messungen der verschiedenen Monitoringprogramme des LANUV. Viele Änderungen sind derart kausal mit dem Klimawandel verknüpft, dass sie als Indikatoren in das Klimafolgenmonitoring NRW aufgenommen worden sind. Hierzu zählen der Anstieg der Boden- und Gewässertemperaturen oder die Veränderung von Niederschlagsmustern. Insbesondere die phänologischen Frühlingsphasen haben sich nach vorne verlagert, aber auch die Vegetationsphasen verlängert. Wärmeliebende Arten haben ihre Verbreitungsgebiete erweitert, Kälte liebende hingegen verkleinert. Zu den Gewinnern des Klimawandels zählen viele Neobiota, die sich aufgrund höherer Jahresmitteltemperaturen und milderer Wintern erst in NRW etablieren konnten. Unter den Neobiota gibt es vereinzelt invasive Arten, aber auch Überträger von Krankheiten, die sich negativ auf die Gesundheit von Mensch und Tier auswirken können.

NRW ist als das am dichtesten besiedelte Bundesland Deutschlands in besonderem Maße vom Klimawandel betroffen – aber gleichzeitig auch in besonderem Maße dafür verantwortlich. Hier werden ein Drittel aller in Deutschland entstehenden Treibhausgase emittiert. Daher hat NRW als erstes Bundesland 2013 ein eigenes Klimaschutzgesetz mit verbindlichen Emissionsminderungszielen verabschiedet. Zur Umsetzung dieser ehrgeizigen Klimaschutzziele hat der Landtag Ende 2015 einen ersten Klimaschutzplan beschlossen. Insgesamt umfasst dieser Plan 154 Maßnahmen für den Klimaschutz und 66 Maßnahmen für die Klimafolgenanpassung. Denn neben der Minderung der Treibhausgasemissionen ist die Anpassung an die Folgen des Klimawandels die zweite wichtige Säule einer erfolgreichen Klimapolitik. Und hier schließt sich der Kreis: um den Erfolg der Maßnahmen aus dem Klimaschutzplan zu messen, wird in den nächsten Jahren ein umfassendes Monitoring in NRW etabliert. Hierzu zählt einerseits die Konzeption eines Wirkungsmonitorings. Aber in diesem Zusammenhang soll auch das Klimafolgenmonitoring ausgebaut und um weitere Handlungsfelder erweitert werden. Weitere Informationen zu Klimawandel, Klimaschutz und Klimafolgenanpassung finden sich im Klimaschutzportal NRW (www.klimaschutz.nrw.de).

Literaturverzeichnis

- aqua_plan GmbH, hydro & meteo GmbH & Co KG, dr. papadakis GmbH (2010): Extremwertstatistische Untersuchung von Starkniederschlägen in NRW (ExUS). Abschlussbericht, erstellt für das LANUV NRW.
- Arnold, W.; Ruf, T.; Reimoser, S.; Tataruch, F.; Onderscheka, K. & Schober, F. (2004): Nocturnal hypometabolism as an overwintering strategy of red deer (*Cervus elaphus*). – *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* 286 (1): R 174 –R 181.
- Bardehle, D. (2004): Hitzetote in Nordrhein-Westfalen im Sommer 2003. Landesgesundheitszentrum NRW (Hrsg.): NRW kurz und informativ. [https://www.lzg.nrw.de/themen/gesundheits_berichte_daten/gesundheits-in-nrw/nrw-kurz-und-informativ/](https://www.lzg.nrw.de/themen/gesundheit_berichte_daten/gesundheits-in-nrw/nrw-kurz-und-informativ/) (zuletzt abgerufen am 27.06.2016).
- Blüthgen, N.; Simons, N.; Jung, K.; Prati, D.; Renner, S.; Boch, S.; Fischer, M.; Hölzel, N.; Klaus, V.; Kleinebecker, T.; Tschapka, M.; Weisser, W. & Gossner, M. (2016): Land use imperils plant and animal community through changes in asynchrony rather than biodiversity. In: *Nature Communications* 7: 10697. DOI: 10.1038/ncomms 10697.
- Boender, G.; Hagenaars, T.; Elbers, A.; Gethmann, J.; Meroc, E.; Guis, H. & de Koeijer, A. (2014): Confirmation of spatial patterns and temperature effects in Bluetongue virus serotype-8 transmission in NW-Europe from the 2007 reported case data. In: *Veterinary Research* 45:75.
- Brugger, K. & Rubel, F. (2013): Characterizing the species composition of European Culicoides vectors by means of the Köppen-Geiger climate classification. *Parasites & Vectors* 6:333.
- Bunzel-Drüke, M. (2011): Wie reagieren Fische und Rundmäuler auf den Klimawandel? Prognose zur Wirkung des Klimawandels auf Fische und Rundmäuler in Nordrhein-Westfalen. In: *Natur in NRW*, Nr. 4/2011.
- Devictor, V.; Julliard, R.; Jiguet, F. & Couvet, D. (2008): Distribution of specialist and generalist species along spatial gradients of habitat disturbance and fragmentation. *Oikos* 117 (4): 507–514.
- Dietzer, B.; Günther, T.; Klämt, A.; Matthäus, H. & Reich, T. (2001): Langzeitverhalten hydrologischer Größen. In: *Deutscher Wetterdienst* (Hrsg.): Klimastatusbericht 2001: 67–85.
- DIN 4049-3 (1994): Hydrologie – Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie. Beuth-Verlag.
- DWD - Deutscher Wetterdienst (Hrsg.) (1996–2014): Deutscher Klimaatlas: Erläuterungen – Erläuterungen zu den Klimaszenarien. http://www.dwd.de/DE/leistungen/deutscherklimaatlas/erlaeuterungen/klimaszenarien/klimaszenarien_node.html (zuletzt abgerufen am 26.07.2016)
- DWD Wetterlexikon. Niederschlagstag. <http://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=101812&lv3=101910> (zuletzt abgerufen am 28.07.2016)
- EEA – European Environmental Agency (2008): Impacts of Europe’s changing climate – 2008 indicator-based assessment. EEA Report No 4/2008. ISSN 1725-9177.
- Faes, C.; van der Stede, Y.; Guis, H.; Staubach, C.; Ducheyne, E.; Hendrickx, G. & Mintiens, K. (2013): Factors affecting Bluetongue serotype 8 spread in Northern Europe in 2006: the geographical epidemiology. *Prev. Vet. Med.* 110 (2): 149-58. doi: 10.1016/j.prevetmed.2012.11.026.
- Friedrich, B.; Hacker, J.; Hasnain, S.; Mettenleiter, T. & Schell, J. (2010): Climate Change and Infectious Diseases. In: *Nova Acta Leopoldina* 111 (381). Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH.
- GDV – Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (Hrsg.) (2015): Naturgefahrenreport 2015. http://www.gdv.de/wp-content/uploads/2015/10/Naturgefahrenreport-2015_Die-Unwetter-Bilanz-der-deutschen-Versicherer_GDV.pdf (zuletzt abgerufen am 06.05.2016)
- Gehring, H.; Schacht, E.; Maylaender, N. & Spletstoesser, W. (2012): Presence of an emerging subclone of *Francisella tularensis* holarctica in Ixodes ricinus ticks from south-western Germany. In: *Ticks and Tick-borne Diseases* 4 (1-2): 93–100.
- GERICS - Climate Service Center Germany (Hrsg.): Starkregen. http://www.climate-service-center.de/033610/index_0033610.html.de (zuletzt abgerufen am 16.03.2016).
- Hartelt, K.; Pluta, S.; Oehme, R. & Kimmig, P. (2008): Spread of ticks and tick-borne diseases in Germany due to global warming. In: *Parasitol Res* 103 Suppl 1:109-16.
- Herrmann, F.; Chen, S.; Kunkel, R. & Wendland, F. (2014): Auswirkungen von Klimaänderungen auf das nachhaltig bewirtschaftbare Grundwasserdargebot und den Bodenwasserhaushalt in Nordrhein-Westfalen. Forschungszentrum Jülich. Jülich. IKS-Bericht Nr. 151d (2006): Vergleich der Wärmeeinleitungen 1989 und 2004 entlang des Rheins.
- IKSR-Bericht Nr. 209 (2013): Darstellung der Entwicklung der Rheinwassertemperaturen auf Basis validierter Temperaturmessungen von 1978 bis 2011.
- Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC (2000): IPCC Special Report. Emission Scenarios. http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emissions/emissions_scenarios.pdf (zuletzt abgerufen am 25.04.2016).
- Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC (2014): Klimaänderung 2014 – Synthesebericht. Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. Deutsche Übersetzung der englischen Originalfassung. Herausgegeben von: Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle. <http://www.de-ipcc.de/de/200.php> (zuletzt abgerufen am 25.04.2016).
- Jaenson, T.; Hjertqvist, M.; Beregström, T. & Lundkvist, A. (2012): Why is tick-borne encephalitis increasing? A review of the key factors causing the increasing incidence of human TBE in Sweden. In: *Parasites & Vectors* 5:184.
- Jendritzky, G. (2007): Folgen des Klimawandels für die Gesundheit. In: Endlicher, W. & Gerstengarbe, F.-W. (Hrsg.): *Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke*. Potsdam.
- Jore, S.; Vanwamabeke, S.; Viljugrein, H.; Isaksen, K.; Kristoffersen, A.; Woldehiwet, Z.; Johansen, B.; Brun, E.; Brun-Hansen, H.; Wetermann, S.; Larsen, I.-L.; Yttrhus, B. & Hofshagen, M. (1994): Climate and environmental change drives *Ixodes ricinus* geographical expansion at the northern range margin. In: *Parasite & Vectors* 7:11.
- Kampen, H.; Rötzel, D.; Kurtenbach, K.; Maier, W. & Seitz, H. (2004): Substantial Rise in the Prevalence of Lyme Borreliosis spirochetes in a Region of Western Germany over a 10-Year Period. In: *Appl Environ Microbiol* 70(3):1576-82.
- Kasang, D.: Wetterextreme und Klimawandel. http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Wetterextreme_und_Klimawandel (zuletzt abgerufen am 26.07.2016)
- Kauffmann, M.; Rehbein, S.; Pfister, K. & Silaghi, C. (2012): *Anaplasma phagocytophilum* und Piroplasmen bei Wildwiederkäuern in Deutschland. Tagung der DVG-Fachgruppe Parasitologie und parasitäre Krankheiten: Vektoren und vektorübertragene Krankheiten. Vortrag 3. Juli 2012, Hannover.

- Koch, D. (2010): Langzeit-Entwicklung der Bodentemperaturen in verschiedenen Naturräumen Nordrhein-Westfalens. Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität zu Köln. 195 Seiten.
- Köppen, W. (1936): Das geographische System der Klimate. Berlin.
- Kuttler, W. (2010): Urbanes Klima, Teil 1. In: Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft. In: Umweltmeteorologie 70 (9): 378–382.
- Kuttler, W. (2011): Klimawandel im urbanen Bereich, Teil 1, Wirkungen; Climate change in urban areas, Part 1, Effects. In: Environmental Sciences Europe 23: 1–12.
- Kyselý, J., 2004: Mortality and displaced mortality during heat waves in the Czech Republic. In: International Journal of Biometeorology 49: 91–97.
- LANUV (2010): Klima und Klimawandel in Nordrhein-Westfalen – Daten und Hintergründe. LANUV-Fachbericht 27. Recklinghausen.
- LANUV (2013): Klimawandelgerechte Metropole Köln. Abschlussbericht. LANUV-Fachbericht 50. Recklinghausen.
- Laschewski, G. & Jendritzky, G. (2002): Effects of thermal environment on human health: an investigation of 30 years of daily mortality data from SW Germany. In: Climate Research 21: 91–103.
- Löpmeier, F.-J. (1994): Berechnung der Bodenfeuchte und Verdunstung mittels agrarmeteorologischer Modelle. In: Zeitschrift für Bewässerungswirtschaft 29: 157–167.
- Lutz W. (2009): Fallwildbericht 2008/09. Landesbetrieb Wald und Holz, Forschungsstelle für Jagdkunde und Wildschadenverhütung. Ektoparasiten: 11. Bonn ISSN: 1860-7675.
- Medlock, JM.; Hansford, K.; Bormane, A.; Derdakova, M.; Estrada-Pena, A.; George, J.; Golovljova, I.; Jaenson, T.; Jensen, J.-K.; Jensen, P.; Kazimirova, M.; Oteo, J.; Pap, A.; Pfister, K.; Plantard, O.; Randolph, S.; Rizzoli, A.; Santos-Silva, M.; Sprong, H.; Vial, L.; Hendrich, G.; Zeller, H. & van Bortel, W. (2013): Driving forces for changes in geographical distribution of Ixodes ricinus ticks in Europe. In: Parasites & Vectors 6:1.
- MKULNV (2010): Natur im Wandel – Auswirkungen des Klimawandels auf die biologische Vielfalt in Nordrhein-Westfalen. MKULNV. Düsseldorf.
- MKULNV (2011): Klimawandel und Boden – Auswirkungen der globalen Erwärmung auf den Boden als Pflanzenstandort. MKULNV. Düsseldorf.
- MKULNV (2014): Ableitung von gewässertypspezifischen Temperaturanforderungen, Prüfung von wärmerlevanten Einleitungen und möglicher Verbesserungspotenziale nach Stand der Technik, sowie Erarbeitung einer Vorgehensweise für die einzugsgebietsweite Bewirtschaftung der Gewässer bezogen auf den Temperaturhaushalt. MKULNV. Düsseldorf.
- MKULNV (2015 a): Klimaschutzplan Nordrhein-Westfalen – Klimaschutz und Klimafolgenanpassung. MKULNV. Düsseldorf.
- MKULNV (2015 b): Waldzustandsbericht 2015 – Langfassung. Bericht über den ökologischen Zustand des Waldes in NRW. MKULNV. Düsseldorf.
- MUNLV (2009): Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Biologische Vielfalt: Pilotstudie zu den voraussichtlichen Auswirkungen des Klimawandels auf ausgewählte Tier- und Pflanzenarten in Nordrhein-Westfalen. MUNLV. Düsseldorf.
- Nehring, S.; Kowarik, I.; Rabitsch W. & Essl, F. (2013): Naturschutzfachliche Invasivitätsbewertungen für in Deutschland wild lebende Gefäßpflanzen. BfN-Skripten 352, 2013.
- Nehring, S., W. Rabitsch, I. Kowarik & F. Essl (2015): Naturschutzfachliche Invasivitätsbewertungen für in Deutschland wild lebende Wirbeltiere. BfN-Skripten 409, 2015.
- Neuhaus, P.; Fiener, P. & Botschek, J. (2010): Einfluss des globalen Klimawandels auf die räumliche und zeitliche Variabilität der Niederschlagserosivität in NRW. Abschlussbericht, erstellt für das LANUV NRW. <http://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/klima/pdf/Abschlussbericht-Regenerosivitaet.pdf>
- Oke, T. R. (1973): City size and the urban heat island. In: Atmospheric Environment 7: 769–779.
- Peschke, E. (2005): Zeitstrukturen endokriner Systeme. Endokrinologie II 2005. Abhandlungen der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig. Stuttgart/Leipzig: S. Hirzel.
- Plard, F., Gaillard, J.-M.; Bonenfant, C.; Hewison, A.; Delorme, D.; Cargnelutti, B.; Kjellander, P.; Nilsen, E. & Coulson, T. (2013): Parturition date for a given female is highly repeatable within five roe deer populations. In: Biol Lett 9 (1): 20120841. <http://dx.doi.org/10.1098/rsbl.2012.0841>.
- Rieck, W. (1955): Die Setzzeit bei Reh-, Rot- und Damwild in Mitteleuropa. In: Z Jagdwiss 1(2): 69–75.
- Ruhnau, U.-J. (2014): Der Sturm Ela über Düsseldorf – ein Protokoll. In: RP online vom 09.07.2014. <http://www.rp-online.de/nrw/staedte/duesseldorf/der-sturm-ela-ueber-duesseldorf-einprotokoll-aid-1.4373526> (zuletzt abgerufen am 06.05.2016)
- Schirmer, H.; Buschner, W.; Cappel, A.; Mattäus, H.-G. & Schlegel, M. (1987): Meteorologie – Meyers kleines Lexikon. Mannheim.
- Simon, O.; Lang, J. & Petrak, M. (2008): Rotwild in der Eifel. Lösungen für die Praxis aus dem Pilotprojekt Monschau-Elsenborn. Klitten, Lutra.
- Stadt Münster (Hrsg.) (2014): Bericht zum Unwetter am 28.07.2014. https://www.stadt-muenster.de/sessionnet/sessionnetbi/vo0050.php?__kvonr=2004037925 (zuletzt abgerufen am 04.05.2016)
- Stevenson, T.; Visser, M.; Arnold, W.; Barrett, P.; Biello, S.; Dawson, A.; Denlinger, D.; Dominoni, D.; Ebling, F.; Elton, S.; Evans, N.; Ferguson, H.; Foster, R.; Hau, M.; Haydon, D.; Hazlerigg, D.; Heide-man, P.; Hopcraft, J.; Jonsson, N.; Kronfeld-Schor, N.; Kumar, V.; Lincoln, G.; MacLeod, R.; Martin, S.; Martinez-Bakker, M.; Nelson, R.; Reed, R.; Robinson, J.; Rock, D.; Schwartz, W.; Steffan-Dewenter, I.; Tauber, E.; Thackeray, S.; Umstatter, C.; Yoshimura, T. & Helm, B. (2015): Disrupted seasonal biology impacts health, food security and ecosystems. In: Proc. R. Soc. B 282 (1817): 20151453. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2015.1453>
- Team Sammelbericht NRW (2013). Charardrius 49: 15–83.
- UBA – Umweltbundesamt (Hrsg.) (2015 a): Trends der Lufttemperatur. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klimawandel/trends-der-lufttemperatur> (zuletzt aufgerufen am 28.07.2016)
- UBA – Umweltbundesamt (Hrsg.) (2015 b): Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/monitoringbericht-2015> (zuletzt abgerufen am 04.05.2016)
- Vor, T.; Kniffer, C.; Hagedorn, P.; Niedrig, M. & Rühle, F. (2010): Tick burden on European roe deer (*Capreolus capreolus*). In: Exp Appl Acarol 51(4): 405-17.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Jahresmittel der Lufttemperaturen in NRW im Zeitraum 1881–2015. Zusätzlich sind der langjährige Mittelwert (orange), die dekadisch gleitenden Mittel (grün) sowie lineare Trends (rot) dargestellt (Datenquelle: DWD).	13	Abbildung 18: Anzahl der Tage mit Starkniederschlag (> 10 mm, > 20 mm und > 30 mm) ab 1951 als Mittel über NRW (Datenquelle: DWD)	31
Abbildung 2: Jahresmittel der jeweils 20 wärmsten und kältesten Jahre in NRW seit Beginn der Messungen 1881. Jahre in der ersten KNP 1881–1910 wurden in der Achsenbeschriftung blau, Jahre in der letzten 30-Jahresperiode 1986–2015 orange gekennzeichnet (Datenquelle: DWD).	16	Abbildung 19: Starkniederschlagstage > 10 mm in NRW als Mittel über die KNP 1981–2010 sowie die Änderung im Vergleich zur KNP 1951–1980 (Datenquelle: DWD, Kartengrundlage: Geobasis NRW)	32
Abbildung 3: Vergleich der mittleren Lufttemperaturen in NRW für die KNP 1951–1980 und 1981–2010 (Datenquelle: DWD, Kartengrundlage: Geobasis NRW)	17	Abbildung 20: Starkniederschlagstage > 20 mm in NRW als Mittel über die KNP 1981–2010 sowie die Änderung im Vergleich zur KNP 1951–1980 (Datenquelle: DWD, Kartengrundlage: Geobasis NRW)	32
Abbildung 4: Mittlere Lufttemperatur der Jahreszeiten in NRW im Zeitraum 1881–2015 (Datenquelle: DWD)	18	Abbildung 21: Starkniederschlagstage > 30 mm in NRW als Mittel über die KNP 1981–2010 sowie die Änderung im Vergleich zur KNP 1951–1980 (Datenquelle: DWD, Kartengrundlage: Geobasis NRW)	33
Abbildung 5: Anzahl der Heißen Tage pro Jahr in NRW seit Beginn der Messungen im Zeitraum 1891–2015 (Datenquelle: DWD)	19	Abbildung 22: Mittlere Anzahl der Starkniederschlagstage > 10 mm an den zehn ausgewählten Messstellen in NRW sowie das räumliche Mittel der zehn Stationen für die KNP 1951–1980 und 1981–2010 (Datenquelle: DWD)	33
Abbildung 6: Durchschnittliche Anzahl der Heißen Tage in NRW in der KNP 1981–2010 sowie Veränderung relativ zur KNP 1951–1980 (Datenquelle: DWD, Kartengrundlage: Geobasis NRW)	20	Abbildung 23: Mittlere Anzahl der Starkniederschlagstage > 20 mm an den zehn ausgewählten Messstellen in NRW sowie das räumliche Mittel der zehn Stationen für die KNP 1951–1980 und 1981–2010 (Datenquelle: DWD)	34
Abbildung 7: Jahresverlauf der mittleren Anzahl der Heißen Tage an den Stationen Köln-Bonn und Kahler Asten in den Zeiträumen 1957–1986 und 1986–2015 (Datenquelle: DWD)	21	Abbildung 24: Mittlere Anzahl der Starkniederschlagstage > 30 mm an den zehn ausgewählten Messstellen in NRW sowie das räumliche Mittel der zehn Stationen für die KNP 1951–1980 und 1981–2010 (Datenquelle: DWD)	34
Abbildung 8: Anzahl der Eistage in NRW im Zeitraum 1891–2015 (Datenquelle: DWD)	21	Abbildung 25: Mittlere Anzahl der Starkniederschlagstage der Intensitäten > 10 mm, > 20 mm und > 30 mm in den vier Jahreszeiten als räumliches Mittel der zehn Stationen für die KNP 1951–1980 und 1981–2010 (Datenquelle: DWD)	35
Abbildung 9: Durchschnittliche Anzahl der Eistage in NRW in der KNP 1981–2010 sowie Veränderung relativ zur KNP 1951–1980 (Datenquelle: DWD, Kartengrundlage: Geobasis NRW)	22	Abbildung 26: Anzahl der Schneetage an der Station Kahler Asten im Zeitraum 1955–2015 (Datenquelle: DWD)	36
Abbildung 10: Jahresverlauf der mittleren Anzahl der Eistage an den Stationen Köln-Bonn und Kahler Asten in den Zeiträumen 1957–1986 und 1986–2015 (Datenquelle: DWD)	23	Abbildung 27: Anzahl der Schneetage in NRW in der KNP 1981–2010 sowie Veränderung relativ zur KNP 1951–1980 (Datenquelle: DWD, Kartengrundlage: Geobasis NRW)	37
Abbildung 11: Mittlere Jahres-Niederschlagssummen in NRW im Zeitraum 1881–2015 sowie langjähriger Mittelwert, dekadisch gleitendes Mittel und linearer Trend (Datenquelle: DWD)	24	Abbildung 28: Jahresverlauf der Schneetage der jeweils ersten (1955–1984) und letzten (1986–2015) 30-Jahr-Periode der Messreihe an der Station Kahler Asten (Datenquelle: DWD)	37
Abbildung 12: Vergleich der mittleren Jahresniederschläge in NRW für die KNP 1951–1980 und 1981–2010 (Datenquelle: DWD, Kartengrundlage: Geobasis NRW)	25	Abbildung 29: Klimatopkarte NRW	40
Abbildung 13: Vergleich der jeweils 20 regenreichsten und regenärmsten Jahre in NRW seit Beginn der Messungen 1881. Jahre in der KNP 1951–1980 wurden in der Achsenbeschriftung orange, Jahre in 1981–2010 blau gekennzeichnet (Datenquelle: DWD).	26	Abbildung 30: Klimatopkarte der Stadt Köln (links) und Ergebnisse von zwei Temperaturmessfahrten (rechts; linksrheinisch vom 02.07.2010 und rechtsrheinisch vom 21.07.2010, dargestellt als Abweichung vom Mittelwert der Lufttemperatur) (Kartengrundlage: Geobasis NRW)	41
Abbildung 14: Niederschlags-Mittelwerte der vier Jahreszeiten aller KNP des Messzeitraums von 1881–2015 (Datenquelle: DWD)	27	Abbildung 31: Mittlere Jahrestemperatur in °C in Köln für das Jahr 2011 (links) und 2012 (rechts); die Größe der Stationspunkte ist ein Maß für die Höhe der Temperatur (Kartengrundlage: Geobasis NRW)	42
Abbildung 15: Stationsübersicht zur Auswertung der Niederschlagskenntage in NRW (Kartengrundlage: Geobasis NRW)	28	Abbildung 32: Maximale Wärmeinselintensitäten in Abhängigkeit von der Einwohnerzahl für ausgewählte Städte überwiegend aus NRW (KUTTLER 2011)	42
Abbildung 16: Mittlere Anzahl der Trocken Tage in den KNP 1951–1980 und 1981–2010 an den zehn ausgewählten Messstellen in NRW sowie das räumliche Mittel der zehn Stationen (Datenquelle: DWD)	29	Abbildung 33: Anzahl der Heißen Tage ($T_{max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) in Köln für das Jahr 2011 (links) und 2012 (rechts); die Größe der Stationspunkte ist ein Maß für die Anzahl der Heißen Tage (Kartengrundlage: Geobasis NRW)	43
Abbildung 17: Mittlere Anzahl der Trocken Tage nach Jahreszeiten für die KNP 1951–1980 und 1981–2010 als räumliches Mittel der zehn ausgewählten Messstellen in NRW (Datenquelle: DWD)	30		

Abbildung 34: Anzahl der Tropennächte ($T_{min} \geq 20 \text{ }^\circ\text{C}$) in Köln für das Jahr 2011 (links) und 2012 (rechts); die Größe der Stationspunkte ist ein Maß für die Anzahl der Tropennächte (Kartengrundlage: Geobasis NRW)	44	Abbildung 53: Phänologische Jahreszeiten in NRW – Vergleich der KNP 1951–1980 und 1981–2010 (Datenquelle: DWD)	70
Abbildung 35: Durchschnittliche mittlere und maximale UHI-Intensität im Sommer im Zeitraum 1996–2015 in Bochum (Datenquelle: RUB)	45	Abbildung 54: Lage und Namen der Buchen-Dauerbeobachtungsflächen NRW (Kartengrundlage: Geobasis NRW)	71
Abbildung 36: Häufigkeit der sommerlichen Wärmeinselintensität im Zeitraum 1997–2015 in Bochum, Bonn und Köln (Datenquellen: GIUB/Bonn, LANUV/Köln und RUB/Bochum)	46	Abbildung 55: Mittlere phänologische Ereignisse der Buche im Mittel der sechs Dauerbeobachtungsflächen in NRW	73
Abbildung 37: Anzahl der Hitzewellen pro Jahr sowie ihre mittlere und maximale Dauer an den urbanen und ruralen Vergleichsstationen in Bochum, Bonn und Köln (Datenquellen: GIUB/Bonn, LANUV/Köln und RUB/Bochum)	48	Abbildung 56: Verbreitungs-Dichtekarten des Grünspechtes in 2006 (links) und 2015 (rechts). Ein Grünspecht-Brutrevier ist zwischen 50 und 200 ha groß, vereinzelt auch größer (Datenquelle: ÖFS, Kartengrundlage: Geobasis NRW).	74
Abbildung 38: Anzahl der Tage mit Hitzewarnung und Warnung vor extremer Hitze in NRW im Zeitraum 2005–2015 (Datenquelle: DWD)	49	Abbildung 57: Entwicklung der Species Temperature Index (STI)-Wertsummen von Brutvogelarten in NRW (Datenquelle: ÖFS)	75
Abbildung 39: Tage mit starker Wärmebelastung (gefühlte Temperatur $> 32 \text{ }^\circ\text{C}$) im Zeitraum 1971–2015 in Düsseldorf und Köln/Bonn (jeweils Flughafenstation; Datenquelle: DWD)	49	Abbildung 58: Physiologische Anpassungen beim Rotwild im Winter (ARNOLD 2004)	77
Abbildung 40: Der Wasserkreislauf	53	Abbildung 59: mittlerer Zeitpunkt des jeweils ersten Heu- und Silageschnittes in NRW (Datenquelle: DWD)	79
Abbildung 41: Jahresmittel der potenziellen Evapotranspiration und der Lufttemperatur für NRW im Zeitraum 1991–2015 (Datenquelle: DWD)	54	Abbildung 60: Vorkommen von besonders gegenüber einer Temperaturerhöhung sensitiven Fischlebensgemeinschaften in NRW (Kartengrundlage: Geobasis NRW)	80
Abbildung 42: Mittlere potenzielle Evapotranspiration über Gras in NRW im Zeitraum 1991–2015 (Datenquelle: DWD)	56	Abbildung 61: Einfluss des Klimawandels auf die schutzwürdigen Lebensräume in NRW ($n = 48$) (Quelle: MKULNV 2010)	81
Abbildung 43: Jahresgang der mittleren potenziellen Evapotranspiration für NRW im Zeitraum 1991–2015 (Datenquelle: DWD)	56	Abbildung 62: Empfindlichkeitsanalyse – Einfluss des Klimawandels auf ausgewählte Tierarten der untersuchten Lebensraumtypen (Quelle: MKULNV 2010)	82
Abbildung 44: Mittlere klimatische Wasserbilanz NRW im Zeitraum 1961–2015 (Datenquelle: DWD)	57	Abbildung 63: Anteil der durch den Klimawandel geförderten invasiven und potenziell invasiven Pflanzen- und Tierarten (NEHRING et al. 2013 & 2015)	84
Abbildung 45: Mittlere klimatische Wasserbilanz in NRW im Zeitraum 1981–2010 (Datenquelle: DWD; Kartengrundlage: Geobasis NRW)	58	Abbildung 64: Nutrias – erlegte Tiere und Fallwild aus der Jagdstreckenerhebung in NRW im Zeitraum 2000/01 bis 2013/14	86
Abbildung 46: Jahresgang der mittleren monatlichen klimatischen Wasserbilanz als Gebietsmittel für NRW für die Zeiträume 1961–1990 und 1986–2015 (Datenquelle: DWD)	59	Abbildung 65: Standorte mit langjährigen Bodenmesswerten (Hintergrundkarte: Mittlere Bodentemperaturen in 5 cm Tiefe im Zeitraum 1991–2010 (Datenquelle der Hintergrundkarte: DWD, Kartengrundlage: Geobasis NRW)	90
Abbildung 47: Mittlere jährliche Grundwasserneubildung in NRW für die KNP 1981–2010 simuliert mit mGROWA (Datengrundlage: DWD; Kartenquelle: HERRMANN et al. 2014)	60	Abbildung 66: Entwicklung der Regenerosität (R) von April bis November im Mittel für zehn Stationen im Ruhrgebiet im Zeitraum 1937–2007 beziehungsweise 1973–2007 (NEUHAUS et al. 2010)	91
Abbildung 48: Mittlere Sickerwasserstände der Lysimeterstation St. Arnold im Zeitraum 1966–2015 für das hydrologische Sommerhalb-, Winterhalb- und Wasserwirtschaftsjahr (WWJ). Zusätzlich eingezeichnet ist die jährliche Niederschlagssumme an der Station sowie der lineare Trend für die jährliche Grundwasserneubildung (GWN).	61	Abbildung 67: Jahresmittel der Lufttemperatur in 2 m Höhe und der Bodentemperaturen unter Grünland in 5 cm sowie in 50 cm Tiefe ab dem Jahr 1993 an der Station Waldfeucht	92
Abbildung 49: Jährlicher Grundwasserstand an der Station Hamminkeln im Zeitraum 1951–2015	62	Abbildung 68: Verlauf der Bodensaugspannung unter Buchenwald in der westfälischen Bucht (Haard)	94
Abbildung 50: Mittlere und maximale jährliche Wassertemperatur an der Station Kleve-Bimmen im Zeitraum 1974–2015	63	Abbildung 69: Verlauf der Transpirationsdifferenz der Buchen in der Westfälischen Bucht (Haard)	95
Abbildung 51: Mittlerer jährlicher (Kalenderjahr) Abfluss am Pegel Feudingen/Lahn im Zeitraum 1951–2014, ergänzt um den jährlichen Einzugsgebietsniederschlag im Zeitraum 1951–2009 sowie die daraus berechnete Verdunstung	65	Abbildung 70: Veränderung der Humusvorräte auf Ackerflächen in 0–60 cm Bodentiefe	95
Abbildung 52: Länge der Vegetationsperiode (Blühbeginn der Salweide bis Blattverfärbung Stieleiche) in NRW für den Zeitraum 1951–2015 (Datenquelle: DWD)	68		

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bewertung der Signifikanzniveaus mit dem Mann-Kendall-Test	11
Tabelle 2: Flächenmittel für die untersuchten Klimaelemente und -größen sowie deren Änderungen über den jeweiligen Messzeitraum (Datenquelle: DWD)	14
Tabelle 3: Mittelwerte für die untersuchten Parameter zum Stadtklima und deren Änderungen über den jeweiligen Messzeitraum (Datenquellen: DWD, GIUB, LANUV & RUB)	39
Tabelle 4: Anzahl der warmen Temperaturkenntage in Bochum, Bonn und Köln im Zeitraum 1996–2015 (Datenquellen: GIUB/Bonn, LANUV/Köln, RUB/Bochum und wärmste Sommer/DWD)	47
Tabelle 5: Mittelwerte für die untersuchten Parameter aus dem Wasserhaushalt und deren Änderungen über den jeweiligen Messzeitraum (Datenquellen: DWD & LANUV)	54
Tabelle 6: Mittelwerte für die untersuchten Parameter der Biodiversität und deren Änderungen über den jeweiligen Messzeitraum (Datenquellen: DWD & LANUV)	67
Tabelle 7: Phänophasen der Vegetations- und Jahreszeiten in NRW – Vergleich der mittleren Eintrittsdaten der KNP 1951–1980 und 1981–2010 (Datenquelle: DWD)	69
Tabelle 8: Nachweis zeckenbürtiger Erreger in Dam-, Reh- und Muffelwild im Jagdjahr 2009 (KAUFFMANN et al. 2012)	87
Tabelle 9: Mittelwerte für die untersuchten Parameter des Bodens aus dem Kapitel 6 und deren Änderungen über den jeweiligen Messzeitraum	89
Tabelle 10: Wasserhaushalt in Waldbeständen	93

Bildnachweise

© A. Dickhof/Geologischer Dienst NRW – S. 91

fotolia.com Sunny studio – S. 8, Heiko Küverling – S. 23, Brian Jackson – S. 27, anweber – S. 38, rcfotostock – S. 44, Thaut Images – S. 50, Martina Berg – S. 52, jenyateua – S. 55, ruzi – S. 59, CPN – S. 64, A_Bruno – S. 66, M. Schuppich – S. 69, Smileus – S. 72, ErnstPieber – S. 78, alamos82 – S. 82, lucag_g – S. 88, kotafoty – S. 89, domagoj8888 – S. 90, bubblesie – S. 93

D. Franz S. 86 oben re.

J. Gehrmann S. 94

A. Hussner S. 85 unten

LANUV S. 3

C. Michels S. 83 oben, unten re., S. 84

P. Schwartze S. 83 unten li.

shutterstock.com Chayathorn Lertpanyaraj – Titel, Rückseite, Matthijs Wetterauw – S. 12, IndustryAndTravel – S. 18, telesniuk – S. 43, IndustryAndTravel – S. 96

G. Vervoorst S. 85 oben

A. Vierhaus S. 86 oben li.

K.-H. Volkmar S. 76

C. Ziegler S. 71 oben

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen
Leibnizstraße 10
45659 Recklinghausen
Telefon 02361 305-0
poststelle@lanuv.nrw.de

www.lanuv.nrw.de

