



Klimabericht NRW 2021

Klimawandel und seine Folgen – Ergebnisse aus dem
Klimafolgen- und Anpassungsmonitoring
LANUV Fachbericht 120



Klimabericht NRW 2021

Klimawandel und seine Folgen – Ergebnisse aus dem
Klimafolgen- und Anpassungsmonitoring
LANUV Fachbericht 120



Sehr geehrte Leserin, sehr geehrter Leser,

2021 wurde der Sechste Sachstandsbericht des Weltklimarates IPCC verabschiedet. Während sich die grundlegenden Erkenntnisse zum Klimawandel im Vergleich zum fünften Bericht nicht wesentlich geändert haben, ist sich der IPCC jedoch nun in einem Punkt zu 100 % sicher: Der Klimawandel und die mit ihm einhergehende globale Erwärmung wird eindeutig durch die vom Menschen verursachten Treibhausemissionen hervorgerufen.

Das bekommen wir auch in Deutschland und Nordrhein-Westfalen zu spüren. Im Jahr 2010 hat das LANUV den ersten Klimabericht veröffentlicht. Seitdem beobachten wir in verstärktem Maße extreme Wetterereignisse, die uns zum Teil fassungslos machen, weil wir sie in dieser Intensität bisher nicht kannten. Einen traurigen vorläufigen Höhepunkt stellt die Flutkatastrophe im Juli 2021 im Süden NRWs und im Westen von Rheinland-Pfalz dar, bei der durch die Zerstörungen nicht nur ein milliardenschwerer Schaden entstand, sondern auch zahlreiche Menschen ihr Leben in den Wassermassen verloren. Dem gegenüber steht mit den Hitzeperioden und der Trockenheit in den Jahren 2018 bis 2020 das andere Extrem: Unter den außergewöhnlichen Bedingungen mit neuen Temperaturrekorden litten unter anderen die Land- und Forstwirtschaft, die mit enormen Schäden zu kämpfen hatten und noch haben.

Durch den vom Menschen verursachten Klimawandel müssen wir damit rechnen, dass solche Extremereignisse aufgrund der steigenden Temperaturen zukünftig häufiger und extremer auftreten als wir dies bislang kennen. Die veränderten Klimabedingungen haben mittlerweile Auswirkungen in allen Bereichen unseres Lebens.



In Anbetracht dieser Situation ist es unbedingt erforderlich die Entwicklungen und Auswirkungen intensiver zu betrachten. Das in den vergangenen Jahren in Kooperation vom LANUV und dem Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr (ISB) der RWTH Aachen durchgeführte Projekt „Klimafolgen und Anpassungsmonitoring (KFAM)“ hatte zum Ziel, Indikatoren für ein Monitoringsystem zu entwickeln, mit denen die Auswirkungen des Klimawandels in unserer Umwelt, für uns Menschen, in Bau und Planung und der Wirtschaft aufgezeigt werden können. Zudem ist es nun möglich, anhand der zahlreichen Indikatoren Anpassungsmaßnahmen zu erarbeiten, umzusetzen und zu evaluieren.

Im Rahmen des vorliegenden Berichts werten wir zunächst die aktuellsten zur Verfügung stehenden Klimadaten für unser Bundesland Nordrhein-Westfalen aus. Im Anschluss daran werden zahlreiche Indikatoren in verschiedenen Handlungsfeldern vorgestellt. Ergänzt wird der Bericht mit einer umfangreichen Informationsplattform (www.klimafolgenmonitoring.nrw.de), auf der alle Indikatoren online dargestellt und regelmäßig aktualisiert werden.

Ich wünsche Ihnen eine informative Lektüre.

Dr. Thomas Delschen

Präsident des Landesamtes für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Inhaltsverzeichnis

08	Einleitung		
20	Zusammenfassung		
26	Klimaentwicklung in NRW		
28	Das Klima in Nordrhein-Westfalen		
34	1. Lufttemperatur		
38	1.1 Durchschnittliche Jahreslufttemperatur		
42	1.2 Durchschnittliche Jahreszeiten- lufttemperatur		
47	1.3 Temperaturkennstage kalt		
50	1.4 Temperaturkennstage warm		
54	2. Niederschlag		
58	2.1 Durchschnittliche Jahresnieder- schlagssumme		
61	2.2 Durchschnittliche Jahreszeiten- niederschlagssumme		
67	2.3 Starkregenniederschlags(kenn)tage		
70	2.4 Niederschlagsextreme		
71	2.5 Überschreitungsstunden Starkregen- warnstufe ≥ 3		
72	2.6 Trockentage		
74	2.7 Schneetage		
76	3. Sonne		
78	3.1 Sonnenscheindauer		
80	Handlungsfelder Umwelt		
82	4. Wasserwirtschaft und Hochwasserschutz		
86	4.1 Standardisierter Niederschlagsindex (SPI)		
90	4.2 Evapotranspiration		
92	4.3 Klimatische Wasserbilanz		
96	4.4 Mittlere Abflusshöhe		
98	4.5 Hoch- und Niedrigwasser		
102	4.6 Schiffbarkeit der Binnenschiff- fahrtsstraßen		
105	4.7 Gewässertemperatur fließender Gewässer		
107	4.8 Grundwasserneubildung		
110	4.9 Grundwasserstand		
112	4.10 Wasserentnahme der öffentlichen Wasserversorgung		
114	5. Boden		
118	5.1 Bodentemperatur		
120	5.2 Bodenfeuchte		
122	5.3 Humusvorrat		
125	5.4 Regenerosivität		
128	5.5 Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche		
130	6. Biodiversität und Naturschutz		
134	6.1 Beginn der phänologischen Jahreszeiten		
137	6.2 Dauer der phänologischen Jahreszeiten		
138	6.3 Länge der Vegetationsperiode		
139	6.4 Blühbeginn Buschwindröschen		
141	6.5 Klimasensitive Pflanzenarten		
143	6.6 Klimawandelbegünstigte invasive Pflanzenarten		
146	6.7 Temperaturindex der Vogelarten- gemeinschaften		
148	6.8 Jagdstrecke Schwarzwild		
150	7. Wald und Forstwirtschaft		
154	7.1 Phänologie der Buche und Eiche		
156	7.2 Laub- und Mischwälder		
158	7.3 Waldzustand		
160	7.4 Waldbrandgefahr und Waldbrände		
162	7.5 Buchdruckerpopulation		
164	7.6 Durch Schäden verursachter Holzeinschlag		
166	8. Landwirtschaft		
170	8.1 Beginn der Apfelblüte		
172	8.2 Aussaat und Auflaufen von Mais und Winterweizen		
175	8.3 Ertragsschwankungen		
177	8.4 Versicherungsleistungen bei Ertrags- ausfällen		
179	8.5 Wärmebelastung in der Tierhaltung		

182 Handlungsfelder Mensch**184 9. Menschliche Gesundheit**

- 188 9.1 Wärmebelastung
- 191 9.2 Tropennächte in Innenstädten
- 192 9.3 Hitzewarnungen
- 194 9.4 Hitzebetroffenheit der Bevölkerung
- 198 9.5 Hitzebedingte Todesfälle
- 200 9.6 Belastung mit bodennahem Ozon
- 202 9.7 Länge der Pollensaison
- 204 9.8 Befall mit Eichenprozessionsspinnern

206 10. Katastrophenschutz

- 210 10.1 Unwetterwarnungen
- 212 10.2 Einsatzzahlen Wasser- und Sturmschäden
- 214 10.3 Gefahrenabwehr Vegetationsbrände
- 216 11. Information, Bildung, Netzwerke**
- 218 11.1 Bildungsangebote zum Thema Klimaanpassung
- 220 11.2 Nutzung des Fachinformationssystems Klimaanpassung

222 Handlungsfelder Planung und Bau**224 12. Landes- und Regionalplanung**

- 226 12.1. Sicherung von Überschwemmungsbereichen für den Hochwasserschutz
- 228 12.2. Effizienz der Flächeninanspruchnahme

230 13. Stadtentwicklung und kommunale Planung

- 234 13.1 Wärmeinsel-Intensität
- 237 13.2 Erreichbarkeit von öffentlichen Grünflächen
- 240 13.3 Öffentliche und private Grünflächen
- 243 13.4 Starkregen in Siedlungsgebieten
- 246 13.5 Klimaanpassungskonzepte in Kommunen und Kreisen

248 14. Bauen und Wohnen

- 252 14.1 Jahresheizgradtage
- 254 14.2 Jahreskühlgradtage

256 15. Verkehr und Verkehrsinfrastruktur

- 258 15.1 Witterungsbedingte Störungen der Schieneninfrastruktur

260 Handlungsfelder Wirtschaft**262 16. Industrie und Gewerbe**

- 264 16.1 Wasserproduktivität des Verarbeitenden Gewerbes

266 17. Finanz- und Versicherungswirtschaft

- 270 17.1 Schadenaufwand in der Wohngebäudeversicherung
- 272 17.2 Elementarschäden
- 274 17.3 Versicherungsdichte Elementarschäden

276 18. Energiewirtschaft

- 280 18.1 Witterungsbedingte Netzunterbrechungen
- 282 18.2 Witterungsbedingte Nichtverfügbarkeit der Stromversorgung für Endverbraucher
- 284 18.3 Witterungsbedingt geminderte Stromminderproduktion thermischer Kraftwerke
- 286 18.4 Wassereffizienz thermischer Kraftwerke

288 19. Tourismuswirtschaft

- 292 19.1 Schneedecke für den Wintersport
- 295 19.2 Übernachtungen in Wintersportorten

296 Anhang

- 296 Abkürzungsverzeichnis
- 298 Literaturverzeichnis
- 308 Abbildungsverzeichnis
- 315 Tabellenverzeichnis
- 316 Bildnachweise
- 317 Impressum



Einleitung

Der globale Klimawandel ist in NRW angekommen – die Folgen sind messbar

Der globale anthropogene Klimawandel ist eine der bedeutendsten gesamtgesellschaftlichen Herausforderungen unserer Zeit. Zu den vom Menschen verursachten Veränderungen des globalen Klimasystems gehören neben einer weltweiten Zunahme der Durchschnittstemperaturen unter anderem Veränderungen von Niederschlagssummen und -verteilung oder die Abschwächung des Polarfront-Jetstreams mit weitreichenden Folgen für ganze Wettersysteme und vermehrt auftretende Wetterextreme wie Hitze, Stürme oder Starkregen. Alleine die Wetterextreme im Sommer 2021, wie die extremen Hitzewellen im Nordosten Amerikas, im Süden Europas sowie in Sibirien und den damit verbundenen Großbränden sind erst der Anfang einer Entwicklung, die der Mensch verursacht hat.

Auch in Nordrhein-Westfalen sind bereits anhand meteorologischer Daten sowie Beobachtungen in Natur und Umwelt Veränderungen des Klimas und die daraus resultierenden Folgen zu erkennen. Neben den seit Aufzeichnungsbeginn gestiegenen Lufttemperaturen und den Änderungen der Niederschlagsmuster haben die heißen und trockenen Sommer 2018 und 2019, die Starkregenereignisse in den Jahren 2014, 2016 und 2021 sowie die 2019 in NRW gemessenen Hitzerekorde den Klimawandel stärker ins öffentliche Bewusstsein gebracht. Folgen des Klimawandels für die menschliche Gesundheit, die Land- und Forstwirtschaft sowie für private und öffentliche Gebäude und Infrastrukturen werden offensichtlicher. Der Klimawandel löst auch in der Natur dynamische Anpassungsprozesse aus wie etwa die Verdrängung oder Einwanderung von Tier- und

Pflanzenarten, die ihrerseits Auswirkungen für den Menschen und seine wirtschaftlichen Aktivitäten haben.

Im Jahr 2018 verdunstete in NRW zum ersten Mal seit Aufzeichnungsbeginn mehr Wasser als Niederschlag fiel. In Köln wurden im selben Jahr an einer innerstädtischen Messstation 37 Tropennächte gemessen. Die Trockenheit traf auch die Land- und Forstwirtschaft so hart, dass das Land NRW Dürre- und Waldhilfen bereitgestellt hat. Gleichzeitig gibt der Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV) für das Jahr 2020 358 Millionen Euro an versicherten Schäden an Häusern, Gewerbe- und Industriebetrieben durch Stürme, Hagel und Starkregen in NRW an (GDV 2021b). Präsent sind die Mitte Juli 2021 aufgetretenen regional sehr ausgeprägten Starkregenereignisse im Zusammenhang mit dem Tiefdruckgebiet „Bernd“. Diese führten insbesondere in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz zu katastrophalen Überschwemmungen, die Ursache für eine hohe Zahl von Todesfällen und erhebliche Schäden an der Infrastruktur waren. Hier schätzt der GDV deutschlandweit die Versicherungsschäden auf rund sieben Milliarden Euro (GDV 2021d).

Diese Schäden unterstreichen nicht nur den dringenden Handlungsbedarf im Hinblick auf den Klimaschutz. Sie machen auch deutlich, dass eine Anpassung an die Folgen des Klimawandels notwendig ist. Dafür ist es wichtig, die Wirkungen des Klimawandels mit wissenschaftlich gesicherten Daten zu unterlegen sowie die Öffentlichkeit und Entscheidungsträgerinnen und -träger in allen Bereichen des gesellschaftlichen



Lebens über die beobachteten Folgen des Klimawandels zu informieren. Aus diesem Grund haben sich auf Ebene der EU, in Deutschland und auch in den einzelnen Bundesländern Monitoringsysteme etabliert, mit deren Hilfe die Folgen des Klimawandels anhand messbarer Indikatoren in verschiedenen Handlungsfeldern langfristig untersucht und beobachtet werden.

Um den Verlauf des Klimawandels und dessen Folgen für NRW zu ermitteln, wurde erstmalig 2011 das Klimafolgenmonitoring eingerichtet. Seitdem dokumentiert das LANUV den Klimawandel und seine Folgen mithilfe geeigneter Indikatoren. Ziel ist es, Effekte in Natur und Umwelt, auf die der Klimawandel einen Einfluss hat, frühzeitig zu erkennen, um rechtzeitig und angemessen auf Veränderungen und Risiken reagieren zu können. Die Ergebnisse des Klimafolgenmonitoring NRW werden unter www.klimafolgenmonitoring.nrw.de der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt bzw. alle fünf Jahre im Rahmen eines Klimaberichts publiziert. Erst-

malig wurde 2010 mit dem LANUV Fachbericht 27 „Klima und Klimawandel in Nordrhein-Westfalen – Daten und Hintergründe“ eine solide Datengrundlage mit Stand 2008 veröffentlicht, die im Jahr 2016 im LANUV Fachbericht 74 „Klimawandel und Klimafolgen in Nordrhein-Westfalen“ mit Stand 2015 aktualisiert und fortgeschrieben wurde.

Der hier vorliegende LANUV Fachbericht „Klimawandel und Klimawandelfolgen in Nordrhein-Westfalen – Ergebnisse aus dem Klimafolgen- und Anpassungsmonitoring“ setzt diese Reihe fort und präsentiert erstmalig die Ergebnisse des gegenüber dem herkömmlichen Klimafolgenmonitoring erweiterten Klimafolgen- und Anpassungsmonitoring Nordrhein-Westfalen (KFAM NRW), welches in Kooperation mit dem Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr (ISB) der RWTH Aachen im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Natur, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW erarbeitet wurde.

Das Klimafolgen- und Anpassungsmonitoring NRW (KFAM NRW)

Entwicklung und Aufbau

Das Klimafolgen- und Anpassungsmonitoring NRW baut auf dem seit 2011 bestehenden Klimafolgenmonitoring NRW auf und erweitert es grundlegend. Hat das bislang vorhandene Monitoring lediglich Indikatoren für verschiedene Umweltbereiche wie Wasser, Boden oder Biodiversität betrachtet, greift das erweiterte Monito-

ring auch Indikatoren für Handlungsfelder außerhalb der Umweltthematik auf, wie zum Beispiel Katastrophenschutz, menschliche Gesundheit oder Stadtentwicklung (Abbildung 1). Dabei entsprechen die im KFAM NRW adressierten Handlungsfelder den Handlungsfeldern des Klimaschutzplans NRW (MKULNV 2015a).

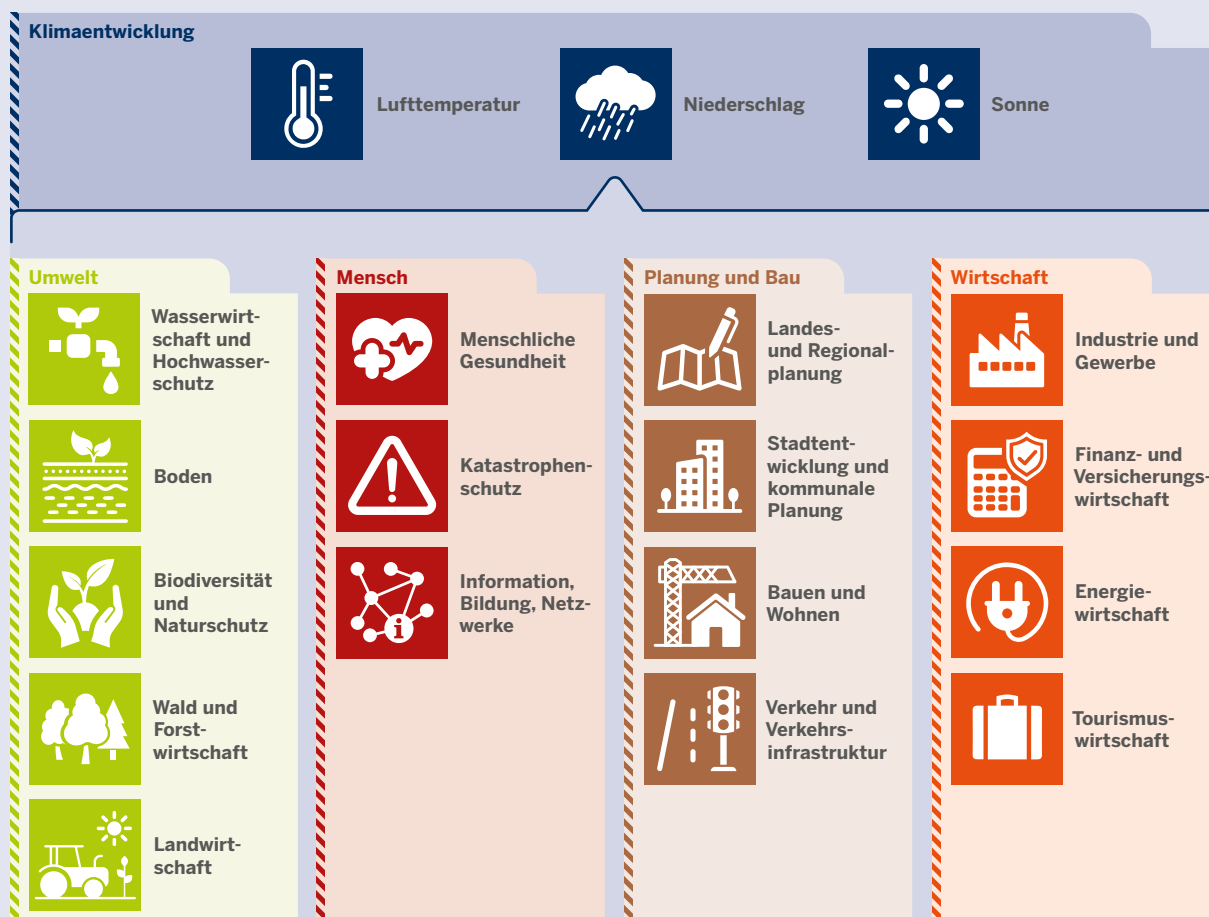


Abb. 1: Handlungsfelder des Klimafolgen- und Anpassungsmonitorings (KFAM NRW)

Neben der thematischen Erweiterung des Indikatorensets erfolgte für das KFAM auch eine Weiterentwicklung auf der Aussageebene. Neben bereits im Klimafolgenmonitoring enthaltenen Indikatoren, die die Klimaentwicklung selbst (State-Indikatoren) oder deren direkte Folgen (Impact-Indikatoren) beobachten, enthält das KFAM auch solche Indikatoren, die die Reaktionen der Natur oder Maßnahmen der Gesellschaft auf beobachtete Wirkungen des Klimawandels aufzeigen und somit Anhaltspunkte für eine Anpassung an den Klimawandel liefern (Response-Indikatoren; Indikatoren nach dem DPSIR-Schema, s. u.). Mit diesen Erweiterungen kommt das KFAM den Anforderungen an ein Monitoring gemäß § 9 Klimaanpassungsgesetz NRW nach.

Zum Aufbau des Indikatoren-Sets für das KFAM NRW wurden Indikatoren zur Erfassung insbesondere der negativen Auswirkungen des Klimawandels in den verschiedenen Handlungsfeldern entwickelt. Dafür wurden bestehende Monitoring-Systeme in Deutschland sowie international auf möglicherweise für NRW verwendbare Indikatoren überprüft, sodass hier auch nach Möglichkeit eine Vergleichbarkeit hergestellt werden kann. Weiterhin wurden pro Handlungsfeld Expertengespräche geführt, um weitere geeignete Indikatoren in den Blick zu nehmen. Es wurden Expertinnen und Experten aus der fachlichen Praxis und Wissenschaft sowie den nachgeordneten Bereichen des Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MULNV) und anderer Ressorts herangezogen. Die so ermittelten Indikatoren wurden mit den für die jeweiligen Handlungsfelder zuständigen Ressorts abgestimmt.

DPSIR-Schema

DPSIR ist ein Modell zur Darstellung von Umweltbelangen. Es beschreibt eine Abfolge von Zusammenhängen zwischen Einflussgrößen und Wirkungen auf die Umwelt. Diese sind im Zusammenhang mit dem Klimawandel:

- D Driving forces** (Treibende Kräfte): gesellschaftliche oder wirtschaftliche Prozesse, die auf die Umwelt wirken können (zum Beispiel Energiebereich)
- P Pressures** (Auswirkungen): tatsächliche Umweltbelastungen, wie zum Beispiel Treibhausgasemissionen

- S State** (Status): der aktuelle Zustand in der Umwelt, zum Beispiel die Veränderungen des Klimas (Temperatur, Niederschlag)
- I Impacts** (Wirkung): Effekte einer veränderten Umwelt, wie zum Beispiel die Trockenheit von Böden oder die Veränderungen des Grundwasserhaushaltes
- R Responses** (Reaktion): Aktivitäten und Maßnahmen von Natur und Gesellschaft als Antwort auf beobachtete Wirkungen

Insgesamt wurden 200 Indikatoren inklusive der bereits bestehenden Indikatoren des Klimafolgenmonitorings NRW geprüft, 79 davon werden für das Klimafolgen- und Anpassungsmonitoring verwendet, 31 Indikatoren werden zu einem späteren Zeitpunkt wieder aufgegriffen, da derzeit aus verschiedenen Gründen eine Verwendung im KFAM NRW nicht erfolgversprechend war. Die restlichen Indikatoren wurden aus verschiedenen Gründen verworfen, entweder war beispielsweise der Kausalzusammenhang mit dem Klimawandel zu komplex oder es konnten keine verfügbaren Daten ermittelt werden.

Von den 79 hier verwendeten Indikatoren beschreiben 12 Indikatoren die Klimaentwicklung in NRW (State-Indikatoren) 52 Indikatoren beschreiben Auswirkungen des Klimawandels (Impact-Indikatoren) und 15 Indikatoren beschreiben Anpassungsmaßnahmen oder Aktivitäten und Bedingungen, die den Anpassungsprozess unterstützen (Response-Indikatoren).

Aussagekraft

Insgesamt repräsentieren die KFAM-Indikatoren den derzeitigen Stand der messbaren Auswirkungen des Klimawandels und der Reaktionen darauf in den verschiedenen Handlungsfeldern in NRW. Die Indikatoren zeigen allerdings nur die aufgrund der Datenverfügbarkeit zu messenden Auswirkungen und Aktivitäten auf und decken damit nicht alle relevanten Prozesse, Handlungsansätze und Auswirkungen in den Handlungsfeldern ab, die dem anthropogen verursachten Klimawandel zugeschrieben werden. Umgekehrt beeinflussen teilweise auch weitere Faktoren, abgesehen vom Klimawandel, die Indikatoren. Die Indikatoren sollen Hinweise auf Entwicklungen und Herausforderungen der Klimafolgen geben, sie sind allerdings keine „Erfolgsindikatoren“, an denen sich Umsetzungserfolge in den einzelnen Handlungsfeldern unmittelbar messen lassen. Zudem spiegeln sie nicht zwangsläufig Bereiche mit Zuständigkeiten des Landes wider.

Die Beschränkungen in der Datenverfügbarkeit haben zur Folge, dass die derzeit verwendete Auswahl von Indikatoren nicht alle relevanten Themen des jeweiligen Handlungsfeldes abdeckt und somit auch die Anzahl von Indikatoren nicht die Bedeutung des jeweiligen Handlungsfelds widerspiegelt. Auch stehen bei einigen Indikatoren die Datenerhebungen erst am Anfang bzw. sind verschieden lang, sodass zur Interpretation der Entwicklungen erst längere Zeitreihen entstehen müssen.

Einige Indikatoren im KFAM geben Messwerte an Einzelstationen wieder. Diese beispielhaft und zum Teil in Ermangelung geeigneterer Alternativen ausgewählten Stationen können die Bandbreite räumlich diverser Wirkungsmuster nicht erfassen. Das betrifft insbesondere die Indikatoren, die das Thema Hitzebelastung der Bevölkerung abbilden, wie Wärmebelastung, Gradtage oder Tropennächte in Innenstädten. Um die entsprechenden Indikatoren auf eine breitere und damit aussagekräftigere Basis zu stellen, ist eine Ausweitung des Messnetzes erforderlich.

Trotz des hier beschriebenen eingeschränkten Aussagespektrums vermittelt das KFAM NRW einen breiten Einblick in aktuell messbare Folgen des Klimawandels für unser Land. Für die Durchführung des KFAM und die Pflege seiner Indikatoren werden regelmäßig konkrete Daten ermittelt, sodass klimawandelbedingte Entwicklungen langfristig seriös beobachtet und dargestellt werden. Dies ermöglicht Rückschlüsse auf Anpassungsnotwendigkeiten, sodass das KFAM NRW eine wesentliche Datengrundlage für die Anpassungsstrategie des Landes bietet. Gleichzeitig können Indikatoren, die Anpassungsaktivitäten oder deren Wirkung darstellen, Aufschluss geben über Erfolge oder Bedarfe in Richtung einer zu erzielenden Klimaresilienz.

Neben der Veröffentlichung in diesem Bericht ist eine Darstellung der Ergebnisse des KFAM auch im Internet unter www.klimafolgenmonitoring.nrw.de sowie ebendort eine regelmäßige Aktualisierung vorgesehen.

KFAM NRW – die Lesehilfe

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Ergebnisse des Klimafolgen- und Anpassungsmonitoring vorgestellt. Das KFAM besteht derzeit aus 79 Indikatoren, welche die Klimaentwicklung in NRW abbilden und die Folgen dieser Entwicklung in 16 Handlungsfeldern darstellen. Diese Handlungsfelder wiederum werden aus Gründen der leichteren Lesbarkeit zu Themenfeldern zusammengefasst.

Im Kapitel „Klimaentwicklung in NRW“ wird die Entwicklung des Klimas in NRW seit Beginn der Wetteraufzeichnungen 1881, gegliedert nach Temperatur, Niederschlag und Sonne präsentiert.

Danach werden die Indikatoren der 16 Handlungsfelder gegliedert gemäß folgender vier Themenfelder dargestellt:

Handlungsfelder Umwelt:

- Wasserwirtschaft und Hochwasserschutz
- Boden
- Biodiversität und Naturschutz
- Wald und Forstwirtschaft
- Landwirtschaft

Handlungsfelder Mensch:

- Menschliche Gesundheit
- Katastrophenschutz
- Information, Bildung, Netzwerke

Handlungsfelder Planung und Bau:

- Landes- und Regionalplanung
- Stadtentwicklung und kommunale Planung
- Bauen und Wohnen
- Verkehr und Verkehrsinfrastruktur

Handlungsfelder Wirtschaft:

- Industrie und Gewerbe
- Finanz- und Versicherungswirtschaft
- Energiewirtschaft
- Tourismuswirtschaft

Innerhalb der Themenfelder werden die Handlungsfelder einzeln präsentiert. Dabei ist der Darstellung der jeweiligen Indikatoren immer eine Einleitung vorangestellt, in der der Bezug des Handlungsfeldes zum Klimawandel erläutert und auf die schwerpunktmäßig negativen Folgen des Klimawandels Bezug genommen wird. Daran anschließend findet sich in einem farblich abgesetzten Kasten eine Zusammenstellung der wichtigsten Erkenntnisse, die sich aufgrund der Auswertung der Indikatoren für das Handlungsfeld ergeben. Den Abschluss der Einleitung in das Handlungsfeld bildet jeweils eine Tabelle, in der alle Werte der nachfolgend beschriebenen Indikatoren in den ausgewerteten Zeiträumen dargestellt sind. Die Auswertung der Zeiträume erfolgt als Mittelwert für die jeweilige Datenreihe des Indikators sowie – falls vorhanden – als Mittelwert für die 30-jährigen Zeiträume der Klimanormalperioden. Hierfür wurde festgelegt, dass dafür mindestens 28 von 30 Werten zur Verfügung stehen müssen. Weiterhin werden ein Überblick zu den Trends der jeweiligen Datenreihe gegeben und Querbezüge zu anderen Handlungsfeldern hergestellt. Damit soll deutlich gemacht werden, dass ein Indikator auch für andere Handlungsfelder relevant sein kann.

Im Anschluss an die Einleitung werden die einzelnen Indikatoren des jeweiligen Handlungsfeldes beschrieben. Jeder Indikator wird über ein Symbol dem oben erläuterten DPSIR-Schema zugeordnet. Bei der Beschreibung der Indikatoren wird jeweils zuerst der Zusammenhang des Indikators mit dem vom Menschen verursachten Klimawandel beschrieben. Es folgt ein Diagramm, das die Messwerte über die Zeit darstellt. Daran anschließend erfolgt die Diskussion der Werte. Datenschluss für die Aktualisierung der Zeitreihen war der 31.12.2020. Grundsätzlich ist daher 2020 das letztgenannte Datum in den Diagrammen und Tabellen. In wenigen Fällen erfolgen die den Indikatoren zugrundeliegenden Erhebungen in einem größeren zeitlichen Turnus, wie zum Beispiel beim Humusvorrat, der alle drei Jahre erhoben wird.

Ein Exkurs jeweils im Anschluss an die Indikatorbeschreibung setzt den Indikator in einen größeren Kontext und trägt damit zu seiner Einordnung in fachliche Zusammenhänge bei. Tabelle 1 gibt einen Überblick über alle hier im Bericht vorgestellten Indikatoren.

Statistische Auswertungen zu den Indikatoren

Quantitative Indikatoren bieten eine Möglichkeit zur standardisierten Auswertung von aktuellen Entwicklungstendenzen. Im Rahmen der statistischen Trendanalyse wurden die Zeitreihen daher bezüglich ihrer Trendverläufe analysiert. Die Analyse wurde für alle Indikatoren unter Anwendung der gleichen statistischen Methode wie der für die Indikatoren des Monitoringberichtes zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel durchgeführt, der „DAS-Monitoring“-Methode (UBA 2019a, UBA 2019b, Meyer 2018). Sie stellt eine standardisierte Methodik der Indikatorbewertung dar. Hinter dieser Methode steckt ein statistischer Identifikationsalgorithmus, welcher für eine gegebene Indikatorzeitreihe alternative Trendhypothesen testet. Das Verfahren, das durch das UBA in einer Software-Anwendung umgesetzt wurde, ist in der Lage, für jeden Indikator die Anpassungsgüte der Trendregressionen automatisch zu evaluieren. Die DAS-Monitoring Routinen zur regressionsbasierten Identifikation von Trendmustern zeichnen sich durch eine umfassende Berücksichtigung statistischer Test- und Schätzverfahren aus. Dabei wird die Signifikanz der Trendmuster getestet. Trends werden für alle Zeitreihen mit sieben oder mehr Datenpunkten analysiert. Datenreihen, die über zu wenige Datenpunkte verfügen oder die auf unregelmäßigen und zeitlich weit auseinanderliegenden Erhebungen basieren, werden von der Analyse ausgeschlossen. Identifiziert werden sowohl steigende und fallende Trends als auch quadrati-

sche Trends (zum Teil mit einer Trendumkehr). Durch Letztere lassen sich insbesondere bei Betrachtung längerer Zeitreihen auch Entwicklungsverläufe beschreiben, bei denen sich ursprünglich negativ zu bewertende Trends durch erfolgreich verlaufende Anpassungsmaßnahmen in jüngerer Zeit stabilisiert oder sogar zum Positiven gewendet haben.

Die Bewertung des ermittelten Trends erfolgt mit einer Beurteilung, ob der Trend sich günstig oder ungünstig entwickelt. Nicht in allen Fällen erscheint allerdings eine Bewertung der Trends sinnvoll, da Konsequenzen der Veränderung nicht immer bekannt oder eindeutig sind. So kann eine längere Vegetationsperiode für die Landwirtschaft unter Umständen gewinnbringend sein, gleichzeitig mit Blick auf die zunehmende Wasserknappheit durch veränderte Niederschlagsmuster, höhere Verdunstungsraten und mehr Wasserverbrauch der Pflanzen aber auch negativ ausfallen. In solchen Fällen beschränkt sich die Darstellung lediglich auf das Ergebnis der Trendanalyse und es wird keine Bewertung vorgenommen. Statistisch nicht signifikante Trends werden grundsätzlich nicht bewertet.

Trendbeschreibung

- ↗ steigender Trend
- ↘ fallender Trend
- ↶ Trend mit Trendumkehr: zuerst fallend, dann steigend
- ↷ Trend mit Trendumkehr: zuerst steigend, dann fallend
- ↪ fallender quadratischer Trend
- ~ kein Trend

Trendbewertung

- ↗ ↘ ↶ ↷ ↪ ~ günstige Entwicklung
- ↗ ↘ ↶ ↷ ↪ ~ ungünstige Entwicklung
- ↗ ↘ ↶ ↷ ↪ ~ keine Bewertung der Entwicklung möglich oder gleichzeitig günstige und ungünstige Entwicklungsaspekte vorhanden

Tab. 1: Übersicht der Indikatoren

Themenfeld	Handlungsfeld	Indikatornummer	Indikatorbezeichnung	DPSIR	Messgröße
Klimaentwicklung	1. Lufttemperatur	1.1	Durchschnittliche Jahreslufttemperatur	S	NRW Mittelwert Jahreslufttemperatur in °C
		1.2	Durchschnittliche Jahreslufttemperatur	S	NRW Mittelwert Lufttemperatur der meteorologischen Jahreszeiten in °C
		1.3	Temperaturkenntage kalt	S	NRW Mittelwert jährliche Anzahl Eistage & Frosttage
		1.4	Temperaturkenntage warm	S	NRW Mittelwert jährliche Anzahl Sommertage, Heiße Tage & Tropennächte
	2. Niederschlag	2.1	Durchschnittliche Jahresniederschlagssumme	S	NRW Mittelwert jährliche Niederschlagssumme in mm/a
		2.2	Durchschnittliche Jahreszeitenniederschlagssumme	S	NRW Mittelwert Niederschlagssumme in den meteorologischen Jahreszeiten in mm
		2.3	Starkniederschlags(kenn)tage	S	NRW Mittelwert jährliche Anzahl an Tagen mit Niederschlagssummen > 10mm/Tag; > 20mm/Tag & > 30mm/Tag
		2.4	Niederschlagsextreme	S	NRW Mittelwert jährliche Anzahl Starkregenereignisse der Dauerstufe 60 Minuten
		2.5	Überschreitungsstunden Starkregenwarnstufe ≥ 3	S	NRW Mittelwert Anzahl jährliche Starkregenstunden mit Warnstufe 3 und höher
		2.6	Trockentage	S	Jährlicher Mittelwert Anzahl Tage mit Niederschlagssumme ≤ 0,1 mm an diversen Stationen
		2.7	Schneetage	S	Jährlicher Mittelwert Anzahl Tage mit mind. 10 cm Schneedecke an der Station Kahler Asten
	3. Sonne	3.1	Sonnenscheindauer	S	NRW Mittelwert jährliche Summe der Sonnenstunden in NRW in Stunden
Umwelt	4. Wasserwirtschaft und Hochwasserschutz	4.1	Standardisierter Niederschlagsindex (SPI)	I	NRW Mittelwert der jeweils letzten 12 Monate
		4.2	Evapotranspiration	I	NRW Mittelwert der jährlichen potenziellen und aktuellen Evapotranspiration in mm
		4.3	Klimatische Wasserbilanz	I	NRW Mittelwert Differenz von Niederschlag und Verdunstung, jährlich und in den meteorologischen Jahreszeiten in mm
		4.4	Mittlere Abflusshöhe	I	Mittlerer Abfluss für das Einzugsgebiet der Lahn bis zum Pegel Feudingen/Lahn im hydrologischen Winter- und Sommerhalbjahr in mm
		4.5	Hoch- und Niedrigwasser	I	Anzahl Hoch- und Niedrigwassertage im hydrologischen Winter- und Sommerhalbjahr an der Pegelstation Feudingen/Lahn
		4.6	Schiffbarkeit der Binnenschiffahrtsstraßen	I	Jährliche Anzahl an Tagen mit Beschränkungen der Abladetiefe am Niederrhein infolge von Niedrigwasser, Tage mit Einschränkungen oder Sperrungen auf dem Niederrhein infolge von Hochwasser
		4.7	Gewässertemperatur fließender Gewässer	I	Mittlere und maximale Gewässertemperatur an der Pegelstation Kleve-Bimmen/Rhein in °C
		4.8	Grundwasserneubildung	I	Jährlicher mittlerer Niederschlag und Grundwasserneubildung im hydrologischen Jahr an der Lysimeterstation St. Arnold in Neuenkirchen in mm
		4.9	Grundwasserstand	I	Mittlerer Grundwasserstand im hydrologischen Jahr an diversen Stationen in NRW in m über NN
		4.10	Wasserentnahme der öffentlichen Wasserversorgung	I	Wasserentnahmemengen in NRW nach dem WasEG für Trink- und Brauchwasser im Sektor Öffentliche Trinkwasserversorgung in Mrd. m³/a

Themenfeld	Handlungsfeld	Indikatornummer	Indikatorbezeichnung	DPSIR	Messgröße
Umwelt	5. Boden	5.1	Bodentemperatur	I	Mittlere jährliche Bodentemperaturen in 5 cm und 50 cm Tiefe an diversen Stationen in NRW in °C
		5.2	Bodenfeuchte	I	Jahresmittelwert des volumetrischen Wassergehalts in 5 cm, 20 cm und 50 cm Tiefe an diversen Stationen in Vol. %
		5.3	Humusvorrat	I	Humusvorrat, basierend auf diversen Beobachtungsflächen in NRW in t/ha
		5.4	Regenerosivität	I	NRW Mittelwert jährliche Regenerosivität, N/h*a (R-Faktor)
		5.5	Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche	R	NRW Mittelwert tägliche Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche in ha
	6. Biodiversität und Naturschutz	6.1	Beginn der phänologischen Jahreszeiten	I	NRW Mittelwert Kalendertag Beginn der phänologischen Jahreszeiten
		6.2	Dauer der phänologischen Jahreszeiten	I	NRW Mittelwert Dauer der phänologischen Jahreszeiten, Anzahl Tage
		6.3	Länge der Vegetationsperiode	I	NRW Mittelwert Dauer der Vegetationsperiode, Anzahl Tage
		6.4	Blühbeginn Buschwindröschen	I	NRW Mittelwert Kalendertag Blühbeginn des Buschwindröschens
		6.5	Klimasensitive Pflanzenarten	I	Temperatur-Zeigerwert nach Ellenberg (dimensionslos) auf Basis der ökologischen Flächenstichprobe NRW, Anteil Kältezeiger in %
		6.6	Klimawandelbegünstigte invasive Pflanzenarten	I	Anzahl Arten je 100 ha auf Basis der ökologischen Flächenstichprobe NRW
		6.7	Temperaturindex der Vogelartengemeinschaften	I	Entwicklung des Temperaturindex der Vogelartengemeinschaften auf Basis der ökologischen Flächenstichprobe NRW
		6.8	Jagdstrecke Schwarzwild	I	NRW Jagdstrecke Schwarzwild pro Jagdjahr (Anzahl)
	7. Wald und Forstwirtschaft	7.1	Phänologie der Buche und Eiche	I	Mittlere Dauer der Vegetationszeit der Buche und Eiche auf Basis des forstlichen Umweltmonitorings NRW, Anzahl Tage
		7.2	Laub- und Mischwälder	R	NRW Waldfläche nach „Laub- und Mischwald“ und „reiner Nadelwald“ in ha und % auf Basis der Landeswaldinventur
		7.3	Waldzustand	I	jährliche Klassifizierung des Kronenzustands, Fläche bezogen auf Gesamtwald in NRW
		7.4	Waldbrandgefahr und Waldbrände	I	NRW Mittelwert Anzahl der Tage mit Waldbrandindexstufen 1+2 und 4+5, Anzahl der Waldbrände, durch Waldbrand betroffene Fläche in ha
		7.5	Buchdruckerpopulation	I	Jahressumme der Buchdruckerpopulation aus den Stichproben-Ergebnissen an diversen Standorten in NRW
		7.6	Durch Schäden verursachter Holzeinschlag	I	NRW weites Schadholzaufkommen in 1.000 m³ nach verschiedenen Schadholzzursachen
	8. Landwirtschaft	8.1	Beginn der Apfelblüte	I	NRW Mittelwert Kalendertag Beginn der Apfelblüte
		8.2	Aussaat und Auflaufen von Mais und Winterweizen	R	NRW Mittelwert Kalendertag Aussaat und Auflaufen von Mais und Winterweizen
		8.3	Ertragsschwankungen	I	Winterweizenertrag in dt/ha, Abweichung vom Mittel der vorangegangenen 6/10/15 Jahre in %
		8.4	Versicherungsleistungen bei Ertragsausfällen	I	Schadensatz (Verhältnis des Schadenaufwandes zur Versicherungssumme) für Hagel und Elementarschäden in %
		8.5	Wärmebelastung in der Tierhaltung	I	THI – luftfeuchtekorrigierter Hitzestressindex, Anzahl Tage Überschreitungen mit einem THI ≥ 75 pro Jahr an diversen Stationen in NRW

Themenfeld	Handlungsfeld	Indikatornummer	Indikatorbezeichnung	DPSIR	Messgröße
Mensch	9. Menschliche Gesundheit	9.1	Wärmebelastung	I	Jährliche Anzahl an Tagen mit Wärmebelastung an diversen Stationen in NRW
		9.2	Tropennächte in Innenstädten	I	Jährliche Anzahl an Tropennächten an diversen Stationen in NRW
		9.3	Hitzewarnungen	I	NRW Mittelwert Anzahl der Tage mit Hitzewarnungen und jährliche Anzahl der Tage mit Warnung vor extremer Hitze
		9.4	Hitzebetroffenheit der Bevölkerung	I	Anzahl der durch thermische Belastungen betroffenen EinwohnerInnen NRWs 2018 und 2050
		9.5	Hitzebedingte Todesfälle		NRW Mittelwert Anzahl hitzebedingter Todesfälle mit 95 %-Konfidenzintervall
		9.6	Belastung mit bodennahem Ozon	I	NRW Mittelwert Anzahl der Tage mit Überschreitung bestimmter Schwellenwerte, Ozon-Jahresmittel in $\mu\text{g}/\text{m}^3$
		9.7	Länge der Pollensaison	I	Länge der Pollensaison in Tagen sowie Tag des Beginns und Endes der Pollensaison an den Messstationen Bad Lippspringe und Mönchengladbach
		9.8	Befall mit Eichenprozessionsspinnern	I	Anzahl der Kommunen in NRW, die EPS-Vorkommen gemeldet haben
	10. Katastrophenschutz	10.1	Unwetterwarnungen	R	NRW Anzahl der Warnungen des DWD vor warnwürdigem Wetter der Stufen 3 und 4 nach verschiedenen Ursachen
		10.2	Einsatzzahlen Wasser- und Sturmschäden	I	Anzahl der technischen Hilfeleistungen der öffentlichen Feuerwehren in NRW in der Kategorie Wasser- und Sturmschäden
		10.3	Gefahrenabwehr Vegetationsbrände	I	Anzahl der Brandeinsätze der öffentlichen Feuerwehren in NRW zur Vegetationsbrandbekämpfung
Planung und Bau	11. Information, Bildung, Netzwerke	11.1	Bildungsangebote zum Thema Klimaanpassung	R	Anzahl der klimaanpassungsrelevanten Seminare und Teilnehmendenzahlen beim BEW NRW
		11.2	Nutzung des Fachinformationssystems Klimaanpassung	R	Anzahl Aufrufe des Fachinformationssystems (FIS) Klimaanpassung nach Handlungsfeldern
	12. Landes- und Regionalplanung	12.1	Sicherung von Überschwemmungsbereichen für den Hochwasserschutz	R	Regionalplanerisch ausgewiesene Überschwemmungsbereiche in NRW in ha
		12.2	Effizienz der Flächeninanspruchnahme	R	Regionalplanerisch ausgewiesener Siedlungsraum in NRW in m^2 pro EinwohnerInnen
	13. Stadtentwicklung und kommunale Planung	13.1	Wärmeinsel-Intensität	I	Mittlere und maximale urbane Wärmeinsel-Intensität im meteorologischen Sommer an diversen Stationen in Kelvin
		13.2	Erreichbarkeit von öffentlichen Grünflächen	R	Erreichbarkeit von öffentlichen Grünflächen in drei verschiedenen Stadtgrößentypologien in NRW
		13.3	Öffentliche und private Grünflächen	R	Flächennutzungsarten mit jeweiligem Anteil der Grünflächen in Nettetal, Soest, Oberhausen und Herne in %
		13.4	Starkregen in Siedlungsgebieten	I	Anteil der Siedlungsflächen in NRW, die von Starkregen der Warnstufe 3 und höher betroffen sind in %
		13.5	Klimaanpassungskonzepte in Kommunen und Kreisen	R	Anteil der Kommunen und Kreise in NRW mit einem Klimaanpassungskonzept in %
	14. Bauen und Wohnen	14.1	Jahresheizgradtage	I	Jahressummen der monatlichen Heizgradtage an diversen Stationen in NRW in Kelvin x Tag
		14.2	Jahreskühlgradtage	I	Jahressummen der Kühlgradtage an diversen Stationen in NRW in Kelvin x Tag
	15. Verkehr und Verkehrsinfrastruktur	15.1	Witterungsbedingte Störungen der Schieneninfrastruktur	I	Anzahl witterungsbedingte Störungen an der Schieneninfrastruktur in NRW, differenziert nach verschiedenen Störungsursachen

Themenfeld	Handlungsfeld	Indikatornummer	Indikatorbezeichnung	DPSIR	Messgröße
Wirtschaft	16. Industrie und Gewerbe	16.1	Wasserproduktivität des Verarbeitenden Gewerbes	R	Wasserproduktivität, Wassereinsatz und Bruttowertschöpfung des verarbeitenden Gewerbes in NRW, ausgehend von einem dimensionslosen Index
	17. Finanz- und Versicherungswirtschaft	17.1	Schadenaufwand in der Wohngebäudeversicherung	I	Schadenhäufigkeit in % und Schadensatz in ‰ bei Sturm und Hagel in NRW
		17.2	Elementarschäden	I	Schadenhäufigkeit in % und Schadensatz in ‰ in der erweiterten Elementarschadenversicherung in NRW
		17.3	Versicherungsdichte Elementarschadenversicherung	R	Anteil der Wohngebäude in %, die in NRW gegen Elementarschäden versichert sind
	18. Energiewirtschaft	18.1	Witterungsbedingte Netzunterbrechungen	I	Anteil witterungsbedingt unterbrochener Stromkunden im Niederspannungsbereich von mehr als 3 Minuten und Anteil witterungsbedingter Netzunterbrechungen im Mittelspannungsbereich durch atmosphärische Einwirkungen und höhere Gewalt in NRW
		18.2	Witterungsbedingte Nichtverfügbarkeit der Stromversorgung für Endverbraucher	I	Witterungsbedingte Nichtverfügbarkeit der Stromversorgung für Endverbraucher durch atmosphärische Einwirkungen und höhere Gewalt oder durch sonstige ungeplante Unterbrechungen in Minuten
		18.3	Witterungsbedingt geminderte Stromproduktion thermischer Kraftwerke	I	Witterungsbedingte Stromminderproduktion thermischer Kraftwerke in NRW in GWh
		18.4	Wassereffizienz thermischer Kraftwerke	R	Brutto-Stromerzeugung in GWh, Kühlwasserentnahme in Mio. m³ und Wassereffizienz in kWh/m³ thermischer Kraftwerke in NRW
	19. Tourismuswirtschaft	19.1	Schneedecke für den Wintersport	I	Anzahl von Tagen mit einer Schneedecke von mind. 15 cm während der Wintersaison an diversen Stationen im Sauerland um Winterberg und Schmallenberg
		19.2	Übernachtungen in Wintersportorten	R	Anzahl der Übernachtungen in Winterberg in der Sommer- und Wintersaison, Saisonalität

Zusammenfassung

Mit Ende des Jahres 2020 wurde eine neue Referenz-Klimanormalperiode für den 30 Jahre langen Zeitraum von 1991 bis 2020 abgeschlossen. Anhand dieser ist das Voranschreiten des menschengemachten Klimawandels vor allem durch die Entwicklung der Lufttemperatur eindrucksvoll nachvollziehbar. Verglichen mit der Klimanormalperiode 1881 - 1910, also seit dem Beginn der Wetteraufzeichnungen in NRW, betrug die Erhöhung der mittleren Lufttemperatur in NRW 1,6 K. Im Vergleich zur letzten Klimanormalperiode 1961 - 1990 stieg die durchschnittliche Jahreslufttemperatur in NRW von 9,0 °C auf 10,0 °C, also um 1 K an. Dieser enorme Unterschied untermauert den immer schnelleren Anstieg der Temperaturen. Für den Weltklimarat IPCC ist es nach aktuellem wissenschaftlichen Kenntnisstand eindeutig, dass der Klimawandel und die mit ihm einhergehende globale Erwärmung durch die vom Menschen verursachten Treibhausgasemissionen hervorgerufen wird (IPCC 2021).

Die Auswirkungen dieser Temperaturerhöhung spiegeln sich in zahlreichen weiteren mit der Lufttemperatur in Verbindung stehenden Indikatoren wider. So nimmt die Zahl der Frost- und Eistage ab, während Sommer- und Hitzetage sowie Tropennächte immer häufiger auftreten. Zudem wurde in den vergangenen Jahren eine Reihe hitze- und wärmebedingter Rekorde gebrochen. Im Jahr 2018 wurde mit 76 Sommertagen in NRW ein neues Maximum erreicht. Im darauffolgenden Jahr wurden am 25. Juli 2019 in Duisburg-Baerl und Tönisvorst mit Höchsttemperaturen von 41,2 °C neue Deutschlandrekorde aufgestellt. Abschließend reihte sich 2020 als wärmstes je in NRW gemessenes Jahr in diese Reihe immer extremer werdender Jahre ein.

Während sich bei der Betrachtung der Temperaturentwicklung ein eindeutiges Bild abzeichnet, ist die Entwicklung des Niederschlags vielseitiger. So ist für den Gesamtzeitraum von 1881 bis 2020 eine leichte Zunahme der Jahresniederschläge erkennbar. Wird jedoch nur der Zeitraum der letzten 30 Jahre betrachtet, ist ein deutlicher Rückgang ersichtlich. Diesem Rückgang steht wiederum eine Zunahme von Starkregenereignissen gegenüber. Ob sich der Trend der letzten Klimaperiode mit vermehrt trockener ausfallenden Jahren weiter fortsetzt, bleibt allerdings abzuwarten. So resultiert diese Entwicklung auch daraus, dass in den 1990er Jahren vergleichsweise hohe Niederschlagsmengen fielen. Für die verschiedenen Jahreszeiten ist mehrheitlich keine deutliche Niederschlagsänderung nachweisbar. Eine Ausnahme bildet der Winter mit zunehmenden Niederschlägen. Diese fallen aufgrund der steigenden Lufttemperaturen auch in den ansonsten schneereichen Mittelgebirgen immer öfter in Form von Regen anstatt von Schnee.

In NRW ist seit 1951 durch den signifikanten Anstieg der Sonnenstunden eine immer längere Sonnenscheindauer zu erkennen. Dies ist auf eine Kombination klimawandelbedingter Gründe und einer verbesserten Filterung von Luftschadstoffen seit den 1980er Jahren zurückzuführen.

Die Klimaveränderungen, die in den vergangenen Jahren immer stärker spür- und messbar sind, lassen sich anhand verschiedener Indikatoren statistisch belegen. Dabei sind viele der in diesem Bericht vorgestellten Indikatoren Mittelwerte für die Gesamtfläche NRWs. Lokal können insbesondere bei den Kenntagen

und dem Niederschlag deutliche Abweichungen auftreten. Die Verschiebungen der klimatischen Mittelwerte führen insgesamt zu extremeren Wetterereignissen, die so in unseren Breiten früher wesentlich seltener waren, wie beispielsweise Starkregen oder Hitzeperioden.

Handlungsfelder Umwelt

Durch den Klimawandel werden weite Teile der Umwelt beeinflusst, da das Klima eine Vielzahl von Prozessen und somit auch messbare Indikatoren in unserer Umwelt prägt. Das sind beispielsweise Indikatoren, wie der Abfluss des Wassers in Flüssen und die Temperatur in Böden und Gewässern, oder zu beobachtende immer wiederkehrende Phänomene, wie der Blühbeginn verschiedener Pflanzen. Einige der auf den Klimawandel zurückzuführenden Veränderungen sind heute schon deutlich spürbar. Um diese sich immer weiter beschleunigende Entwicklung und die absehbaren negativen Auswirkungen abzuschwächen oder zu verhindern, ist ein angepasstes Handeln nötig.

Im Umweltbereich sind die Auswirkungen des Klimawandels sehr vielfältig. Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft und den Hochwasserschutz sind beispielsweise sehr direkt. Durch die steigenden Temperaturen findet mehr Verdunstung statt, was die klimatische Wasserbilanz negativ beeinflusst. Diese lag für das Jahr 2018 in NRW erstmals seit Messbeginn im negativen Bereich. Besonders im Frühling ist bei der klimatischen

Wasserbilanz eine signifikante Abnahme zu beobachten. Der mittlere Abfluss von Flüssen nimmt vor allem im Sommerhalbjahr ab und die Zahl von Niedrigwassertagen tendenziell zu. Auch die Grundwasserneubildung und der Grundwasserstand sind direkt durch ausbleibende Niederschläge betroffen. Hier ist in der Tendenz ebenfalls eine Abnahme zu beobachten. Die Wassersituation wird durch den Effekt zusätzlich verschlechtert, dass die trockeneren und heißeren Bedingungen einen erhöhten Wasserbedarf des Menschen mit sich bringen. Im Zeitraum zwischen 2012 und 2020 wurde ein Anstieg der Wasserentnahmemengen zur Wasserversorgung festgestellt, der mit den trockenen und heißen Jahren 2018 bis 2020 im direkten Zusammenhang steht.

Die trockeneren und wärmeren Bedingungen beeinflussen auch die Entwicklungen im Boden. Höhere Bodentemperaturen verursachen eine Beschleunigung der biologischen Prozesse im Boden. Die infolgedessen vermehrt freigesetzten Nährstoffe können in den regenreicheren Wintermonaten schneller ausgespült werden. Dass sich dadurch bereits die Humusgehalte in den Böden verringert haben ist jedoch noch nicht erkennbar. Allerdings sind die aktuell bestehenden Datenreihen noch zu kurz für eine sichere Aussage. Nachgewiesen ist hingegen ein Anstieg des Bodenabtrags durch Starkregen, man spricht hier von erhöhter Regenerosivität. Die Ursachen sind in erster Linie vermehrte Starkniederschläge infolge des Klimawandels sowie die Böden selbst, die nach längeren Trockenperioden anfälliger gegenüber Bodenerosion sind.



Darüber hinaus ist es wichtig, unversiegelte Flächen vor zunehmender Inanspruchnahme zu schützen. Nur durch den Erhalt oder die Schaffung vegetationsgeprägter Freiflächen, die der Frisch- und Kaltluftversorgung hitzebelasteter Siedlungsbereiche, der Wasserspeicherung oder der Grundwasserneubildung dienen, können Folgen des Klimawandels, wie das verstärkte Auftreten von Sturzfluten auf Grund von Starkregeneignissen oder zunehmende städtische Wärmeinseleffekte, abgemildert werden. Die Siedlungs- und Verkehrsflächen hingegen werden aktuell jedes Jahr weiter ausgebaut.

Durch den Klimawandel steigende Lufttemperaturen wirken sich speziell auf die Biodiversität aus. So ist eine Verschiebung der phänologischen Jahreszeiten zu beobachten. Frühling, Sommer und Herbst beginnen früher, während der phänologische Winter erst später startet. Insbesondere das frühzeitige Eintreten des Frühlings und das damit verbundene Austreiben der Pflanzen kann problematisch werden, wenn nach Beginn der Vegetationsperiode Spätfrost auftritt, der Pflanzen und Tieren schadet und für landwirtschaftliche Schäden sorgt. Durch eine früher einsetzende Vegetationsperiode reagieren Pflanzen gegenüber spät eintretendem Frost noch empfindlicher. Höhere Temperaturen begünstigen jedoch nicht nur einen früheren Beginn der Vegetationsperiode, sondern verlängern diese auch. Kälteliebende Pflanzenarten leiden allerdings unter diesen Bedingungen. Bereits heute nehmen ihre Populationen deutlich ab. Dafür werden die Bedingungen einiger invasiver Pflanzenarten begünstigt, die das Landschaftsbild nachhaltig verändern können. Der Einfluss der klimatischen Entwicklung auf die Tierwelt drückt sich beispielsweise deutlich in der Zunahme der Bestände des Schwarzwildes aus. Das so erzeugte Ungleichgewicht kann zu einer schnelleren Verbreitung der durch das Schwarzwild übertragenen Afrikanischen Schweinepest sorgen.

Eine verlängerte Vegetationsperiode hat ebenfalls Auswirkungen auf die Wald- und Forstwirtschaft. So benötigen Eiche und Buche bei längerer Vegetationsdauer mehr Wasser, das jedoch angesichts höherer Temperaturen und geringerer sommerlicher Niederschläge nicht verfügbar ist. Dadurch werden sie anfälliger gegenüber Schädlingen. Trockenheit sowie Schädlingsbefall spiegeln sich in der Entwicklung des Waldzustandes wider. Dieser hat sich seit Beginn der Beobachtungen 1984 deutlich verschlechtert. Wiesen damals noch



drei von fünf Bäumen eine gesunde und dichte Krone auf, so war es 2020 nur noch etwa jeder fünfte Baum. Die vermehrten Beeinträchtigungen in den Wäldern lassen sich auch am Schadholzaufkommen beobachten. Dieses nahm infolge der Trockenheit ab 2018 vor allem durch Insektenbefall deutlich zu. Aber auch schwere Stürme wie Kyrill 2007 sorgen für hohe Schadholzaufkommen. Zudem besteht in den Wäldern durch den Klimawandel ein erhöhtes Risiko von Waldbränden.

Im Bereich der Landwirtschaft kann es infolge der steigenden Temperaturen und der höheren CO₂-Konzentration zunächst zu einer verbesserten landwirtschaftlichen Produktivität kommen. Dafür wird jedoch eine ausreichende Wasserversorgung benötigt. Ist diese nicht gewährleistet, kann langfristig auch die Nährstoffversorgung eingeschränkt sein. Außerdem wird die Landwirtschaft mit dem häufigeren Auftreten von Extremwetterereignissen wie Hitzeperioden, Sturm, Hagel oder Starkregen zu kämpfen haben. Bislang ist bezüglich der Hagel- und Elementarschadenversicherungen aber noch kein Trend bei der Höhe der Versicherungszahlungen erkennbar. Eine weitere Folge des Klimawandels besteht in der Wärmebelastung für landwirtschaftliche Nutztiere, die sich negativ auf die Gesundheit der Tiere und die Erträge aus der Tierhaltung auswirkt. Die Landwirtschaft sowie die anderen essenziellen Bereiche der Handlungsfelder Umwelt müssen sich somit schon heute an die Folgen des anthropogenen Klimawandels anpassen und mit weiteren Auswirkungen in der Zukunft rechnen.

Handlungsfelder Mensch

Im Zusammenhang mit den steigenden Temperaturen wird der menschliche Körper immer größeren Belastungen ausgesetzt. Dabei lässt sich die steigende Wärmebelastung in den Städten anhand verschiedener meteorologischer Indikatoren wie der Anzahl der Tropennächte oder Hitzetage beobachten. Die erhöhte Sterberate infolge außergewöhnlicher Hitzewellen zeigt, dass in Zukunft bei einer Häufung extremer Wetterlagen mit weitreichenden Konsequenzen für die menschliche Gesundheit gerechnet werden muss. Aktuell ist bereits jeder dritte Nordrhein-Westfale von Hitze betroffen, zukünftig wird dieser Anteil deutlich steigen. Mit steigenden Temperaturen erhöht sich nicht nur der Hitzestress, sondern auch die Belastung durch weitere Umwelteinflüsse wie bodennahe Ozon oder Pollenflug.

Im Katastrophenschutz wird eine große Zahl der Einsätze durch Wasser- und Sturmschäden ausgelöst. Dementsprechend ist die Entwicklung zunehmender Extremwetterereignisse besonders genau zu beobachten. Rückschlüsse auf einen Trend hinsichtlich einer steigenden Anzahl von Einsätzen und Unwetterwarnungen können jedoch noch nicht gezogen werden, da die Zeitreihen dafür noch zu kurz sind. Allerdings ist aufgrund des Klimawandels mit einer Zunahme solcher Ereignisse zurechnen. Dies trifft auch auf die Anzahl von Vegetationsbränden zu, deren Zahl in den trockenen und heißen Jahren 2018 bis 2020 besonders hoch war. Durch die fehlenden Niederschläge und höheren Temperaturen werden Wälder und andere Vegetationsflächen deutlich anfälliger gegenüber Brandereignissen.

Die bessere Wahrnehmung dieser Problematiken erhöht das Interesse der breiten Bevölkerung am Thema Klimawandel. So stieg die Teilnehmendenzahl bei klimaanpassungsrelevanten Seminaren 2020 gegenüber den Vorjahren deutlich an. Teilnehmende waren vor allem Akteure, die sich beruflich mit der Thematik auseinandersetzen, wie beispielsweise kommunale Vertreterinnen und Vertreter. Dennoch sind die Folgen des Klimawandels noch nicht allen Teilen der Bevölkerung bewusst. Deshalb wird weiter versucht, die Bürger und Bürgerinnen zu informieren und zu sensibilisieren, so wie dies seit 2016 mithilfe des Fachinformationssystems (FIS) Klimaanpassung getan wird. Auch hier belegt die steigende Zahl der Seitenaufrufe den deutlichen Interessensanstieg bei Personen, die sich intensiv mit der Thematik auseinandersetzen.

Handlungsfelder Planung und Bau

Die Landes- und Regionalplanung spielt für die Klimafolgenanpassung eine bedeutende Rolle. Die Regionalplanung schafft über die Festsetzung von textlichen Zielen und Grundsätzen sowie über die zeichnerische Ausweisung von Vorbehalts- und Vorranggebieten die räumlichen Voraussetzungen für Planungen und Maßnahmen, mit denen die Folgen des Klimawandels abgemildert werden können. Beispiele hierfür sind die Ausweisung von Überschwemmungsgebieten zur Sicherung und Ausweitung von Abfluss- und Retentionsflächen in hochwassergefährdeten Gebieten oder die planerische Abgrenzung des Siedlungsraums um den Effekt städtischer Wärmeinseln abzumildern.

Die Wohnqualität der Menschen bildet im Zusammenhang mit der Klimaanpassung einen Schwerpunkt im Themenfeld Planung und Bau. Durch den anthropogenen Klimawandel erhöht sich die allgemeine Wärmebelastung. Die Menschen leiden jedoch vor allem in den Städten, wo der Effekt der städtischen Wärmeinsel die Temperaturen zusätzlich beeinflusst. Deshalb steht die Stadtentwicklung unter besonderem Druck, mit Maßnahmen und Anpassungen die übermäßige Wärmebelastung in Siedlungsbereichen zu vermindern und die Kühlung als städtebauliches Ziel im Blick zu behalten. Die Erreichbarkeit und die Vernetzung von



öffentlichen Grünflächen sind hierbei von zentraler Bedeutung. Sie dienen nicht nur als Erholungsflächen, sondern wirken auch der Bildung von Hitzeinseln in dicht besiedelten Bereichen entgegen. Private Grünflächen unterstützen diese positiven Auswirkungen genauso wie die immer häufiger realisierten Dach- oder Fassadenbegrünungen.

Neue unversiegelte, also wasserdurchlässige, Flächen sind jedoch nicht nur hinsichtlich steigender Temperaturen hilfreich. Starkregenereignisse können durch die zusätzlichen Speicherräume für Niederschlagswasser besser kompensiert werden. Jährlich ist rund ein Siebtel der Siedlungsgebiete in NRW von einem unwetterartigen Starkregenereignis betroffen. Wie groß die Auswirkungen der Starkregenereignisse im Juli 2021 auf die Statistik dieses Jahres ist, bleibt noch abzuwarten. Währenddessen nimmt das Bewusstsein in den Kommunen und Kreisen zum Thema Klimaanpassung deutlich zu. Konnte im Jahr 2014 noch kein Kreis ein Klimaanpassungskonzept vorweisen, so hatte 2020 bereits jeder fünfte Kreis ein Konzept erstellt.

Die zunehmende Hitzebelastung beeinträchtigt im Bereich Bauen und Wohnen die Funktionalität von Gebäuden und vermindert die Aufenthaltsqualität. Aufgrund der steigenden Temperaturen nimmt die Zahl der Jahreskühlgradtage signifikant zu während die Jahresheizgradtage zeitgleich abnehmen. Um der Überwärmung entgegenzuwirken und den Energiebedarf

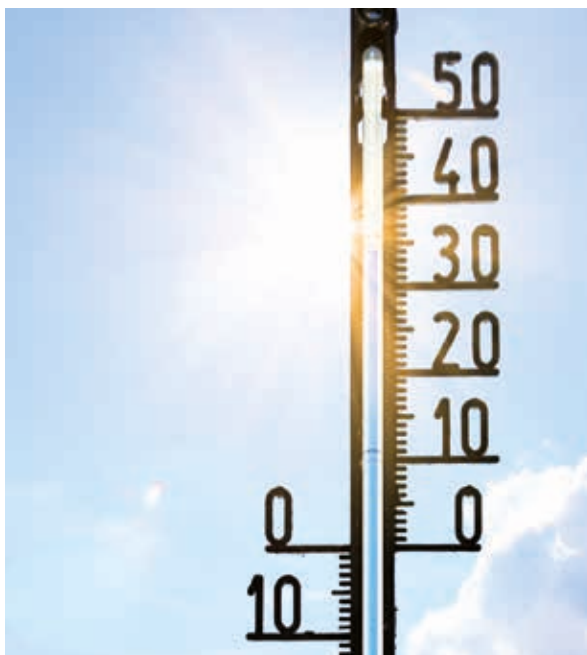
zu verringern kann beispielsweise auf effiziente Dämmungen zurückgegriffen werden. So wird sowohl beim Heizen als auch beim Kühlen Energie gespart.

Neben Problemen an der Gebäudeinfrastruktur kann auch die Verkehrsinfrastruktur durch Extremwetterereignisse infolge des Klimawandels betroffen sein: durch Stürme, Starkregen oder Hitze. In den Jahren 2018 und 2019 konnte eine Vielzahl von Störfällen an der Schieneninfrastruktur in Verbindung mit der heißen Witterung gebracht werden. Umgestürzte Bäume, Blitzeinschläge oder Trockenheit führen zu weiteren Beeinträchtigungen. Die Deutsche Bahn versucht mit präventiven Maßnahmen wie zum Beispiel hitzeresistenter Technik den Problemen zu begegnen.

Handlungsfelder Wirtschaft

Die verschiedenen Wirtschaftszweige sind in unterschiedlicher Art und Weise von den Folgen des Klimawandels und von Extremwetterereignissen betroffen. So haben Industrie und Gewerbe sowohl mit den direkten physischen Auswirkungen des Klimawandels als auch mit den indirekten Auswirkungen zu kämpfen. Produktionseinbußen können unter anderem durch Schäden an der Infrastruktur oder Unterbrechungen der Lieferketten hervorgerufen werden. Die Produktivität der Arbeitskräfte kann durch Hitze gesenkt werden. Von besonderer Wichtigkeit ist für viele verarbeitenden Betriebe die Aufrechterhaltung der Kühlwasserkreisläufe. Durch vermehrt auftretende Trockenheit und Hitze besteht die Gefahr des Wassermangels. Ein verbessertes Haushalten mit den Wasserressourcen ist daher von besonderer Bedeutung. Seit 1998 konnte die Wasserproduktivität im verarbeitenden Gewerbe deutlich erhöht werden, sodass mit geringerem Wassereinsatz mindestens eine gleichwertige Bruttowertschöpfung erzielt werden kann.

Für die Versicherungswirtschaft ergibt sich in den letzten Jahren eine erhöhte Nachfrage nach Versicherungen gegen Naturgefahren, die im Zuge des Klimawandels gehäuft auftreten. So nahm die Versicherungsdichte bezüglich der erweiterten Elementarschadenversicherung bis zum Jahr 2020 deutlich zu. Damit liegt NRW im bundesweiten Durchschnitt. Zum Stand Ende 2020 ist bei den Schadenaufwänden von Wohngebäudeversicherungen noch kein eindeutiger Trend erkennbar. Gleiches gilt für Elementarschäden, deren Schaden-





häufigkeit ebenfalls Jahr für Jahr stark variiert, jedoch keine signifikante Entwicklung aufweist. Allerdings stechen Jahre mit besonders extremen Wetterereignissen hervor. Die Jahre 2014 und 2016 wirkten sich mit ihren Unwetterlagen stark auf die Bilanz für Hochwasser aus. Auch für 2021 sind nach der Hochwasserkatastrophe im Juli hohe Werte zu erwarten. Beim Sturm fallen vor allem die Jahre 2007 und 2018 mit den Orkanen Kyrill und Friederike auf.

Mit Blick auf die Energiewirtschaft können Extremwetterereignisse auch die sonst sehr sichere Stromversorgung unterbrechen. Zudem können Dürre, Hitze, Starkregen und Sturm die Stromproduktion in thermischen Kraftwerken vermindern. So stieg die Zahl der witterungsbedingten Stromminderproduktion seit 1995 signifikant an. Vor allem Hitze und Trockenheit schränken die Einleitung von Kühlwasser in die Gewässer durch wasserrechtliche Auflagen ein. Bezüglich der Versor-

gungssicherheit der Stromkunden war für das Jahr 2007 sowohl im Niederspannungs- als auch im Mittelspannungsbereich der größte Anteil witterungsbedingter Unterbrechungen zu verzeichnen. Seitdem liegen die Werte auf einem deutlich niedrigeren Niveau.

Im Tourismussektor hat der Wintertourismus mit den durch den Klimawandel bedingten höheren Temperaturen zu kämpfen. Die Zahl der Schneedeckentage hat im Sauerland stark abgenommen. Allerdings wirkt sich dies bislang nicht negativ auf die Zahl der Übernachtungen in der Region aus. Trotz veränderter Wetterbedingungen kann sowohl im Sommer als auch im Winter ein deutlich steigender Trend bei den Übernachtungszahlen verzeichnet werden. Dies hängt auch damit zusammen, dass in den Wintermonaten vermehrt auf Beschneigung der Pisten gesetzt wird und so der Wintersportbetrieb gewährleistet werden kann.



Klimaentwicklung in NRW



1. Lufttemperatur



2. Niederschlag



3. Sonne

Das Klima in Nordrhein-Westfalen

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, sogenannte Klimanormalperioden (KNP). Es wird in der Regel durch Mittelwerte und Jahressummen (beispielsweise bei Temperatur (Indikator 1.1) und Niederschlag (Indikator 2.1)), Häufigkeiten (zum Beispiel Sommer- und Frosttage (Indikatoren 1.4 und 1.3)) und Andauerzeiten (zum Beispiel Sonnenscheindauer (Indikator 3.1)) 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 augenblicklichen 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.

Nordrhein-Westfalen zählt zum warm-gemäßigten Regenklima (Cf, nach Köppen 1936), bei dem die mittlere Temperatur des wärmsten Monats unter 22 °C und die des kältesten Monats über -3 °C bleibt und in allen Monaten ausreichend Niederschlag fällt. Damit liegt Nordrhein-Westfalen in einem überwiegend maritim geprägten Bereich mit allgemein kühlen Sommern und milden Wintern. Diese relativ grobe und auf kontinentweite Verhältnisse zugeschnittene Einteilung wird den tatsächlichen klimatischen Gegebenheiten im Land jedoch nicht gerecht. Die ausgeprägte Struktur des Reliefs bedingt eine Zweiteilung der regionalklimatischen Bedingungen: warm mit mäßigem Niederschlag in der Westfälischen Bucht und am Niederrhein, deutlich kühler und regenreicher in den Mittelgebirgen (Weserbergland, Sauer- und Siegerland und Eifel).

Vergleich der Klimanormalperioden 1991 - 2020 und 1961 - 1990

Mit Ende des Jahres 2020 wurde eine „neue“ Klimanormalperiode vervollständigt. Klimanormalperioden umfassen Zeiträume von 30 Jahren und werden immer auf die vorangegangenen 30 Jahre bezogen, wenn eine Jahreszahl auf die Ziffer „Null“ endet. Nach der Weltorganisation für Meteorologie (WMO – World Meteorological Organization) werden bestimmte Klimanormalperioden als „Standard“- oder „Referenzperioden“ festgelegt. Der Zeitraum 1991 - 2020 ist eine dieser Referenzperioden. Somit gibt es nun eine neue Basis, um das „aktuelle Klima“ in NRW zu beschreiben. Zuvor war die Periode 1961 - 1990 die Referenzperiode für klimatische Betrachtungen.

Aus diesem Anlass werden die Referenzperioden 1961 - 1990 und 1991 - 2020 für die Jahresmittelwerte der Hauptindikatoren Temperatur, Niederschlag und Sonnenscheindauer hier gegenübergestellt (Tabelle 2) und eingeordnet.

Die Lufttemperatur ist im Vergleich der beiden Zeiträume um 1,0 Grad Celsius (°C, oder 1 Kelvin [K]) angestiegen. Dies ist ein sehr deutlicher Anstieg in sehr kurzer Zeit, wenn man bedenkt, dass die Temperaturerhöhung im Vergleich zur Durchschnittstemperatur der ersten 30 Jahre der Aufzeichnungen 1881 - 1910

1,6 K beträgt, also über einen viel längeren Zeitraum sehr viel geringer angestiegen ist (Tabelle 3). Der Vergleich mit den bisherigen Klimaveränderungen in der geologischen Vergangenheit zeigt, dass solch ein schneller Anstieg global gesehen noch nie aufgetreten ist, sondern sich ähnliche Temperaturanstiege bislang über Jahrtausende erstreckt haben. Anpassungen der Ökosysteme an den vom Menschen verursachten Klimawandel müssen daher zurzeit vergleichsweise rasant erfolgen, was jedoch kaum möglich scheint.

Im Gegensatz zur Temperatur ist die durchschnittliche Jahresniederschlagssumme im Vergleich der beiden Referenzperioden nahezu konstant geblieben (Tabelle 2). Dieses Ergebnis ist bemerkenswert, weil insbesondere die 1970er-Jahre sehr trocken waren, und dieser Zeitraum komplett in der Referenzperiode 1961 - 1990 liegt. In der Referenzperiode 1991 - 2020 zeigen sich um das Jahr 2000 herum zunächst einige Jahre mit deutlich überdurchschnittlichen Niederschlägen (Abbildung 3). In der letzten Dekade lag dann allerdings nur ein Jahr genau im Schnitt des langjährigen Niederschlags, alle anderen zum Teil weit darunter.

Tab. 2: Mittelwerte für die Referenz-Klimanormalperioden 1961 - 1990 und 1991 - 2020 (Datengrundlage: DWD)

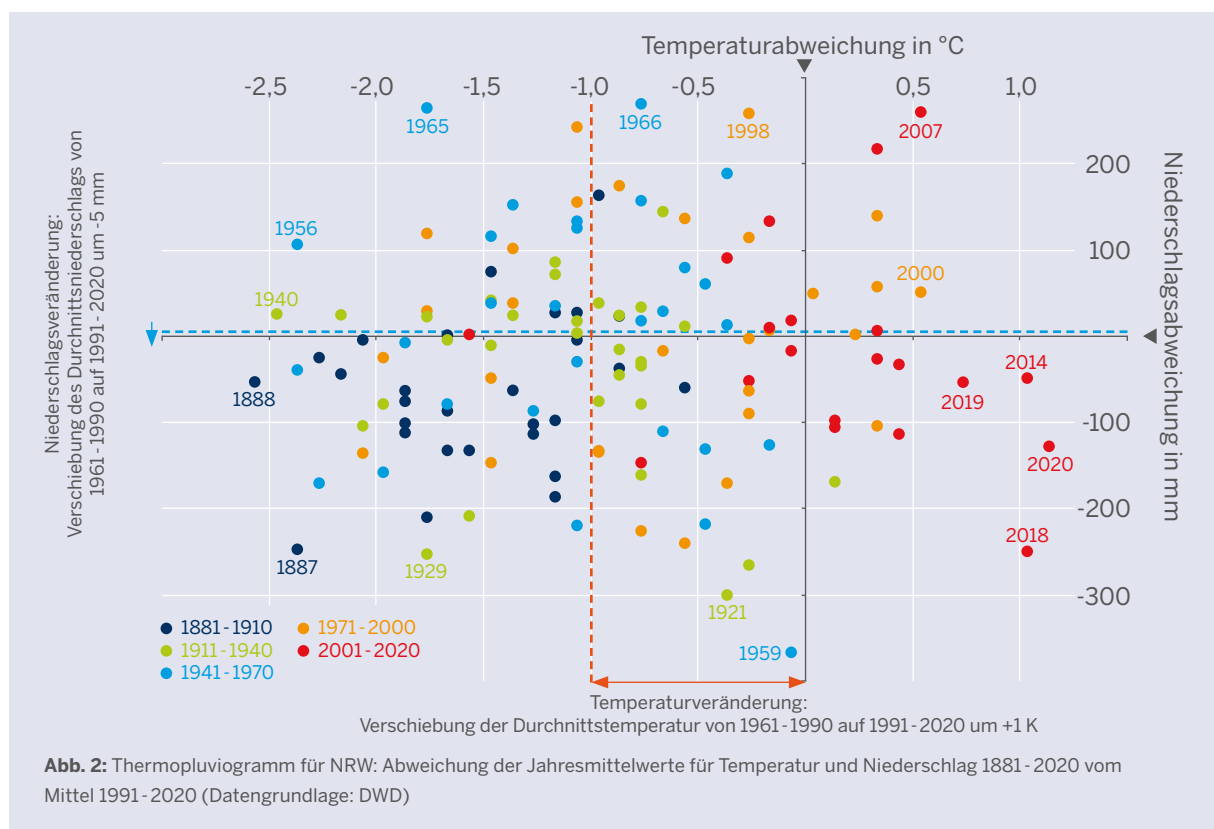
Indikator	1961 - 1990	1991 - 2020
Jahreslufttemperatur	9,0 °C	10,0 °C
Jahresniederschlagssumme	875 mm	870 mm
Jahressonnenscheindauer	1.440 h	1.573 h

Die durchschnittliche Sonnenscheindauer pro Jahr hat sich im Vergleich der beiden Referenzperioden um 133 Stunden erhöht. Dies ist nicht allein auf klimatische Aspekte zurückzuführen, weil die 1950er- bis 1980er-Jahre den Zeitraum der „globalen Verdunkelung“ widerspiegeln, in dem eine hohe Luftschadstoffbelastung die Intensität des Tageslichts bzw. der Sonneneinstrahlung reduziert hat. Seit den 1980ern hat sich die „globale Verdunkelung“ durch eine verstärkte Filterung von Abgasen und Schadstoffen aus der Luft reduziert, was sich auch im Anstieg der Sonnenscheinstunden widerspiegelt. Diese Auswirkungen lassen sich weltweit in verschiedenen Regionen nachweisen.

Die Abweichung der Jahreslufttemperatur und der Jahresniederschlagssumme einzelner Jahre vom langjährigen Mittelwert kann kombiniert in sogenannten Thermopluviogrammen dargestellt werden. Dies ist vor dem Hintergrund der Auswirkungen der Witterung einzelner Jahre interessant, weil trocken-warme Jahre ganz andere Auswirkungen auf Natur, Umwelt und Mensch haben als feucht-warme oder feucht-kalte Jahre.

In Abbildung 2 ist das Thermopluviogramm für NRW über den gesamten Messzeitraum seit Aufzeichnungsbeginn 1881 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die ersten 30 Jahre seit Aufzeichnungsbeginn (dunkelblau) im unteren, linken Quadranten befinden, unabhängig davon, ob man als Referenzperiode 1961 - 1990 oder 1991 - 2020 verwendet. Diese Jahre waren im Vergleich der gesamten Zeitreihe deutlich kühler und trockener als die späteren Zeiträume. Die letzten 20 Jahre, die rot farbcodiert sind, finden sich hingegen fast ausschließlich in der rechten Hälfte. Diese waren also im Vergleich zu warm. Die leicht überwiegende Zahl dieser Jahre findet sich im rechten unteren Quadranten, war also gleichzeitig zu trocken, die etwas kleinere Zahl war gleichzeitig zu feucht.

Dass sich die Mittelwerte von Lufttemperatur und Niederschlag von 1961 - 1990 auf 1991 - 2020 verschoben haben, lässt sich zusätzlich an den gestrichelt eingezeichneten Achsen erkennen: die Temperaturachse ist deutlich nach rechts in den wärmeren Bereich verschoben (1 K Unterschied), die Niederschlagskala hat sich hingegen kaum verändert (-5 mm, vgl. Tabelle 2). Daran zeigt sich, dass es eine neue klimatische Realität in NRW gibt: von den vergangenen zehn Jahren war

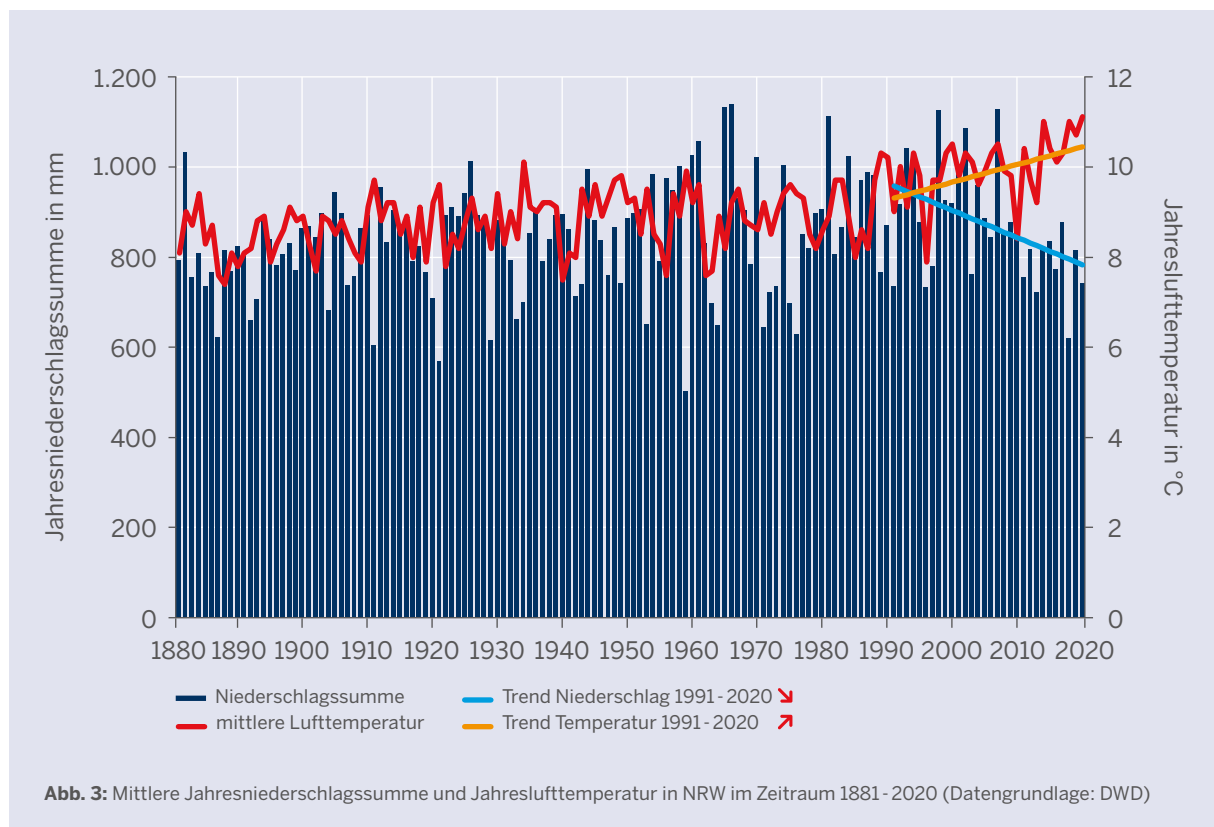


jedes einzelne wärmer als der Mittelwert von 1961-1990 und neun davon trockener als das Mittel 1961-1990. Nur eines der letzten zehn Jahre trifft das Niederschlagsmittel genau. Die Verschiebung zu wärmeren Verhältnissen ist dabei ganz eindeutig zu belegen (Abschnitt 1 „Lufttemperatur“). Ob sich eine Verschiebung hin zu trockeneren Verhältnissen fortsetzen wird, bleibt abzuwarten (Abschnitt 2 „Niederschlag“).

Abbildung 3 zeigt die Jahresmittel der Lufttemperatur und Niederschlagssumme in NRW für den Zeitraum 1881-2020 im Verlauf. Hier wird deutlich, dass es beim Niederschlag immer wieder zu Schwankungen kommt, die Temperatur hingegen – vor allem seit den 1990er-Jahren – deutlich ansteigt. Für die Folgen, die sich durch die Veränderung der klimatischen Verhältnisse ergeben, ist das Zusammenspiel von Niederschlag und Temperatur von Bedeutung. Während sich Phasen mit höheren und niedrigeren Niederschlagssummen bei mehr oder weniger ähnlichen Temperaturen abwechseln, tritt erstmals in den 1970er-Jahren eine Episode mit sehr geringen Niederschlägen bei relativ hoher Lufttemperatur auf. Dies ist der Grund, warum dieses Jahrzehnt insbesondere in der Wasserwirtschaft als relativ trocken verzeichnet wurde. Viel deutlicher zeigen die



vergangenen zehn Jahre ein Auseinanderlaufen der beiden Kurven: die Temperatur steigt deutlich, während die Niederschlagssumme sinkt. Welche Folgen sich daraus für Mensch, Wirtschaft und Umwelt ergeben, wird in diesem Bericht dargestellt. Zunächst wird in den folgenden Unterkapiteln ein genauerer Blick auf einzelne klimatische Veränderungen gerichtet.



Wetterextreme 2016 - 2020

Extremwetterereignisse sind Witterungssituationen, die zum einen äußerst selten auftreten und zum anderen eine besondere Intensität, Stärke oder Magnitude aufweisen, auch wenn es hier keine eindeutigen Grenz- oder Schwellenwerte gibt. Häufig wird diskutiert, ob und wie sich die Extremwetterereignisse durch den Klimawandel verändern. Sicher sagen lässt sich, dass bei einer Klimaverschiebung zu höheren mittleren Temperaturen Ereignisse mit besonders hohen Temperaturen zum einen häufiger auftreten und zum anderen neue Höchstwerte erreichen werden. Bei anderen Klimaparametern sind die Zusammenhänge nicht so eindeutig.

Ein bekanntes Phänomen ist die Abschwächung des polaren Strahlstroms (jet stream) durch die Abnahme der Temperaturunterschiede zwischen Pol und Äquator (Cohen et al. 2014; Graham et al. 2017; Mann et al. 2017). Dies führt dazu, dass das für unsere gemäßigten Breiten typische wechselhafte Wetter mit dem ständigen Durchzug von Tiefdruckgebieten im Wechsel mit Hochdruckwetterlagen durch sogenannte stationäre Situationen („blockierende Wetterlagen“) abgelöst wird. Das heißt, dass es teilweise über Wochen zu einer unveränderten Lage der Hoch- und Tiefdruckgebiete über Europa kommen kann. Je nachdem, wo sich dabei Hoch und Tief befinden, kann dies dazu führen, dass es – je nach Jahreszeit – zu langandauernden trockenen Hitzewellen oder Kälteepisoden kommt, gleichzeitig aber in anderen Regionen ausgiebige Niederschläge fallen, die zu Überschwemmungen führen (Petoukhov et al. 2016). Die bisher nie dagewesenen Hitzewellen im Juni und Juli 2021 an der Pazifikküste Nordamerikas mit Temperaturen von fast 50 °C in British Columbia

stellen eine eindrucksvolle und zugleich erschreckende Demonstration der Auswirkungen eines schwächer werdenden Strahlstroms dar. Gleichzeitig gab es zur gleichen Zeit zahlreiche Starkregenereignisse in Deutschland und NRW mit hohen Sachschäden.

An dieser Stelle wird eine Übersicht über ausgewählte Extremwettersituationen der vergangenen fünf Jahre (2016 - 2020) in NRW gegeben, die zum Teil für erhebliche Schäden gesorgt haben.

Im Jahr 2016 traf von Ende Mai bis Anfang Juni eine ganze Gewitterserie Nordrhein-Westfalen. Zunächst war am 27. Mai vor allem die Eifel betroffen, im Kreis Düren wurde sogar ein Tornado nachgewiesen (DWD 2016). In den Folgetagen verlagerte sich das Geschehen in das Ruhrgebiet und Rheinland. Dort kam es in vielen Städten zu Überflutungen von Straßen, Tunneln und Unterführungen. In Bochum fiel der Polizei-Notruf aufgrund eines Blitzschlags aus (Sat 2016). Hamminkeln kämpfte noch an den Folgetagen damit, den Damm der Issel zu sichern, die durch die Starkniederschläge stark angestiegen war (Sandgathe & Martella 2017).

2017 war durch einen zunächst warmen Frühling geprägt, der dafür sorgte, dass Obstbäume und diverse Kulturen schon sehr früh austrieben. Im April wurden dann in der Nacht vom 19. auf den 20. vielerorts Temperaturen registriert, die unter den Gefrierpunkt sanken. Diese Spätfröste fügten den bereits blühenden und austreibenden Obst- und Gemüsekulturen erhebliche Schäden zu (DWD 2017, vgl. Exkurs Indikator 6.1 „Beginn der phänologischen Jahreszeiten“). Das Ereignis war so außergewöhnlich und gravierend, dass vom Land NRW ein Hilfsprogramm für betroffene Landwirtinnen und Landwirte aufgelegt wurde.

Im ersten Halbjahr 2018 traten in NRW einige Unwetter auf, die vereinzelt Tornados und Starkregenereignissen mit sich brachten (DWD 2018). Dennoch bleibt das Jahr 2018 in erster Linie durch seine hohen Temperaturen verbunden mit Trockenheit und Dürre in Erinnerung. Bereits im März wurden unterdurchschnittliche Niederschlagssummen verzeichnet, dies sollte sich bis zum Jahresende nicht mehr ändern. Die Monate April und Mai stellten jeweils die wärmsten Monate seit Aufzeichnungsbeginn dar. Der Sommer landete





nach 2003 auf Platz zwei der wärmsten Sommer in NRW seit Aufzeichnungsbeginn. Die Auswirkungen von Hitze und Trockenheit zeigten sich nicht nur durch die vielerorts verdorrten Rasenflächen. Am 7. August trat an der ICE-Strecke bei Siegburg ein Böschungsbrand auf, der mehrere Häuser zerstörte, viele Verletzte zur Folge hatte und für Ausfälle im Bahnverkehr sorgte (FAZ 2018). Darüber hinaus musste 2018 mehrmals aufgrund von Niedrigwasserständen die Schifffahrt auf dem Rhein beschränkt und eingestellt werden (DWD 2018).

Ende Juli 2019 kam es zu einer Hitzewelle in Deutschland, die insbesondere Nordrhein-Westfalen traf. An verschiedenen Wetterstationen wurden an drei aufeinanderfolgenden Tagen Höchsttemperaturen von über 40°C gemessen. Absolute Spitzenreiter waren Duisburg-Bearl und Tönisvorst, dort wurde am 25. Juli 2019 Höchstwerte von 41,2°C gemessen. Damit wurde gleich an zwei Wetterstationen der bisherige Deutschlandrekord der Höchsttemperatur gebrochen. Zunächst galten Tönisvorst und Duisburg-Bearl allerdings nicht als Deutschlands Spitzenreiter, da in Lingen ein Wert von 42,6°C verzeichnet wurde. Nach einer Überprüfung des Lingener Werts durch den DWD, deren Ergebnisse im Dezember 2020 veröffentlicht wurden, musste der Lingener Wert aufgrund von Auffälligkeiten annulliert werden, sodass nun Duisburg und Tönisvorst offiziell Deutschlands Orte mit der höchsten jemals gemessenen Temperatur sind (Bissoli et al. 2019, DWD 2020b).

Für das Jahr 2020 wird nicht ein einzelnes Witterungsereignis aufgezeigt, sondern das Zusammenspiel der Parameter monatliche Lufttemperatur, Niederschlagssumme und Sonnenscheindauer dargestellt. Die Monatsmittel der drei genannten Parameter für NRW zeigten 2020 verschiedene Rekorde: Im April wurde in NRW die höchste Sonnenscheindauer seit Messbeginn 1951 für einen April gemessen, im August wurde der Temperaturrekord von 2003 eingestellt (DWD 2020a).

Bei der Niederschlagssumme wurde im Mai 2020 die zweitniedrigste Menge für den Monat Mai seit Aufzeichnungsbeginn 1881 registriert; im Februar hingegen die dritthöchste je gemessene Niederschlagsmenge. Auch die Sonnenscheindauer zeigte sich weiterhin wechselhaft, nachdem im Oktober die drittkürzeste Sonnenscheindauer gemessen wurde, trat im November die drittlängste Sonnenscheindauer seit Messbeginn auf.

Insgesamt lag die Lufttemperatur 2020 in zehn Monaten über dem langjährigen Mittel von 1961-1990 und entsprach zweimal dem Schnitt. Die Niederschlagssumme übertraf und entsprach in jeweils zwei Monaten dem Schnitt, lag in den übrigen acht Monaten aber darunter. Die Sonnenscheindauer war siebenmal überdurchschnittlich, in zwei Monaten dem Schnitt entsprechend und lag dreimal unter dem Durchschnitt.

Insgesamt führten in 2020 die hohen Temperaturen und Sonnenstunden bei meist unterdurchschnittlichem Niederschlag dazu, dass sich das seit 2018 bestehende Niederschlags- und Wasserhaushaltsdefizit weiter erhöht (LANUV 2020). Das Abflussgeschehen der Fließgewässer befand sich über viele Monate hinweg im Niedrigwasserbereich, die Niederschläge brachten teilweise eine Durchfeuchtung des Oberbodens mit sich, doch herrscht in größeren Tiefen fast flächendeckend eine Dürresituation im Boden vor. Viele Grundwassermessstellen zeigten den Sommer über ebenfalls unterdurchschnittliche Werte im Vergleich zum langjährigen Mittel. Außerdem geht das Jahr 2020 mit einer Durchschnittstemperatur von 11,1°C in NRW als das wärmste Jahr seit Aufzeichnungsbeginn in die Geschichtsbücher ein.

Während ein Teil der Bevölkerung das „schöne Wetter“ genießt, stellten die Witterung und vor allem die langfristigen Klimaveränderungen die Umwelt und verschiedene Wirtschaftsbereiche vor zunehmende Probleme, wie in diesem Bericht gezeigt wird.



1. Lufttemperatur

Die Temperatur der Luft ist die zentrale Leitgröße zur Beschreibung der anthropogenen Klimaveränderung, die sich zunehmend von einer Erderwärmung in eine Erderhitzung steigert. Bei keinem anderen Parameter wirkt sich der beispiellose Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre (Zeebee et al. 2016) so direkt aus. Durch die schon im Jahr 1896 durch Svante Arrhenius (Arrhenius 1896) entdeckten Auswirkungen von Treibhausgasen auf die Atmosphäre (Strahlungsantrieb) ist klar, dass die Temperaturen so lange steigen werden, so lange die Treibhausgasemissionen zunehmen (Hansen et al. 2017).

Es muss daher alles dafür getan werden, um das beim Klimaabkommen von Paris 2015 ratifizierte Ziel, den Klimawandel auf deutlich unter 2 °C, am besten 1,5 °C, Erwärmung gegenüber den globalen Temperaturen 1850-1900 zu begrenzen. Nur so können gefährliche Kipp-Punkte im globalen Klima- und Ökosystem vermieden werden (Steffen et al. 2018, Lenton et al. 2019, Wunderling et al. 2021).

Zusätzlich müssen weitreichende Klimaanpassungsmaßnahmen die bereits eingetroffenen und nicht mehr abzuwendenden anthropogenen Klimaveränderungen abmildern.



Indikatoren-Kernaussagen:

- Die Lufttemperatur ist in NRW deutlich angestiegen, sowohl im Gesamtjahresverlauf als auch in den einzelnen Jahreszeiten.
- Der Anstieg der Lufttemperatur beschleunigt sich.
- 2020 war das wärmste Jahr seit Messbeginn in NRW.
- 13 Jahre der vergangenen 20 Jahre zählen zu den 20 wärmsten Jahren seit Aufzeichnungsbeginn.
- 21 Jahre der letzten 30 Jahre zählen zu den 30 wärmsten Jahren seit Aufzeichnungsbeginn.
- Im Vergleich der Zeiträume 1961-1990 und 1991-2020 hat die Jahresmitteltemperatur um 1 Grad Celsius zugenommen.
- Eis- und Frosttage werden in NRW deutlich seltener.
- 2014 trat mit 36 Frosttagen der zweitniedrigste Wert seit Aufzeichnungsbeginn auf.
- Sommertage und heiße Tage nehmen zu.
- Der höchste Wert der Sommertage wurde 2018 mit 76 Tagen im Jahr erreicht.



Tab. 3: Übersicht der Indikatoren zum Abschnitt 1 „Lufttemperatur“

Indikator		Einheit	räumliche Einheit	Zeitreihe	Mittelwert Zeitreihe	Trend Zeitreihe	Änderung Zeitreihe	
1.1 Durchschnittliche Jahreslufttemperatur	Jahr	°C	NRW	1881-2020	9,0		+1,7	
		°C	NRW	1951-2020	9,4		+1,8	
		°C	NRW	1991-2020	10,0		+1,1	
1.2 Durchschnittliche Jahreszeitenlufttemperatur	Frühling	°C	NRW	1881-2020	8,5		+1,7	
	Sommer	°C	NRW	1881-2020	16,5		+1,6	
	Herbst	°C	NRW	1881-2020	9,4		+1,7	
	Winter	°C	NRW	1882-2020	1,8		+1,8	
1.3 Temperaturkenntage kalt	Frosttage	Tage	NRW	1891-2020	71		-17	
	Eistage	Tage	NRW	1891-2020	16		-7	
1.4 Temperaturkenntage warm	Sommertage	Tage	NRW	1891-2020	28		+13	
	Heiße Tage	Tage	NRW	1891-2020	5		+5	
	Tropennächte	Tage	NRW	1951-2020	0,4		+0,7	

- steigender Trend
 fallender Trend
 Trend mit Trendumkehr: zuerst fallend, dann steigend
 Trend mit Trendumkehr: zuerst steigend, dann fallend
 kein Trend

- günstige Entwicklung
 ungünstige Entwicklung
 keine Bewertung der Entwicklung möglich oder gleichzeitig günstige und ungünstige Entwicklungsaspekte vorhanden

	Mittelwert der Klimanormalperioden												Auswirkungen auf Handlungsfelder
	1881 - 1910	1891 - 1920	1901 - 1930	1911 - 1940	1921 - 1950	1931 - 1960	1941 - 1970	1951 - 1980	1961 - 1990	1971 - 2000	1981 - 2010	1991 - 2020	
	8,4	8,6	8,7	8,8	8,9	9,0	8,9	8,9	9,0	9,3	9,6	10,0	alle
	-	-	-	-	-	-	-	8,9	9,0	9,3	9,6	10,0	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10,0	
	7,8	8,1	8,2	8,3	8,4	8,5	8,4	8,1	8,3	8,7	9,2	9,5	alle
	16,1	16,0	15,9	16,2	16,5	16,6	16,4	16,2	16,3	16,7	17,1	17,5	
	8,8	8,8	8,8	9,0	9,3	9,5	9,6	9,4	9,5	9,4	9,8	10,0	
	1,0	1,4	1,8	1,8	1,4	1,3	1,2	1,6	1,7	2,2	2,3	2,7	
	-	74	72	72	75	75	76	73	70	65	65	62	alle
	-	17	17	18	20	18	20	17	17	14	14	12	
	-	24	23	26	28	28	26	23	25	28	32	36	alle
	-	4	3	4	5	5	5	4	4	5	6	8	
	-	-	-	-	-	-	-	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	



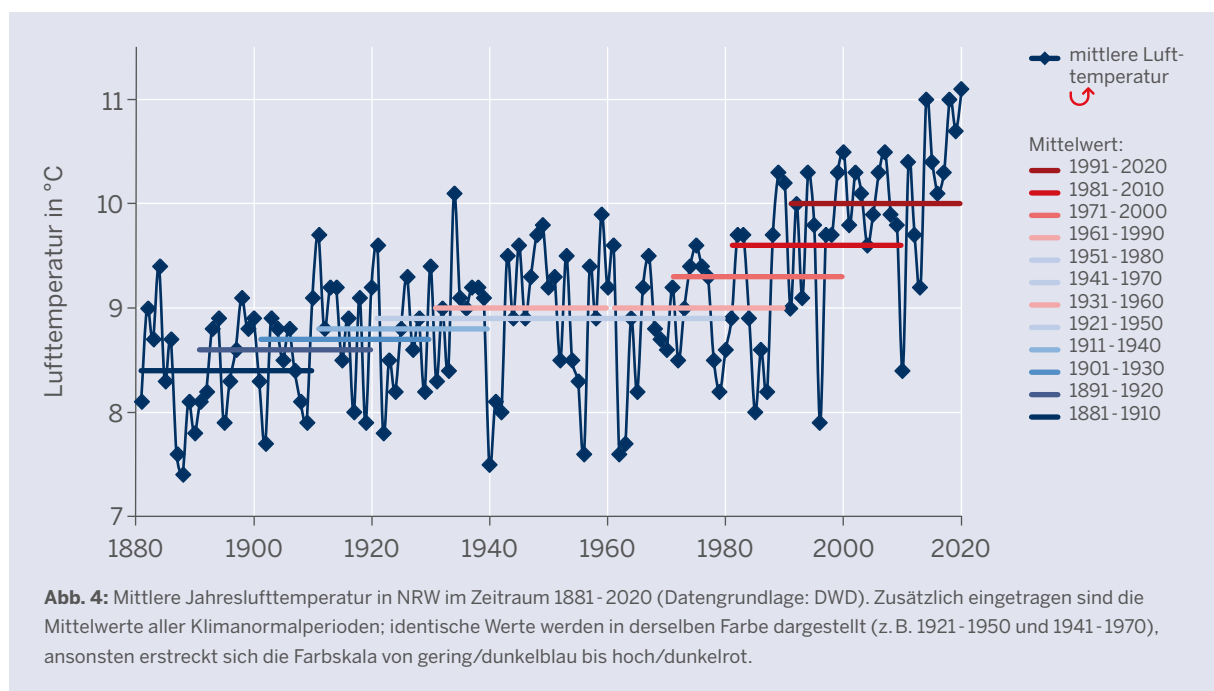
1.1 Durchschnittliche Jahreslufttemperatur



Die Temperatur steigt immer stärker an

Das Jahresmittel der Lufttemperatur ist ein sehr anschaulicher Zeiger für den Klimawandel und den Temperaturanstieg in NRW. Dies wird sowohl bei

der Betrachtung des Mittelwerts für NRW (Abbildung 4) als auch bei der Kartendarstellung deutlich (Abbildung 5).



In der Darstellung der Einzeljahre lässt sich insbesondere am treppenstufenartigen Verlauf der Mittelwerte über die Klimanormalperioden der deutliche Anstieg der Temperatur erkennen (Abbildung 4). Dass einzelne Jahre, wie zum Beispiel 1934 (10,1°C), deutlich über dem entsprechenden Mittelwert liegen und andere Jahre, wie zum Beispiel 1996 (7,9°C), deutlich darunter, widerspricht dem Änderungstrend nicht. Dies zeigt hingegen nur die Witterungsvariabilität von Jahr zu Jahr.

Die Kartendarstellung der Jahreslufttemperaturen in Abbildung 5 zeigt deutlich, dass der Anstieg der Lufttemperatur auf der gesamten NRW-Landesfläche stattfindet. Besonders eindrucksvoll ist, dass sich die mittleren Temperaturen im Vergleich der Zeiträume 1961-1990 und 1991-2020 um eine Temperaturklasse, also um 1 K, nach oben verschoben haben.

Mittlere Jahreslufttemperatur

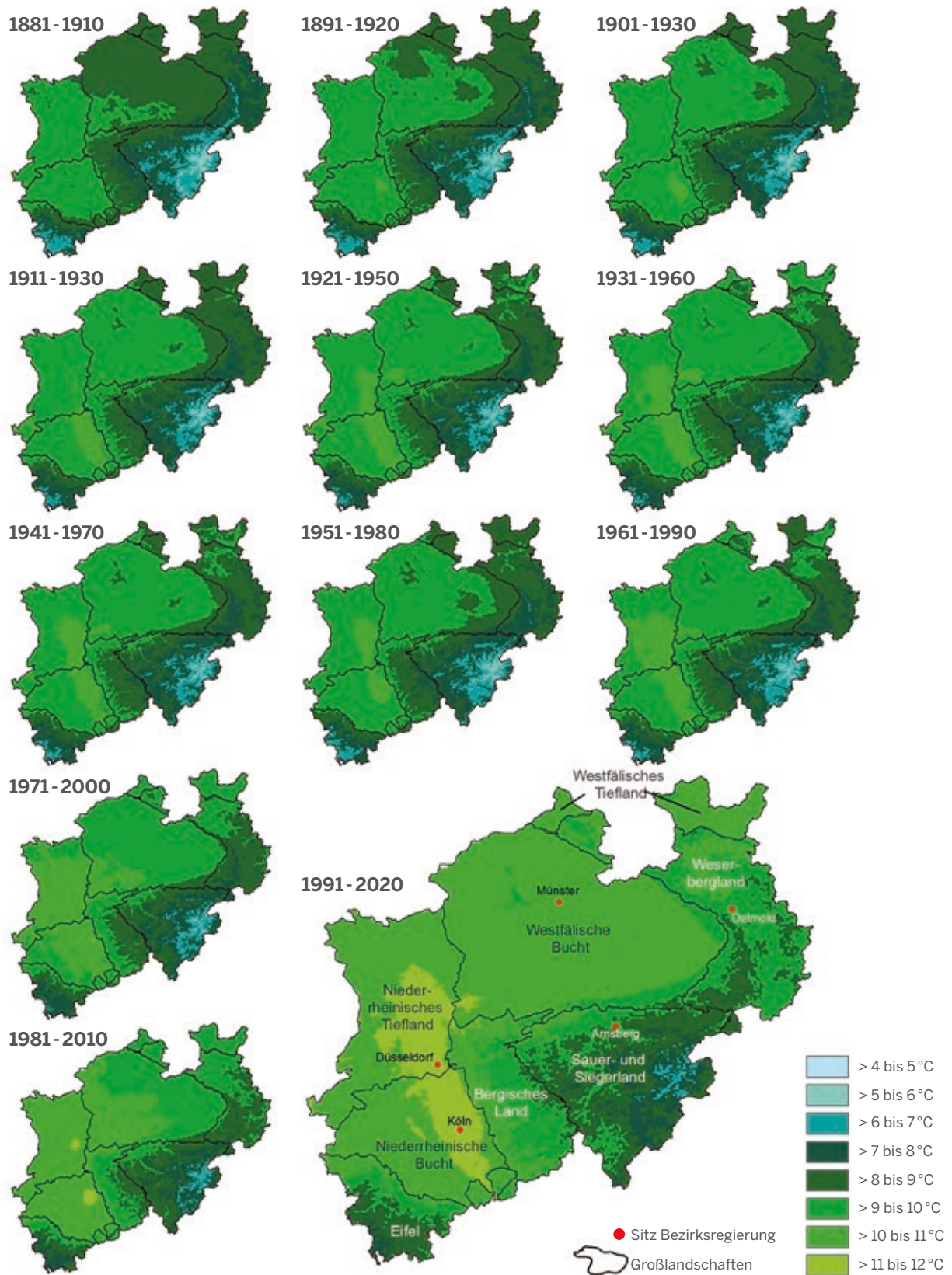


Abb. 5: Karten der mittleren Jahreslufttemperatur in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Datengrundlage: DWD)

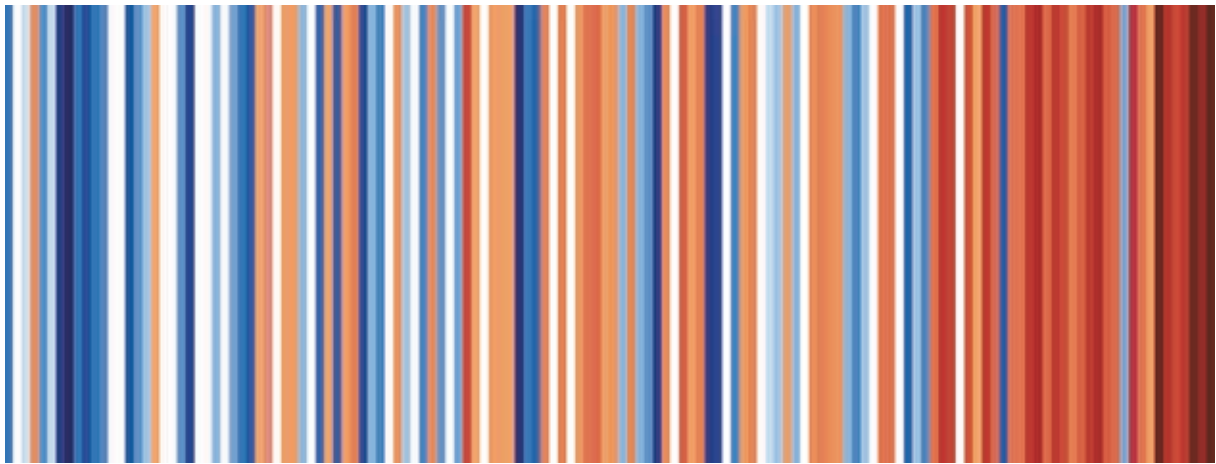


Abb. 6: Warming stripes für NRW für den Zeitraum 1881 - 2020 (Datengrundlage: DWD). Die Temperaturspanne in NRW reicht von 7,4 °C im Jahr 1888 (dunkelblau) bis zu 11,1 °C im Jahr 2020 (dunkelrot) (vgl. Abbildung 7).

Eine seit einigen Jahren verbreitete Form der Visualisierung des Temperaturanstiegs wurde durch den britischen Klimawissenschaftler Ed Hawkins eingeführt, die sogenannten „warming stripes“, zu Deutsch Erwärmungs- oder Klimastreifen genannt. Sie spiegeln die Jahresmitteltemperatur eines Ortes, einer Region oder Landes durch eine Farbskala von dunkelblau (Jahr mit der geringsten Temperatur) bis dunkelrot (Jahr mit der höchsten Temperatur) wider und werden spezifisch auf das ausgewählte Gebiet angepasst. Die warming stripes für NRW sind in Abbildung 6 dargestellt. In NRW reicht die Temperaturspanne von 7,4 °C im Jahr 1888 bis zu 11,1 °C im Jahr 2020. Die Jahre mit Hitzerekorden häufen sich am Ende der Zeitspanne: 2018 stellte den Rekord von 2014 mit 11,0 °C ein, 2019 liegt auf Rang vier der wärmsten Jahre in NRW seit Messbeginn.

Ebenfalls interessant ist es, die Steigung der linearen Trendgeraden über verschiedene Zeiträume zu vergleichen (Abbildung 7): Über den Gesamtzeitraum 1881 - 2020 zeigt sich ein Temperaturanstieg von 1,7 K, oder anders ausgedrückt, eine Temperatursteigerung von 0,1 K pro Dekade. Über den Zeitraum 1951 - 2020 beträgt der Temperaturanstieg 1,8 K oder 0,3 K pro Dekade, in den vergangenen 30 Jahren liegt er bei 1,1 K oder 0,4 K pro Dekade. Es zeigt sich somit deutlich, dass sich die Temperaturerhöhung beschleunigt bzw. verstärkt hat. Diese Beobachtung lässt sich auch global machen (siehe www.ncdc.noaa.gov/cag/global/time-series) und läuft in der Arktis nochmals deutlich schneller ab (Dai et al. 2019).

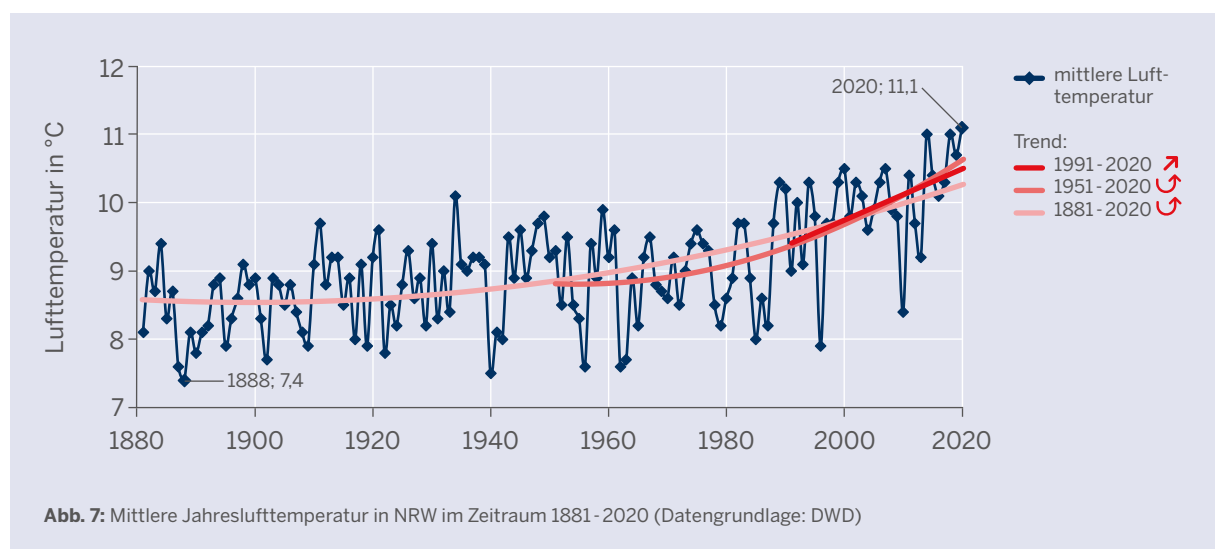


Abb. 7: Mittlere Jahreslufttemperatur in NRW im Zeitraum 1881 - 2020 (Datengrundlage: DWD)

Die beschleunigte Temperaturerhöhung zeigt sich auch bei der Kartendarstellung für NRW (Abbildung 5): werden die Zeiträume 1991 - 2020 und 1961 - 1990 verglichen – also zwei aufeinanderfolgende, überschneidungsfreie Klimanormalperioden – zeigt sich, dass sich alle Flächen eine Klasse nach oben verschoben haben, dies entspricht auch genau dem veränderten Mittelwert für NRW zwischen den beiden Perioden von 1,0 K (Tabelle 2).

In der aktuellen Situation (Zeitraum 1991 - 2020) treten entlang des Rheins mit Werten zwischen 11 °C und 12 °C die höchsten Jahresdurchschnittstemperaturen in NRW auf (Abbildung 5). In den Großlandschaften Niederrheinische Bucht, Niederrheinisches Tiefland und Westfälischer Bucht werden flächendeckend Jahresdurchschnittstemperaturen zwischen 10 °C und 11 °C erreicht. Mit zunehmender Höhenlage nehmen die Temperaturen ab. In den Hochlagen des Sauerlandes, genauer in den Kammlagen des Rothaargebirges, werden die niedrigsten Werte in NRW verzeichnet, diese liegen zwischen 6 °C und 7 °C.



Globale Erwärmung vs. Erwärmung in NRW

Weltweit sind die mittleren globalen Temperaturen seit Beginn der Wetteraufzeichnungen im Jahr 1880 um rund 1 Kelvin gestiegen (Differenz zwischen Beginn und Ende der linearen Trendgeraden; 1,04 K nach NASA 2021; 1,06 K nach NOAA 2021).

In Nordrhein-Westfalen hat sich die mittlere Temperatur im selben Zeitraum um rund 1,7 Kelvin (Tabelle 3) erhöht. Eine Ursache dafür, dass sich NRW und Deutschland schneller erwärmt haben als im globalen Mittel, ist erstens die Lage an Land (IPCC 2019) und zweitens der Effekt der „arctic amplification“, durch den sich die Nordhalbkugel durch den Rückgang des arktischen Meereises besonders schnell erwärmt (Coumou et al. 2018, Dai et al. 2019, Moon et al. 2019, Jansen et al. 2020).





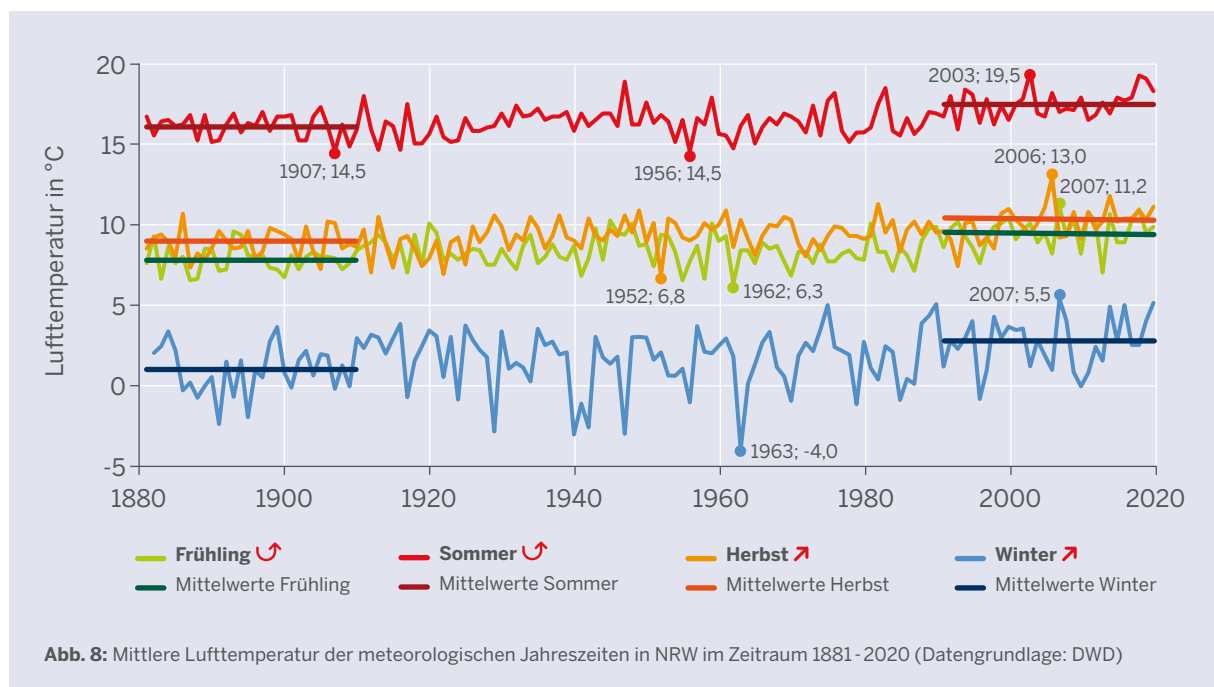
1.2 Durchschnittliche Jahreszeitenlufttemperatur



Die Temperatur steigt in allen Jahreszeiten

Entsprechend der durchschnittlichen Jahreslufttemperatur zeigen auch die Lufttemperaturen der meteorologischen Jahreszeiten (Frühling = 1. März bis 31. Mai; Sommer = 1. Juni bis 31. August; Herbst = 1. September bis 30. November; Winter = 1. Dezember bis 28./29. Februar) über den Gesamtmeszeitraum 1881 - 2020 einen deutlichen Anstieg in NRW (Abbildung 8). Die Temperaturerhöhungen der Jah-

reszeiten betragen im Vergleich der Klimanormalperioden 1881 - 1910 und 1991 - 2020 im Frühling +1,7 K, im Sommer +1,4 K, im Herbst +1,3 K und im Winter +1,7 K. Gerade in Jahreszeiten, in denen Tiere und Pflanzen eine verstärkte Aktivität zeigen, kann die Temperaturerhöhung zusammen mit Änderungen der Niederschlagsmenge deutliche Auswirkungen haben (Handlungsfelder 4 - 8).



Die Kartendarstellungen der Jahreszeitenlufttemperaturen in den Abbildungen 9 bis 12 zeigen deutlich, dass der Anstieg der Lufttemperatur auf der gesamten NRW-Landesfläche stattfindet. Wie bei der Jahreslufttempe-

ratur ist besonders eindrucksvoll, dass sich die mittleren Temperaturen aller Jahreszeiten im Vergleich der Zeiträume 1961 - 1990 und 1991 - 2020 um eine Temperaturklasse, also um 1 K nach oben verschoben haben.

Mittlere Lufttemperatur – Frühling

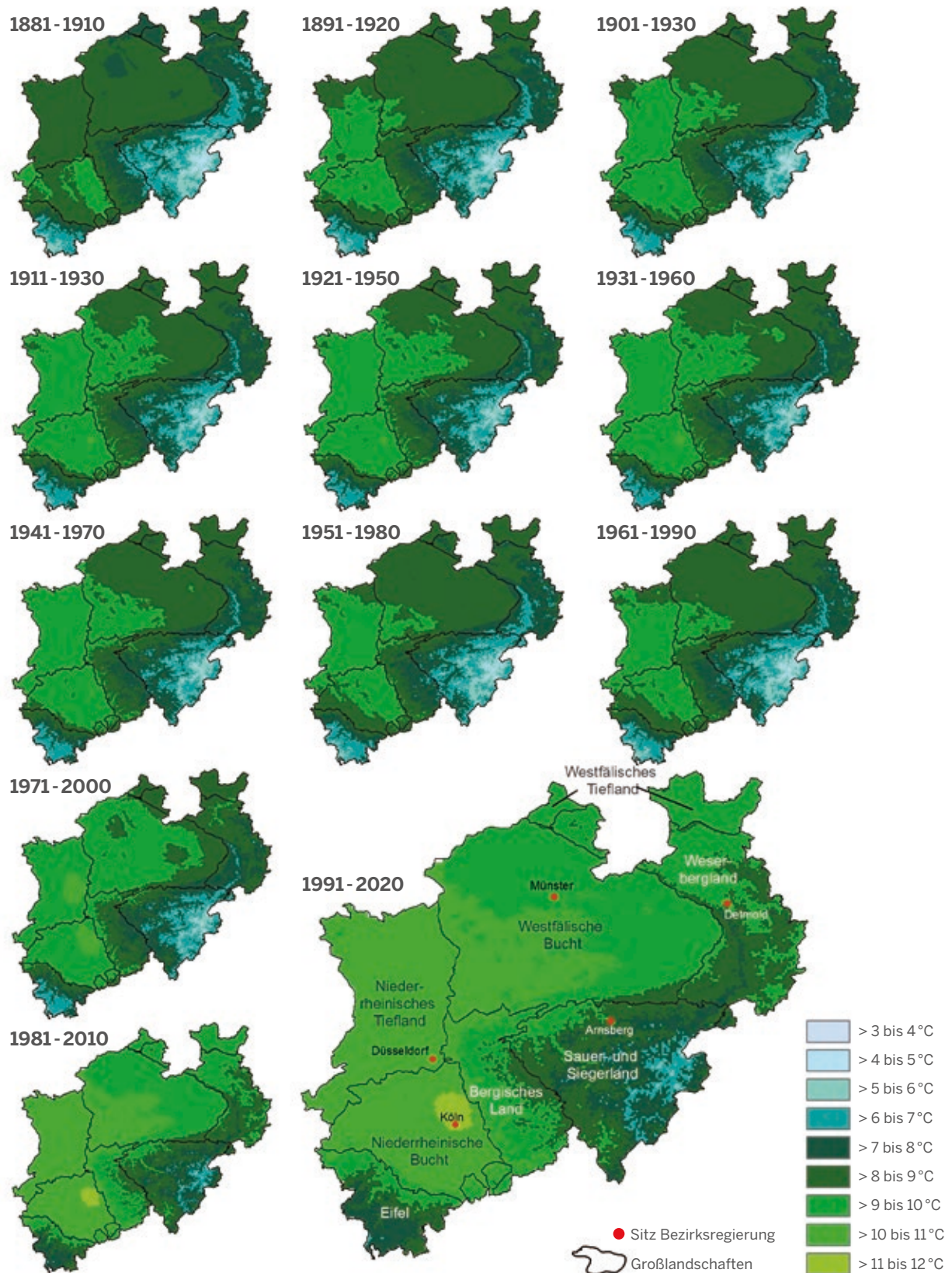


Abb. 9: Karten der mittleren Lufttemperatur im Frühling in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Datengrundlage: DWD)

Mittlere Lufttemperatur – Sommer

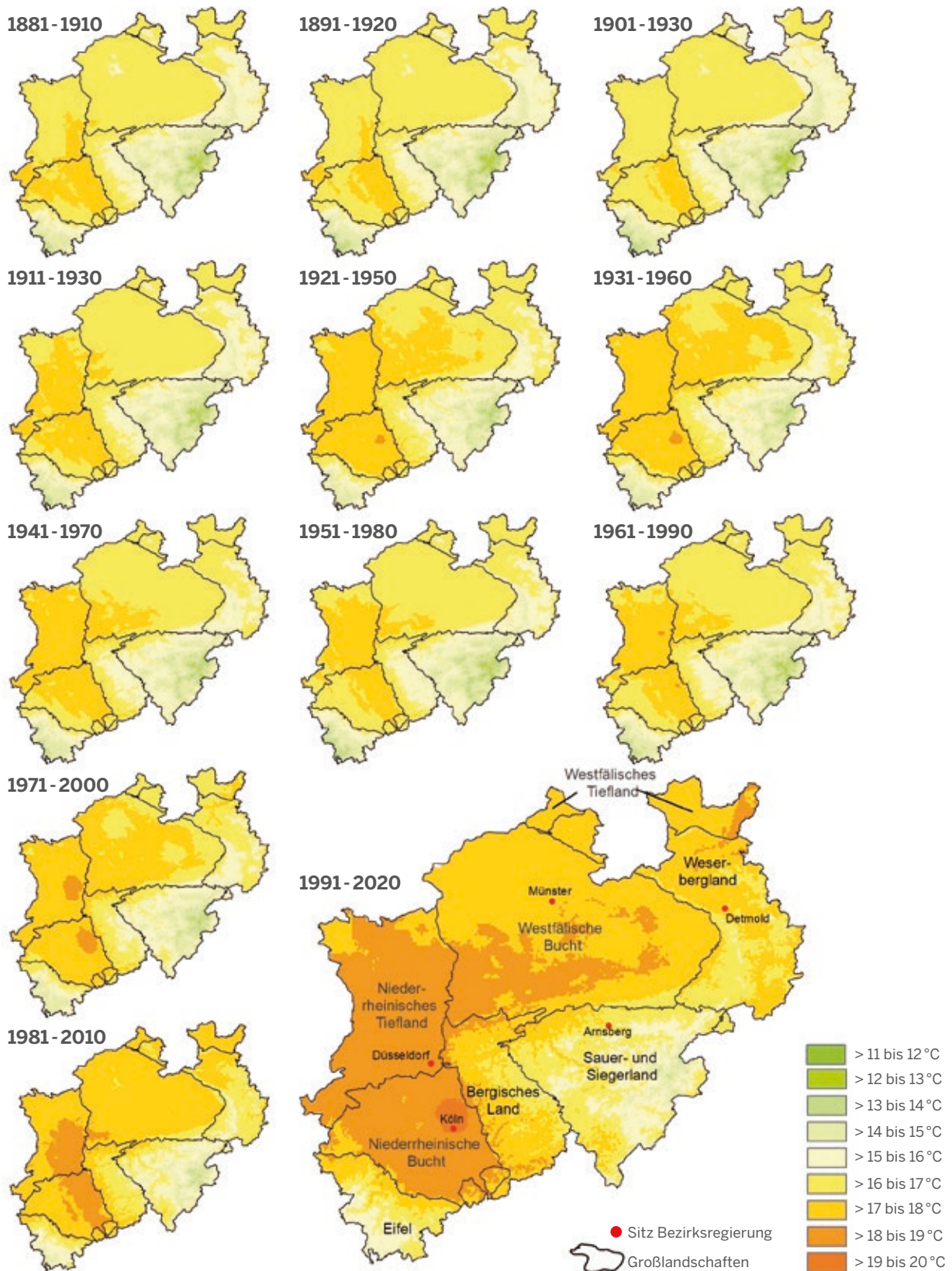


Abb. 10: Karten der mittleren Lufttemperatur im Sommer in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Datengrundlage: DWD)

Mittlere Lufttemperatur – Herbst

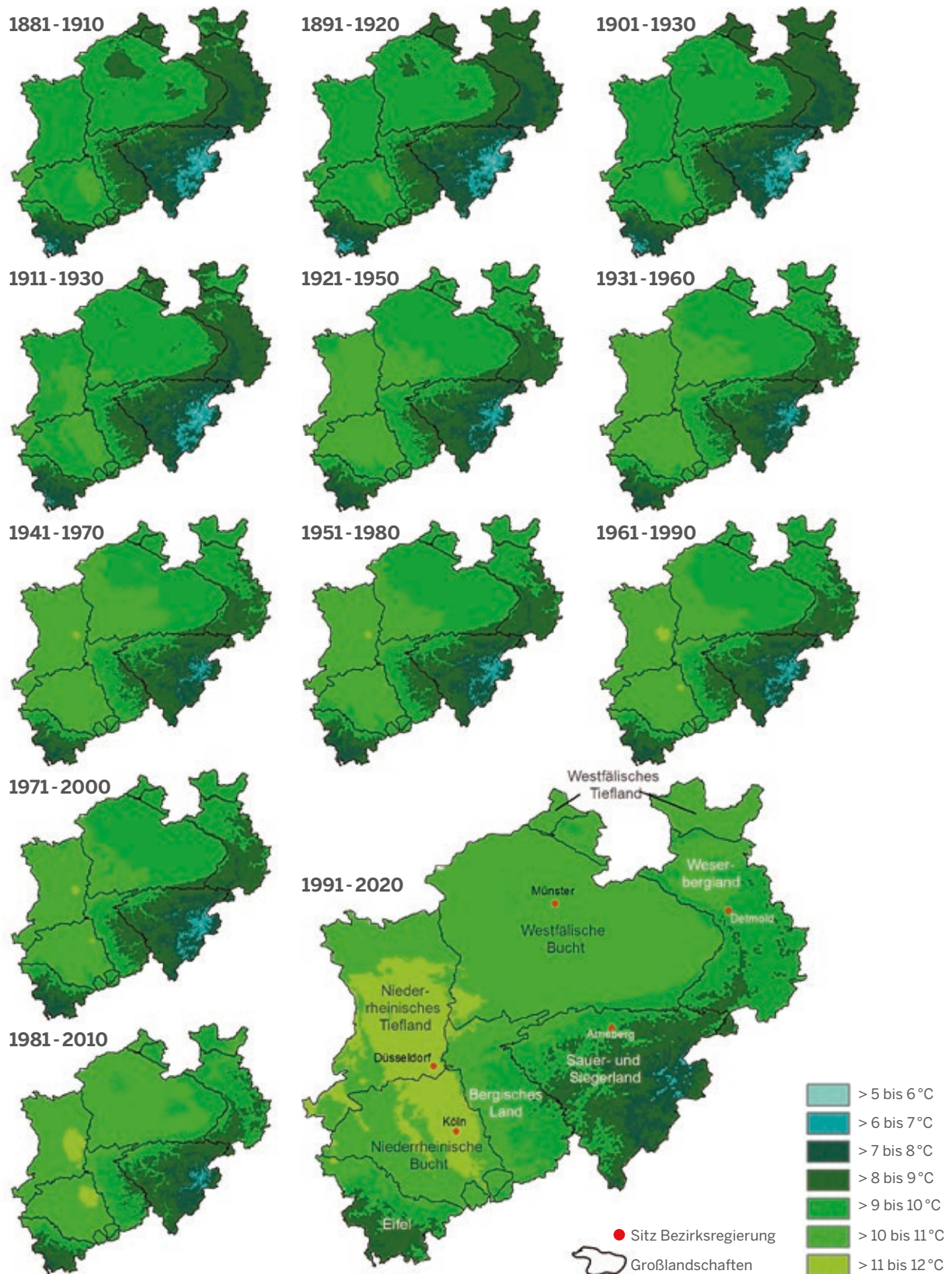


Abb. 11: Karten der mittleren Lufttemperatur im Herbst in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Datengrundlage: DWD)

Mittlere Lufttemperatur – Winter

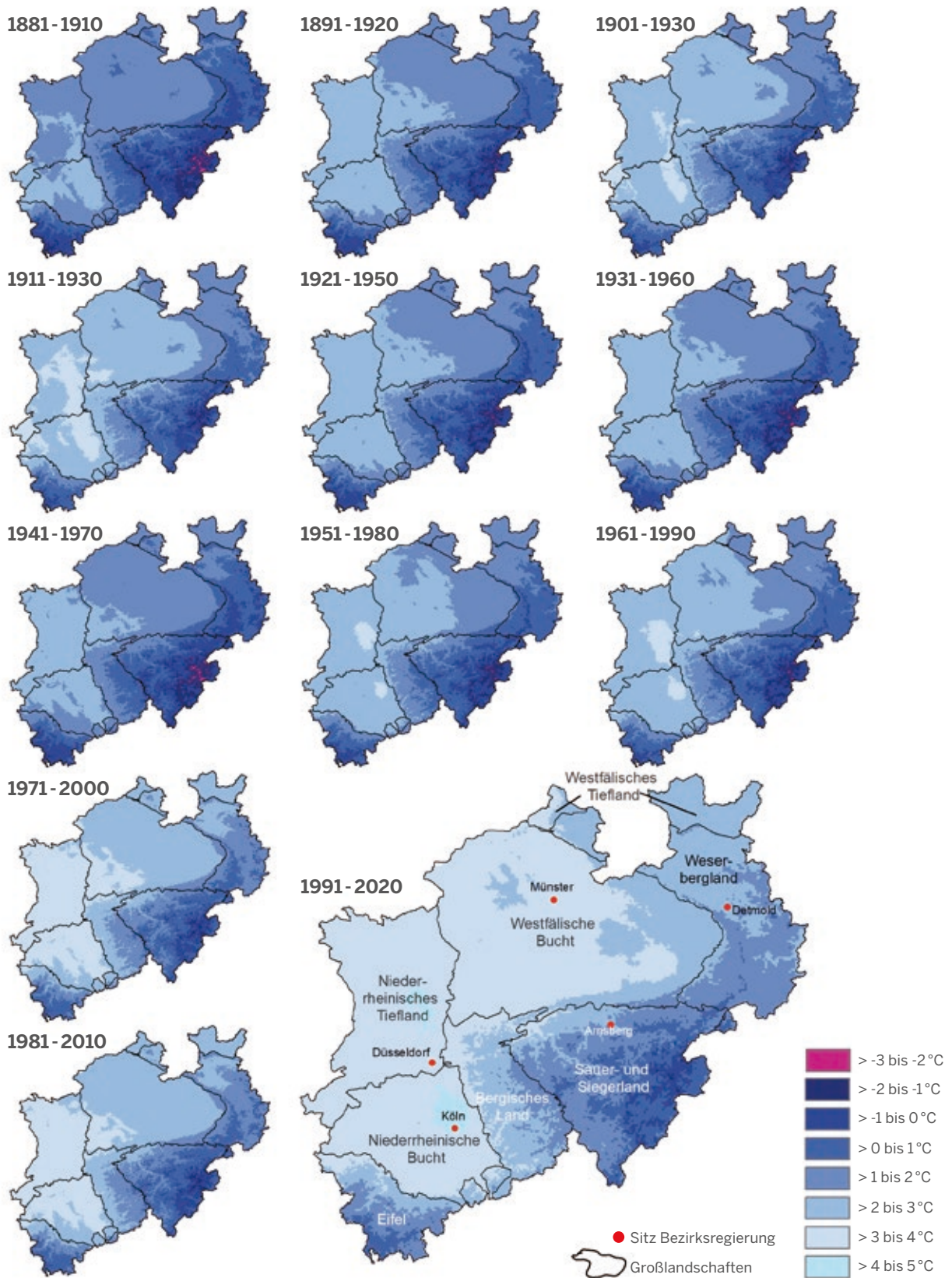


Abb. 12: Karten der mittleren Lufttemperatur im Winter in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Datengrundlage: DWD)



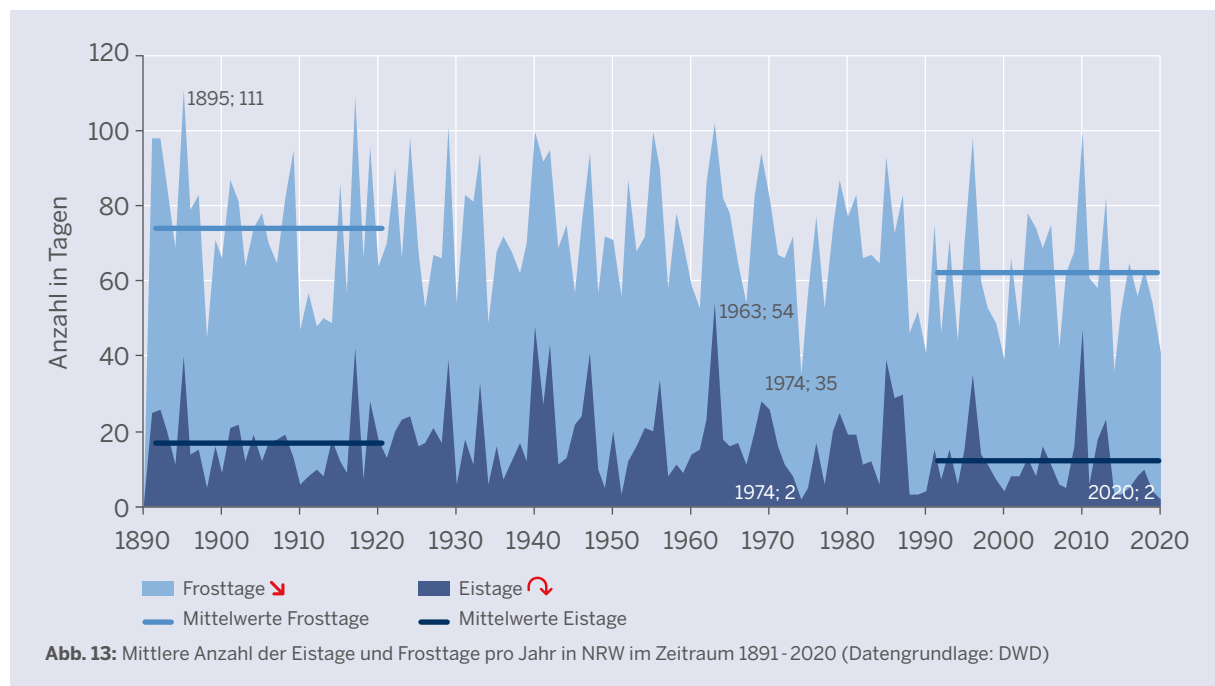
1.3 Temperaturkenttage kalt (Frosttage, Eistage)



Die kalten Kenttage nehmen ab

Der Anstieg der durchschnittlichen Jahreszeitenlufttemperatur, wie im vorangegangenen Indikator beschrieben, wirkt sich auf das Auftreten der Temperaturkenttage aus. Temperaturkenttage beschreiben das Erreichen, Über- bzw. Unterschreiten

bestimmter Temperaturschwellenwerte im Tagesverlauf. Bei den Eistagen liegt die Tageshöchsttemperatur unter 0°C, bei den Frosttagen die Tagesniedrigsttemperatur unter 0°C.



Die Frosthäufigkeit hat seit Messbeginn deutlich abgenommen, dies gilt sowohl für andauernden Frost (Eistage) als auch für das Auftreten von Frost im Tagesverlauf (Frosttage). Die Eistage sind im Vergleich der Klimanormalperioden 1891 - 1920 und 1991 - 2020 um fünf Tage zurückgegangen, die Frosttage um zwölf Tage

(Abbildung 13, Tabelle 3). Das Ausbleiben von Frost kann sich beispielsweise negativ auf Vegetation und Landwirtschaft auswirken, da einige Arten den Frostreiz zum Auskeimen benötigen. Zusätzlich wirkt sich Frosthub positiv auf das Bodengefüge aus.

Eistage

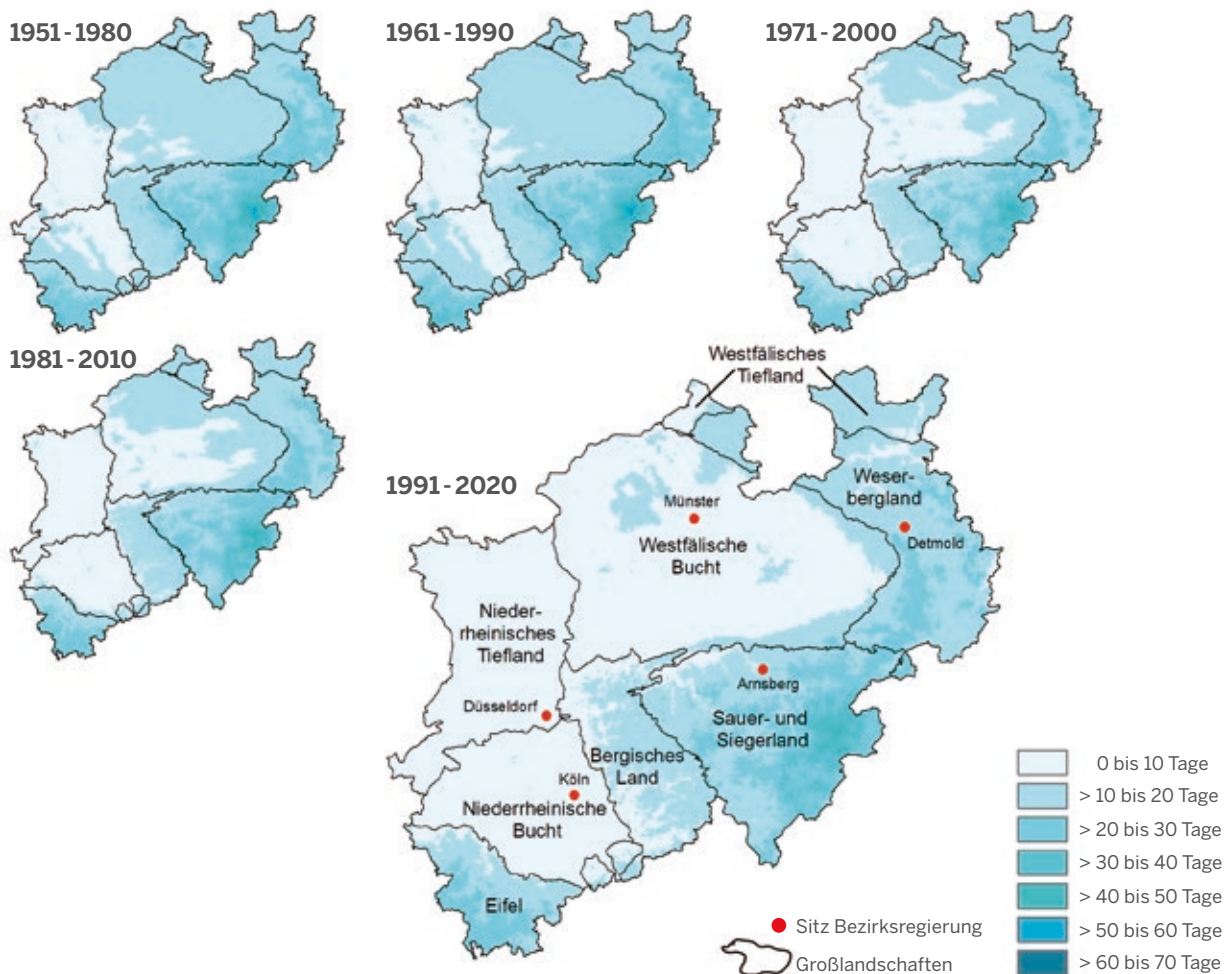


Abb. 14: Karten der Anzahl der Eistage in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Datengrundlage: DWD)

Aufgrund der seit Aufzeichnungsbeginn geringen Zahl an Eistagen außerhalb der Mittelgebirgsbereiche ist auf der Karte der Eistage in NRW (Abbildung 14) keine so deutliche Veränderung wie bei der Lufttemperatur zu erkennen. Dennoch zeigt sie eine leichte Klassenverschiebungen, insbesondere in den Hochlagen des Sauerlands und den weiteren Mittelgebirgen.

Die Frosttage zeigen ein ähnliches Verteilungsbild wie die Eistage mit einer hohen Auftrittszahl in den Mittelgebirgsbereichen (Abbildung 15). Dagegen zeigen sich geringe Werte insbesondere entlang des Rheins, aber auch insgesamt in den Großlandschaften der Niederrheinischen Bucht und des Niederrheinischen Tieflands. Im Vergleich der Klimanormalperioden 1961-1990 und 1991-2020 ist nahezu für den gesamten Landesbereich eine Verschiebung um eine Klasse, also eine Abnahme um zehn Frosttage, zu beobachten.

Frosttage

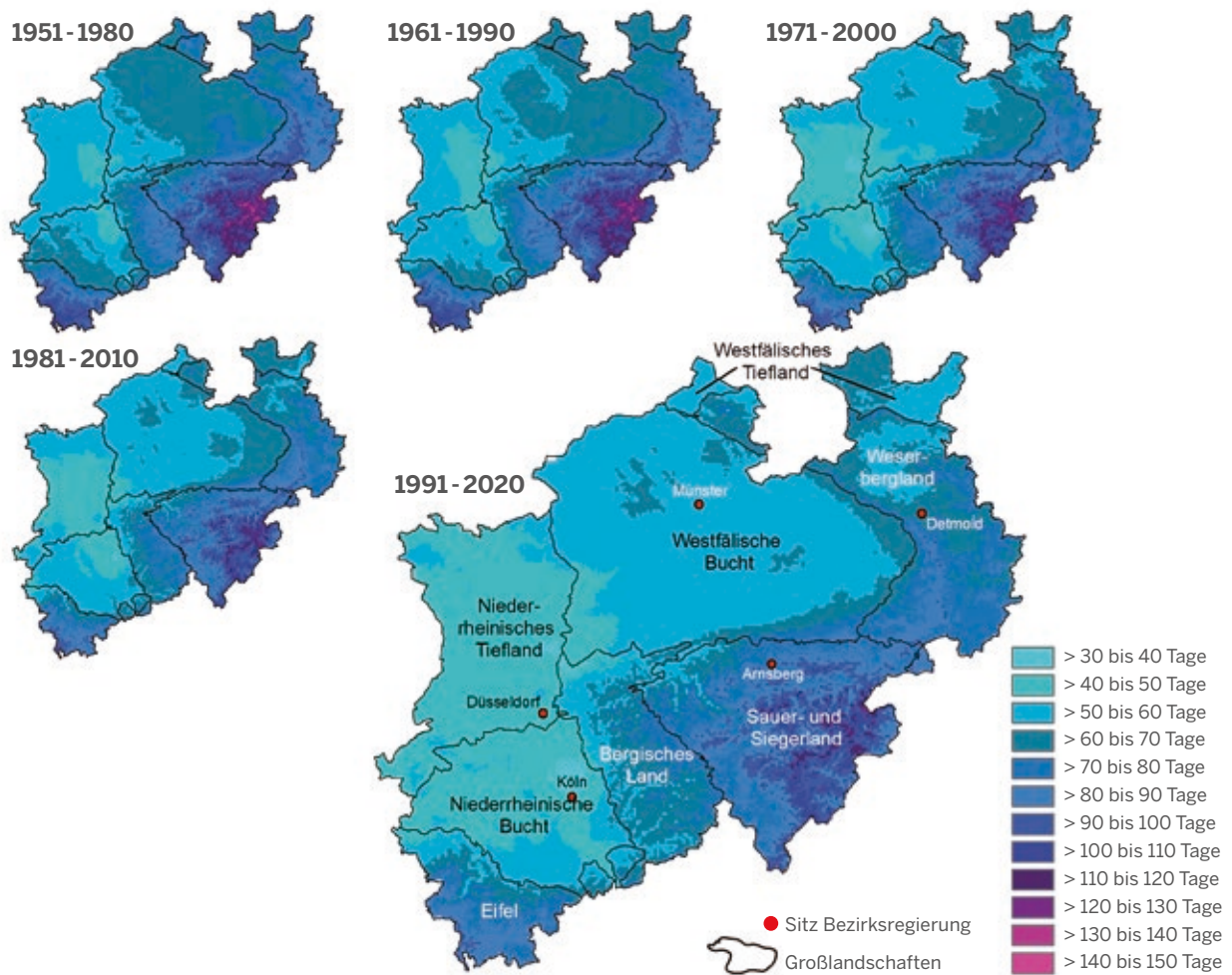


Abb. 15: Karten der Anzahl der Frosttage in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Datengrundlage: DWD)





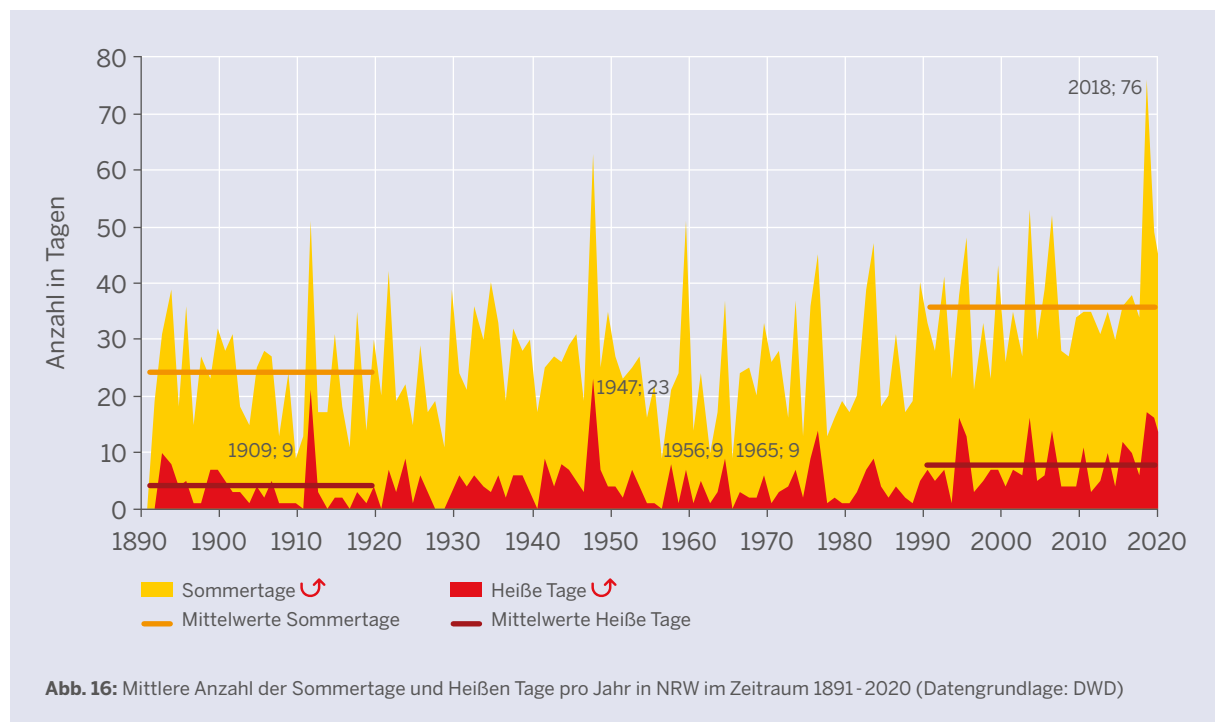
1.4 Temperaturkenttage warm (Sommertage, Heiße Tage, Tropennächte)

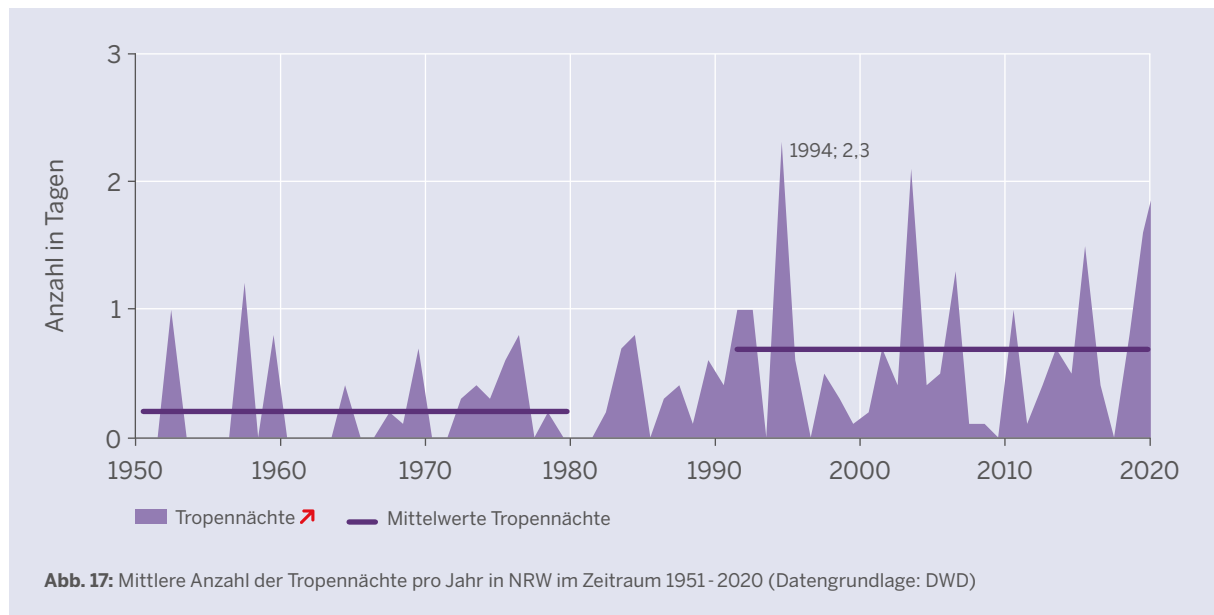


Tage mit hoher Hitzebelastung
kommen immer häufiger vor

Im Gegensatz zu den kalten Temperaturkenttagen steigt die Zahl der warmen Temperaturkenttage stark an. Dabei erreicht die Tageshöchsttemperatur an einem Sommertag den Wert von 25°C, an einem Heißen Tag den Wert von 30°C. Die Heißen Tage haben im Vergleich der Klimanormalperioden 1891-

1920 und 1991-2020 um vier Tage zugenommen, die Sommertage um zwölf Tage. Bei den Tropennächten (Tiefsttemperatur in der Nacht (18 bis 6 Uhr) $\geq 20^{\circ}\text{C}$) reicht die Messreihe nur bis zum Jahr 1951 zurück, sodass der Anstieg einen halben Tag im Vergleich der Zeiträume 1951-1980 und 1991-2020 beträgt.





Das Jahr 2018 sticht in der Reihe der Sommertage besonders hervor (Abbildung 16), da es durch einen langanhaltend warmen Sommer geprägt war. Mit 76 Sommertagen liegt der Wert von 2018 sogar 13 Tage über dem nächst höchsten Wert aus dem Jahr 1947.

Die Tropennächte belaufen sich im Mittel für NRW auf sehr geringe Werte und erreichen maximal den Wert von 2,3 Nächten (Abbildung 17). Dies ist auf die Interpolation und Mittelung der Daten auf die gesamte Landesfläche zurückzuführen. Für ein genaueres Bild, wie sich Hitze in Städten auswirken kann, wird auf den Indikator 9.2 „Tropennächte in Innenstädten“ verwiesen, der für zwei Beispielstädte die Tropennächte in Innenstadtlage erfasst und darstellt.

Heiße Tage

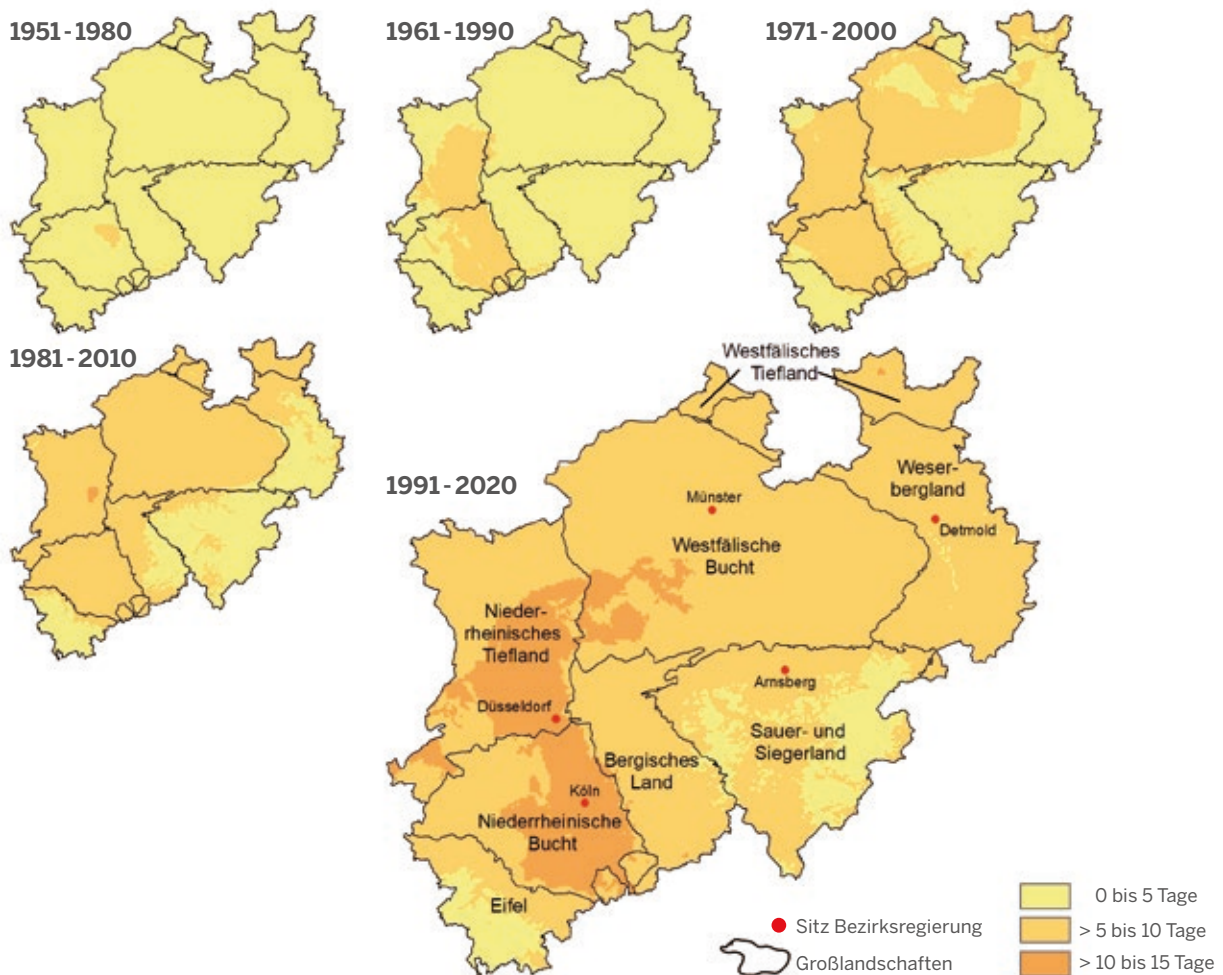


Abb. 18: Karten der Anzahl der heißen Tage in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Datengrundlage: DWD)

Die Kartendarstellung in Abbildung 18 zeigt, dass es im Zeitraum 1951 - 1980 nahezu in ganz NRW maximal fünf heiße Tage pro Jahr gegeben hat. Bis zur Klimanormalperiode 1991 - 2020 entwickelt sich ein deutlich differenzierteres Bild: Entlang des Rheins hat sich die Anzahl der heißen Tage auf durchschnittlich zehn bis 15 Tage erhöht, und auch auf der gesamten Landesfläche treten deutlich mehr heiße Tage auf als noch zu Beginn der Erfassung auf. Keine bzw. wenige heiße Tage pro Jahr treten hingegen nur noch in den Höhenlagen des Sauerlandes und der Eifel auf.

Bei den Sommertagen ist ebenso wie bei den heißen Tagen eine Zunahme in allen Bereichen von NRW zu verzeichnen (Abbildung 19). Insgesamt hat eine Zunahme um etwa zwölf Tage stattgefunden. Die Regionen entlang des Rheins weisen dabei aktuell mit im Mittel bis zu 45 Sommertagen pro Jahr die höchsten Werte in NRW auf. Im Sauer- und Siegerland liegt die Anzahl der Sommertage zum Teil nur im einstelligen Bereich.

Sommertage

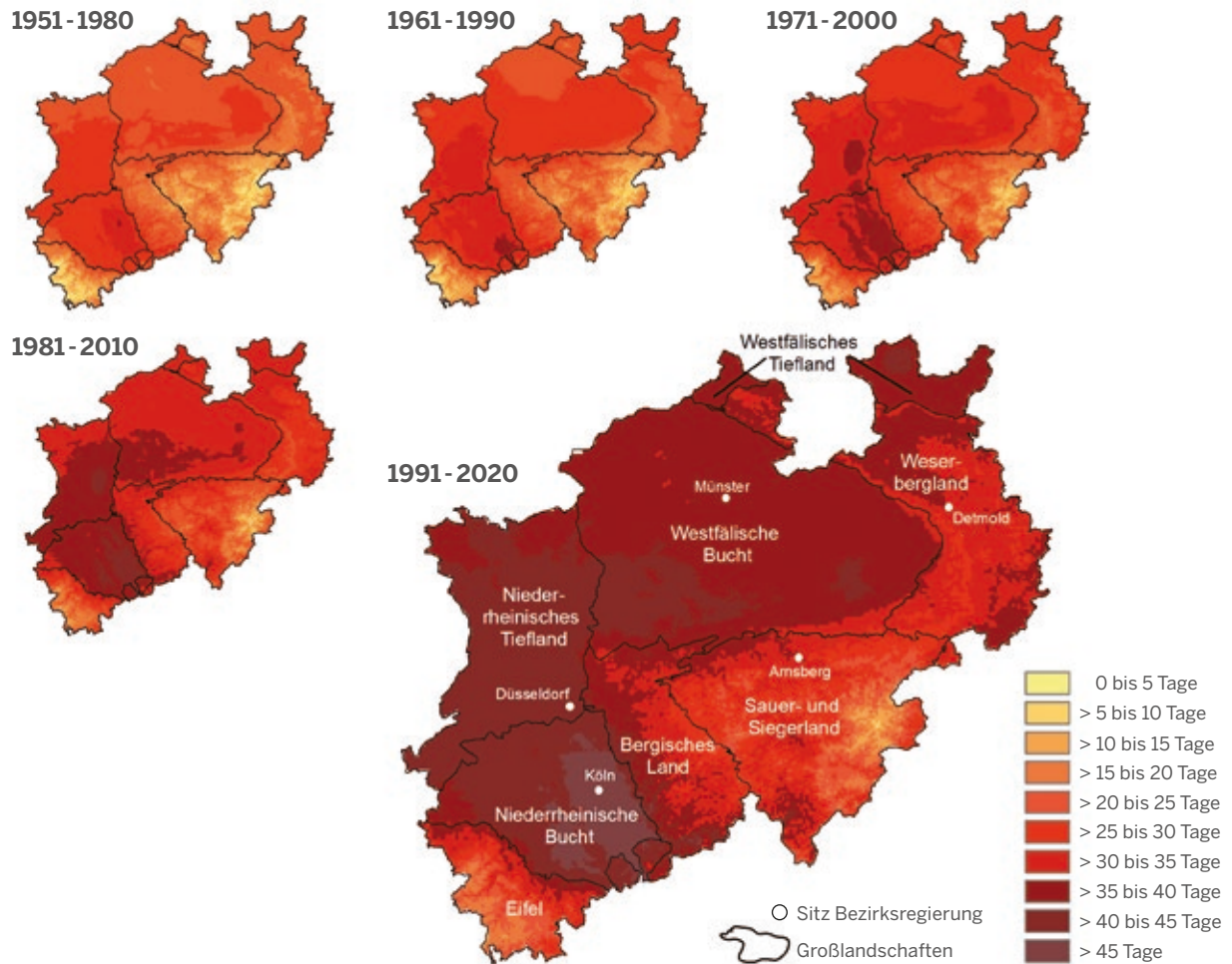


Abb. 19: Karten der Anzahl der Sommertage in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Datengrundlage: DWD)





2. Niederschlag

Die Niederschlagsentwicklung ist im Gegensatz zur Entwicklung der Lufttemperatur deutlich variabler und uneindeutiger. Insgesamt kann eine wärmere Atmosphäre mehr Wasser aufnehmen. Anhand der Clausius-Clapeyron-Gleichung kann je 1 Grad (oder Kelvin) Temperaturanstieg 7% mehr Wasserdampf aufgenommen werden (IPCC 2007). Demnach steht aufgrund der globalen Erwärmung insgesamt auch mehr Wasser für Niederschläge zur Verfügung als je zuvor in der jüngeren Klimageschichte.

Zwar sind entlang der gesamten Zeitreihe seit 1881 die mittleren jährlichen Niederschlagssummen angestiegen, aber in den letzten zehn Jahren gibt es einen deutlichen Trend zu trockeneren Jahren. Hier kommen zusätzliche Faktoren ins Spiel, die sich auf die Niederschlagsverteilung auswirken. Die Abschwächung des jet streams (Coumou et al. 2018) sorgt für länger anhaltende Trocken- oder Regenperioden, weil Hoch- und Tiefdruckgebiete langsamer ziehen oder sogar Tage bis Wochen an Ort und Stelle verharren.

Wenn es regnet, regnet es auch stärker als früher. Dies wurde durch die ExUS 2020 Studie bestätigt (Indikator 2.4 „Niederschlagsextreme“). Bei zahlreichen Niederschlagsparametern gibt es deutliche Veränderungen, die sich mit dem anthropogenen Klimawandel erklären lassen können, wenn auch nicht so unmittelbar, wie bei der Lufttemperatur.



Indikatoren-Kernaussagen:

- Die Niederschlagssumme schwankt deutlich von Jahr zu Jahr.
- Über den Gesamtmesszeitraum 1881 - 2020 fand eine Zunahme der Jahresniederschläge statt; werden nur die vergangenen 30 Jahre (1991 - 2020) betrachtet, kam es zu einem Rückgang der Jahresniederschläge.
- Die Winterniederschläge haben über den Gesamtzeitraum zugenommen. Bei allen anderen Jahreszeiten sind die Veränderungen nicht signifikant nachweisbar.
- Niederschlagsextreme nehmen seit den 1960ern zu.
- Die Schneetage zeigen einen deutlichen Rückgang seit den 1950er-Jahren.



Tab. 4: Übersicht der Indikatoren zum Abschnitt 2 „Niederschlag“

Indikator		Einheit	räumliche Einheit	Zeitreihe	Mittelwert Zeitreihe	Trend Zeitreihe	Änderung Zeitreihe	
2.1 Durchschnittliche Jahresniederschlagssumme	Jahr	mm	NRW	1881 - 2020	845	↗	+ 83	
		mm	NRW	1991 - 2020	870	↘	- 173	
2.2 Durchschnittliche Jahreszeiten-niederschlagssumme	Frühling	mm	NRW	1881 - 2020	179	~	-	
	Sommer	mm	NRW	1881 - 2020	242	~	-	
	Herbst	mm	NRW	1881 - 2020	209	~	-	
	Winter	mm	NRW	1882 - 2020	215	↗	+ 55	
2.3 Starkniederschlags(kenn)tage	> 10 mm	Tage	NRW	1951 - 2020	24,0	~	-	
	> 20 mm	Tage	NRW	1951 - 2020	5,3	~	-	
	> 30 mm	Tage	NRW	1951 - 2020	1,4	~	-	
2.4 Niederschlagsextreme	Ereignisse		NRW	1961 - 2018	2,7	↗	+ 1,1	
2.5 Überschreitungsstunden Starkregenwarnstufe ≥ 3	Stunden		NRW	2001 - 2020	0,6	~	-	
2.6 Trockentage	Tage	Altenberge	1931 - 2020	188	~	-		
	Tage	Hamminkeln	1931 - 2020	194	↘	- 15		
	Tage	Jülich	1931 - 2020	198	↻	- 30		
	Tage	Köln-Bonn	1931 - 2020	190	↻	- 9		
	Tage	Medebach-Berge	1931 - 2020	190	↻	- 28		
	Tage	Schallenberg Sellinghausen	1931 - 2020	167	↻	- 8		
	Tage	Wermelskirchen	1896 - 2020	172	~	-		
	Tage	Westernkappeln	1892 - 2020	192	↘	- 30		
	max. Andauer aufeinander folgender Trockentage	Westernkappeln	1892 - 2020	16,7	~	-		
2.7 Schneetage	Tage	Kahler Asten	1955 - 2020	87	↘	- 35		

- ↗ steigender Trend
 ↘ fallender Trend
 ↻ Trend mit Trendumkehr: zuerst fallend, dann steigend
 ↻ Trend mit Trendumkehr: zuerst steigend, dann fallend
 ~ kein Trend

- ↗ ↘ ↻ ↻ günstige Entwicklung
 ↘ ↘ ↻ ↻ ungünstige Entwicklung
 ↗ ↘ ↻ ↻ keine Bewertung der Entwicklung möglich oder gleichzeitig günstige und ungünstige Entwicklungsaspekte vorhanden

Mittelwert der Klimanormalperioden													Auswirkungen auf Handlungsfelder
	1881-1910	1891-1920	1901-1930	1911-1940	1921-1950	1931-1960	1941-1970	1951-1980	1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2020	
	808	815	832	826	831	838	869	857	875	873	918	870	alle
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	870	
	172	176	176	173	174	171	182	186	205	197	203	177	alle
	249	243	239	231	233	247	262	258	241	229	238	238	
	196	189	210	213	217	208	205	201	208	221	235	219	
	190	205	210	207	206	210	223	212	223	226	242	237	
	-	-	-	-	-	-	-	23,3	23,8	24,1	25,9	24,3	alle
	-	-	-	-	-	-	-	4,9	5,1	5,3	6,0	5,4	
	-	-	-	-	-	-	-	1,3	1,3	1,4	1,6	1,5	
	-	-	-	-	-	-	-	-	2,3	2,3	2,8	3,0	alle
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	alle
	-	-	-	-	-	187	186	191	191	189	182	186	alle
	-	-	-	-	-	202	198	195	190	190	187	190	
	-	-	-	-	-	216	203	193	187	188	187	193	
	-	-	-	-	-	197	188	186	184	187	187	190	
	-	-	-	-	-	206	191	185	180	-	-	-	
	-	-	-	-	-	175	164	161	160	164	164	169	
	-	-	176	178	185	185	175	166	160	163	165	170	
	-	193	197	210	218	214	193	183	178	180	178	181	
	-	17,0	17,6	17,4	17,4	16,5	16,3	16,2	16,2	16,0	15,8	16,5	
	-	-	-	-	-	-	-	-	100	89	85	74	alle



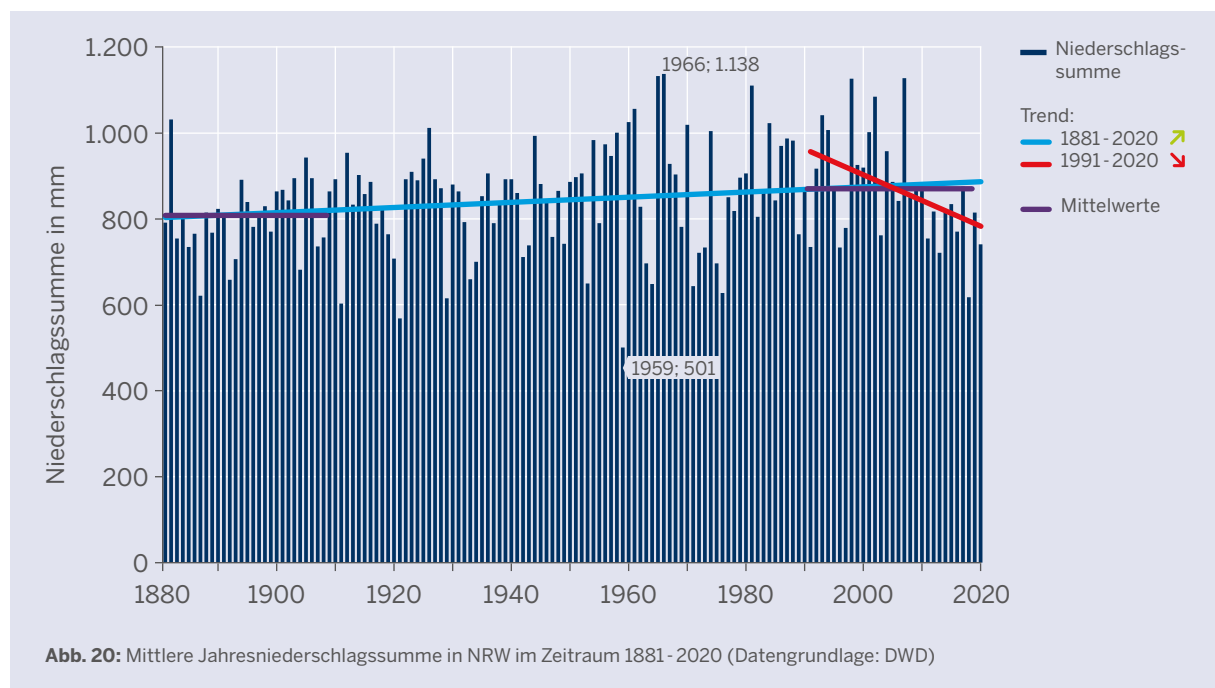
2.1 Durchschnittliche Jahresniederschlagssumme



Niederschläge sind sehr variabel

Der Klimawandel wirkt sich deutlich auf das globale Niederschlagsgeschehen aus. Allerdings ist hier der Zusammenhang komplexer als beim Temperaturanstieg. Wärmere Luft kann mehr Wasserdampf aufnehmen, sodass potenziell mehr Niederschlag

möglich ist. Häufiger werdende, langanhaltende Schönwetter-Episoden wirken dieser Entwicklung jedoch entgegen (vgl. Wetterextreme, Seite 32). Somit sind die Veränderungen des Niederschlags in NRW nicht so eindeutig wie bei der Lufttemperatur.



Seit Messbeginn 1881 hat in NRW die durchschnittliche Jahresniederschlagssumme zugenommen. Dies belegen sowohl die Veränderungen der gleitenden Mittelwerte über die 30-jährigen Klimanormalperioden (Tabelle 4) als auch der signifikante Trend über die Gesamtzeitreihe (Abbildung 20). Abbildung 20 zeigt

aber auch, dass es starke Schwankungen der Niederschlagssumme von Jahr zu Jahr gibt. Dies wird auch in Abbildung 21 deutlich, den „Niederschlags-Streifen“ für NRW, die analog zu den warming stripes umgesetzt wurden (Indikator 1.1 „Durchschnittliche Jahreslufttemperatur“). Hierbei werden Jahre mit sehr geringen

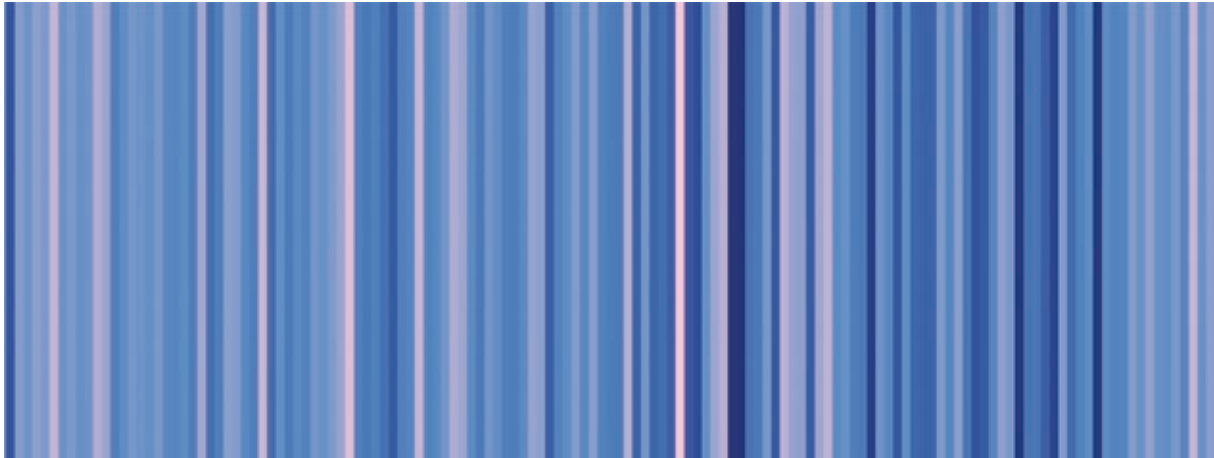


Abb. 21: „Niederschlags-Streifen“ für NRW für den Zeitraum 1881 - 2020 (Datengrundlage: DWD). Die Niederschlagssumme bewegt sich in NRW zwischen 501 mm im Jahr 1959 (hellrosa) bis zu 1.138 mm im Jahr 1966 (dunkelblau) (vgl. Abbildung 20).

Niederschlagssummen hellrosa dargestellt, über hell- und mittelblau geht es dann zu den niederschlagsreichsten Jahren in dunkelblau. Die Abbildung zeigt, dass es überwiegend mittel- und hellblaue Balken gibt, unterbrochen von einzelnen rosa und dunkelblauen Balken. Etwas nach der Mitte der Zeitreihe sind innerhalb einer kurzen Zeitspanne die Jahre mit dem höchsten und niedrigsten Jahresniederschlag der Zeitreihe zu finden.

Bei der Betrachtung nur einzelner Episoden der Niederschlagsreihe kann es teilweise zur Häufung niederschlagsarmer bzw. -reicher Jahre kommen. Dies

kann soweit führen, dass über bestimmte Zeiträume auch eine Niederschlagsabnahme festzustellen ist. Dies ist beispielsweise bei der Betrachtung der vergangenen 30 Jahre (1991 - 2020) der Fall und lässt sich statistisch signifikant nachweisen (Abbildung 20). Die 1990er- und 2000er-Jahre zu Beginn der Betrachtung waren eher niederschlagsreiche Jahre, die vergangenen Jahre hingegen durch geringe Niederschläge geprägt, wodurch sich die Trendverhältnisse in diesem Zeitraum im Vergleich zum gesamten Zeitraum umgekehrt haben. Einzelne Jahre können darüber hinaus durch ein über- oder unterdurchschnittliches Niederschlagsgeschehen in den Jahreszeiten geprägt sein (Indikator 2.2 „Durchschnittliche Jahreszeitenniederschlagssumme“).



Abbildung 22 zeigt, dass die räumliche Verteilung der Niederschläge, wie auch die der Lufttemperatur, stark an die Topographie gekoppelt ist. Insgesamt verzeichnen Bereiche mit höheren Geländehöhen eine größere Niederschlagssumme als die Tieflagen. Die niedrigsten Jahresniederschlagssummen werden in der Niederrheinischen Bucht und im Regenschatten der Eifel registriert. Die höchsten Jahresniederschläge fallen an den Staulagen der Mittelgebirge, insbesondere im Bergischen Land.

Die Niederschlagskarten in Abbildung 22 zeigen weiterhin, wie sich das Niederschlagsgeschehen in NRW seit 1881 verändert hat. Es ist im Verlauf ein leichter Bruch zu erkennen: die Klimanormalperioden 1881 - 1910 bis 1931 - 1960 liegen auf einem leicht niedrigeren Niederschlagsniveau als die nachfolgenden Klimanormalperioden von 1941 - 1970 bis 1991 - 2020 (Tabelle 4).

Mittlere Jahresniederschlagssumme

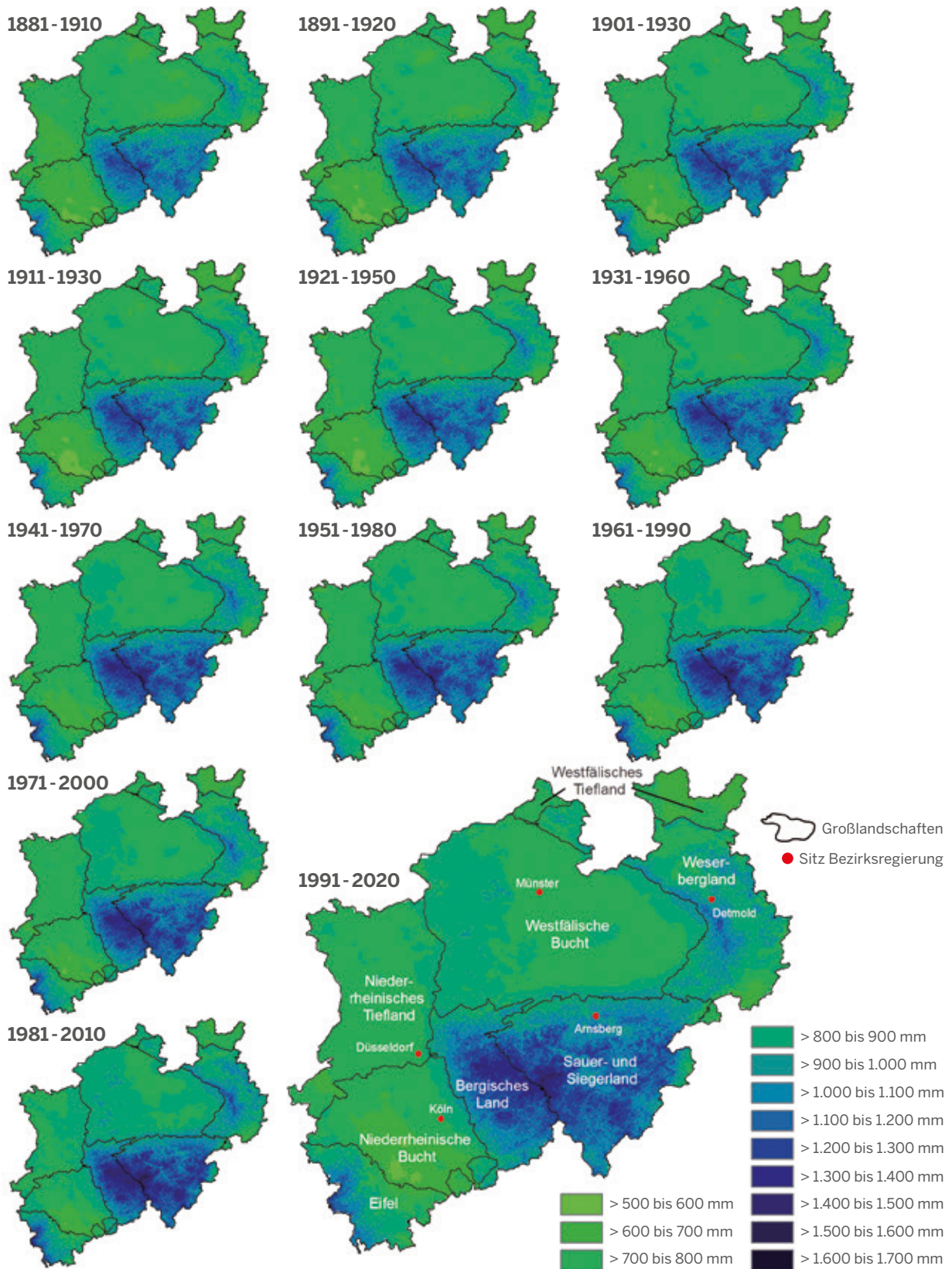


Abb. 22: Karten der mittleren Jahresniederschlagssumme in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Datengrundlage: DWD)



2.2 Durchschnittliche Jahreszeiteinniederschlagssumme



Die Winterniederschläge nehmen zu

Ähnlich wie bei den mittleren jährlichen Niederschlagssummen verhalten sich die mittleren saisonalen Niederschlagssummen sehr variabel und weniger klar im Trend wie die Lufttemperatur. Die zuletzt deutlich schneller steigenden Temperaturen

in allen Jahreszeiten bei sich ändernden saisonalen Niederschlagssummen führen zu neuen Rahmenbedingungen, auf die sich die Gesellschaft und vor allem die Natur einstellen muss.

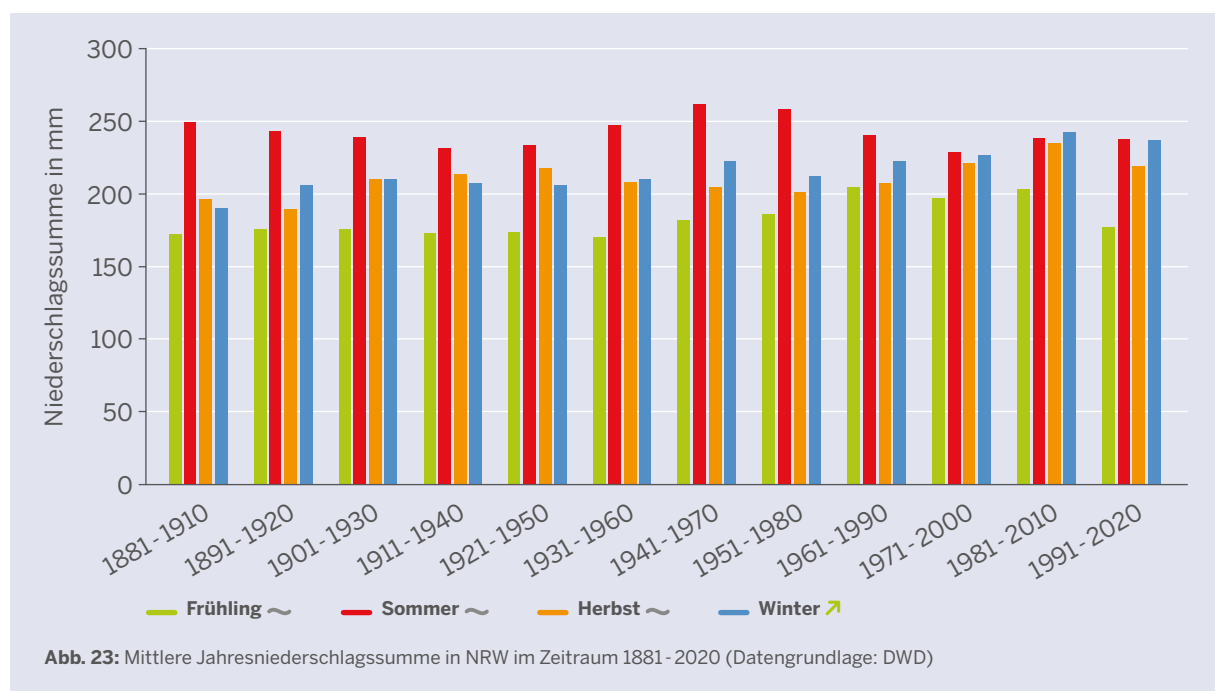


Abbildung 23 zeigt, dass noch zu Beginn der Messreihe, also im Zeitraum 1881-1910, ein deutliches Niederschlagsmaximum im Sommer existierte. Ab etwa dem Zeitraum 1961-1990 nähern sich die Niederschlagssummen von Sommer, Herbst und Winter aneinander an.

Der Frühling bleibt jedoch deutlich zurück gegenüber den anderen Jahreszeiten. In Kombination mit den deutlich gestiegenen Temperaturen wird es voraussichtlich zu mehr Trockenstress für Pflanzen kommen. Das zeigt auch der Indikator 4.3 „Klimatische Wasserbilanz“.



Die Niederschlagsänderung ist jedoch nur im Winter statistisch signifikant nachweisbar und zeigt eine Zunahme. Die Sommerniederschläge schwanken stark im Verlauf der Zeitreihe.

Die räumliche Verteilung der Niederschläge in NRW ähnelt in allen Jahreszeiten jener der Jahresniederschlagssumme (vgl. Abbildung 24 bis Abbildung 27). Im Frühjahr und Herbst sind auch in der Kartendarstellung die Niederschläge in allen Zeiträumen vergleichbar. Der Sommer zeigt leicht höhere Niederschläge in den Zeiträumen von 1931 - 1960 bis 1951 - 1980 im Vergleich zu den restlichen Klimanormalperioden, wo-

bei sich an der räumlichen Verteilung nicht viel ändert. Beim Winter ist der Anstieg der Niederschläge über alle Klimanormalperioden hinweg zu sehen, der vor allem in den Bereichen mit hohen Niederschlägen, wie den Großlandschaften Eifel, Bergisches Land, Sauer- und Siegerland, deutlich wird.

Mittlere Niederschlagssumme – Frühling

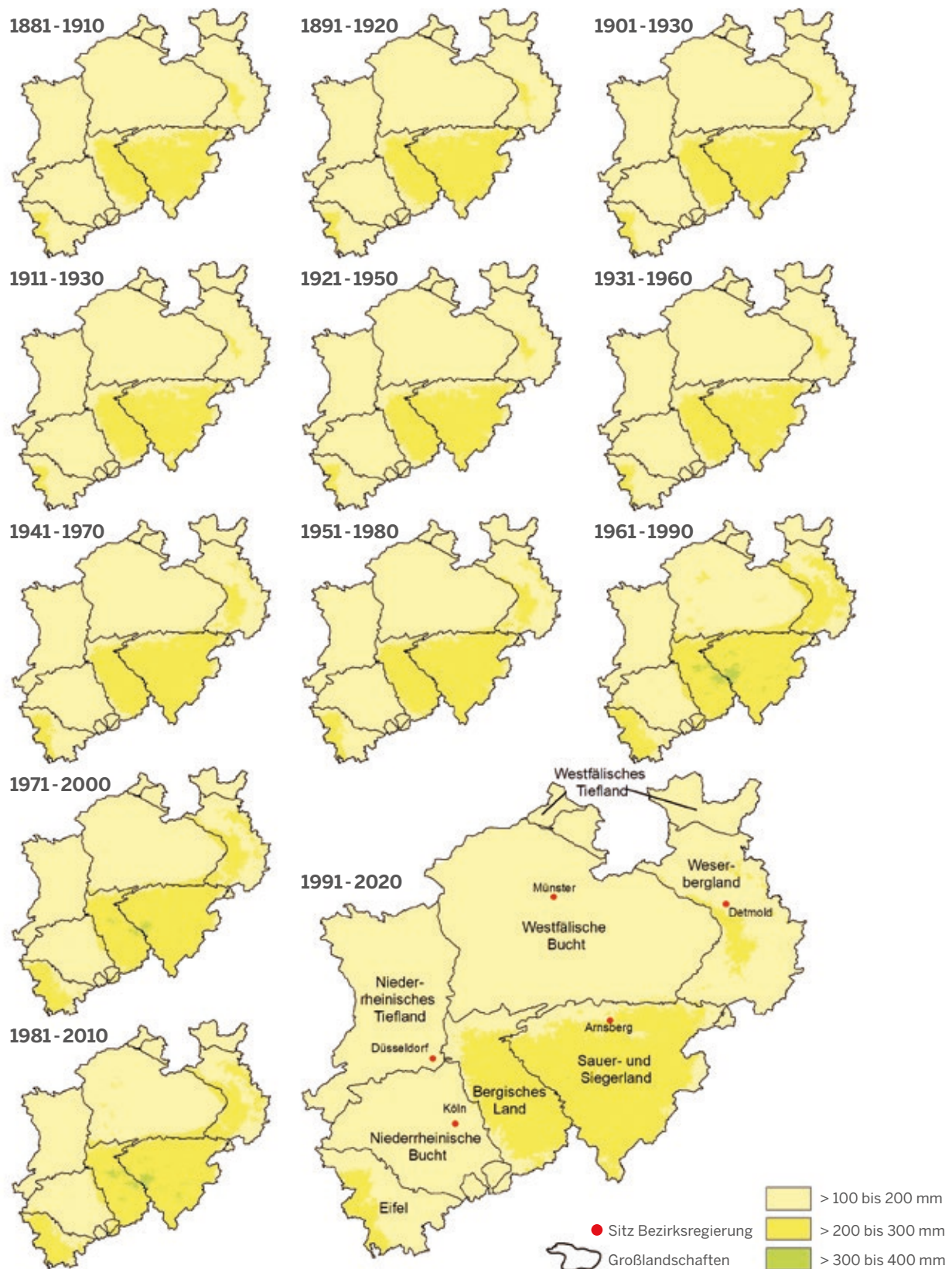


Abb. 24: Karten der mittleren Niederschlagssumme im Frühling in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Datengrundlage: DWD)

Mittlere Niederschlagssumme – Sommer

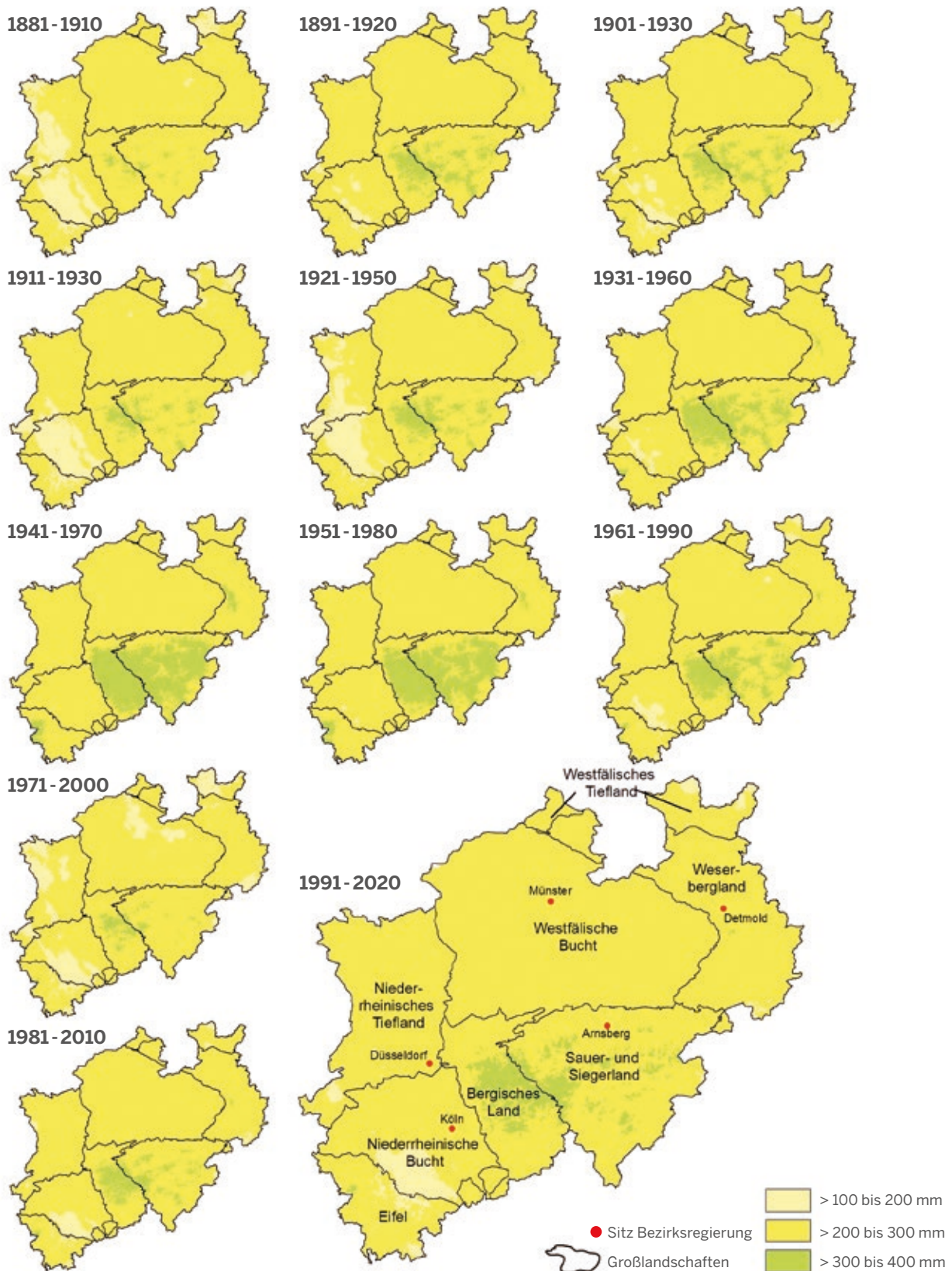


Abb. 25: Karten der mittleren Niederschlagssumme im Sommer in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Datengrundlage: DWD)

Mittlere Niederschlagssumme – Herbst

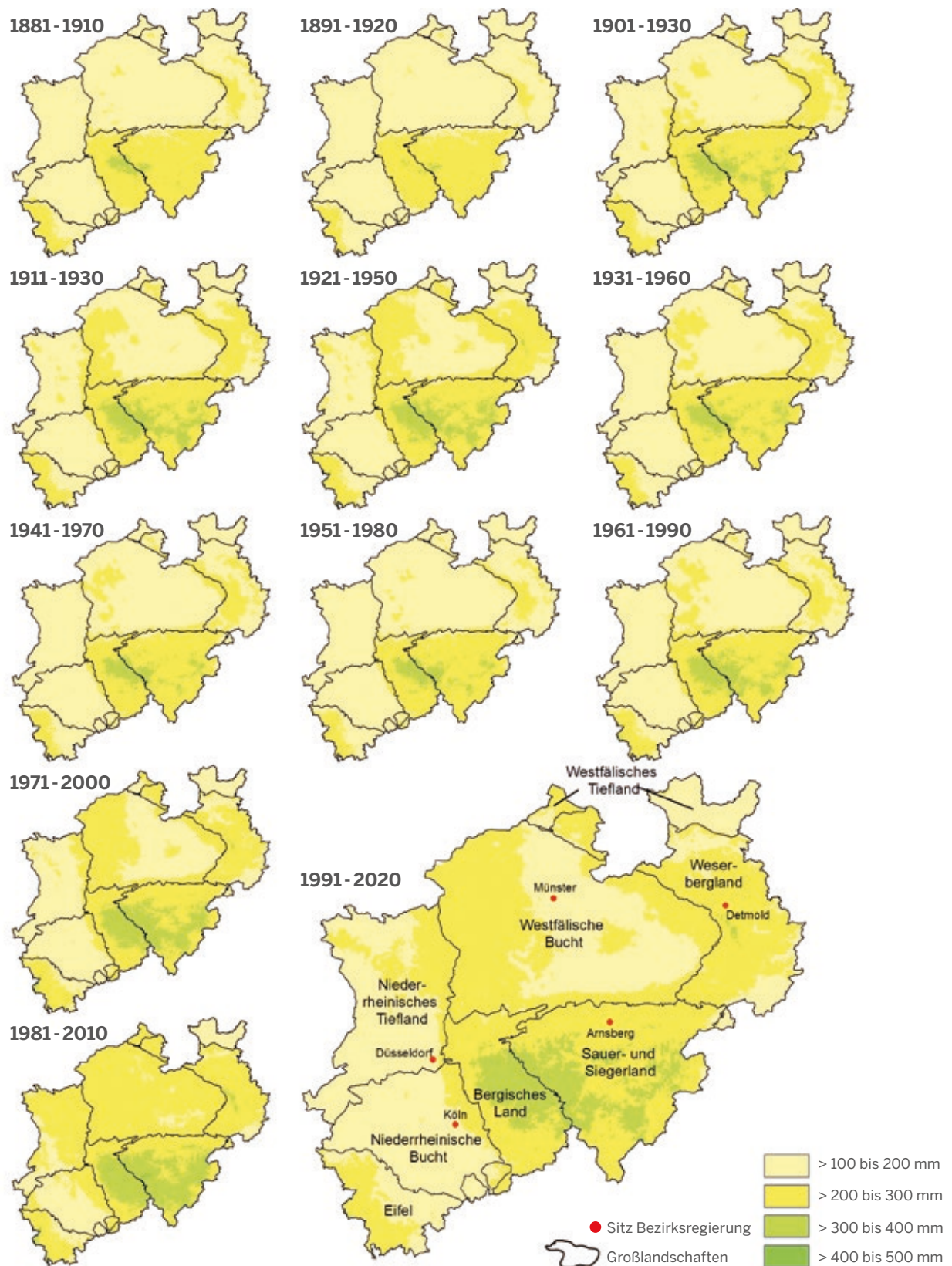


Abb. 26: Karten der mittleren Niederschlagssumme im Herbst in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Datengrundlage: DWD)

Mittlere Niederschlagssumme – Winter

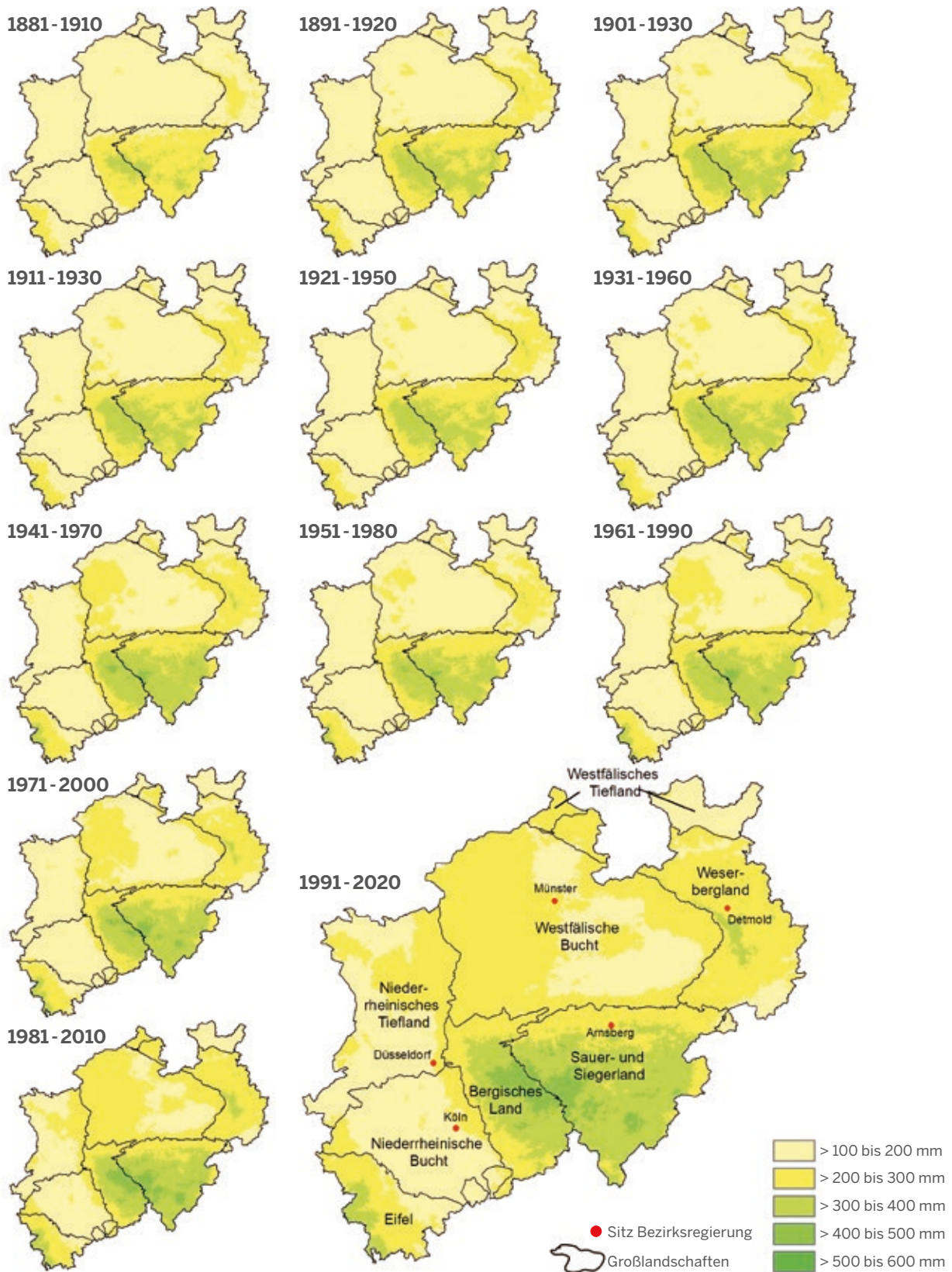


Abb. 27: Karten der mittleren Niederschlagssumme im Winter in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Datengrundlage: DWD)



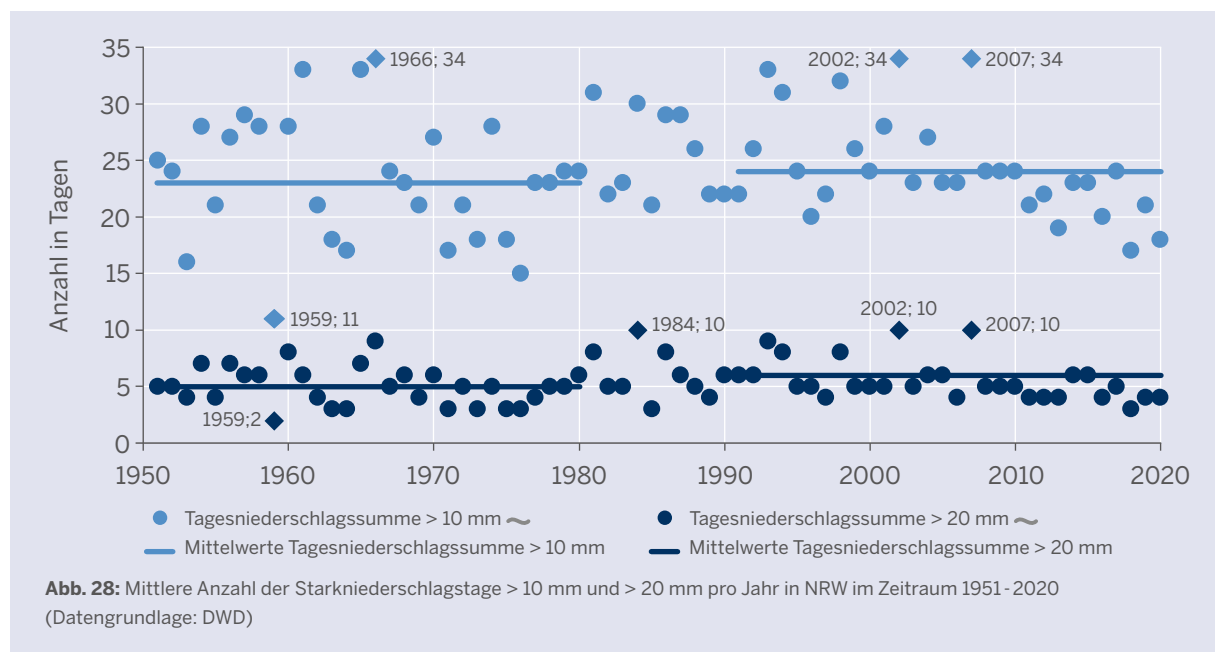
2.3 Starkniederschlags(kenn)tage



Bisher kein eindeutiger Trend bei den Starkniederschlagstagen

Durch die deutlich gestiegenen Temperaturen kann die Atmosphäre mehr Wasserdampf aufnehmen, welcher dann für insgesamt höhere und stärkere Niederschlagsmengen zur Verfügung steht. Wo diese Niederschläge fallen wird durch die Zugbahnen von Hoch- und Tiefdruckgebieten bestimmt, die

sich durch den anthropogen Klimawandel deutlich verändern. So können sich Hochdruckgebiete mit trockenen Wetterphasen ebenso dauerhaft festsetzen wie Wetterphasen mit vielen und langanhaltenden Starkregenepisoden.



Analog zu den Temperaturkennzahlen werden verschiedene Niederschlagskennzahlen definiert. Die Starkniederschlagstage beschreiben Tage, an welchen die Tagesniederschlagssumme den Wert von 10 mm bzw. 20 mm überschreitet. Obwohl sich die Anzahl der Starkniederschlagstage im Mittel für NRW im Vergleich der Zeiträume 1951-1980 und 1991-2020 leicht erhöht hat (Abbildung 28), ist dieser Anstieg statistisch nicht signifikant nachweisbar. Dies hängt zum einen damit zusammen, dass Starkniederschläge lokal stark begrenzt

auftreten, sodass eine Mittelung über die Landesfläche die Aussagekraft einschränkt. Zum anderen sind die Tagesniederschlagsschwellen von 10 mm und 20 mm relativ niedrig gewählt (zum Vergleich: beim Starkniederschlagsereignis in Münster 2014 wurden 292 mm Niederschlag in sieben Stunden gemessen). An dieser Stelle sei bereits auf den Indikator 2.4 „Niederschlags-extreme“ verwiesen, der die Niederschläge der Dauerstufe 60 Minuten stationsbasiert auf Extremereignisse untersucht und hier deutlichere Aussagen liefern kann.

Einzelne Jahre mit insgesamt sehr niedrigen Jahresniederschlagssummen, wie zum Beispiel 1959, oder sehr hohen Niederschlägen, wie zum Beispiel 1966 und 2007 (Abbildung 20), zeigen sich bei den Starkniederschlagstagen ebenfalls als Jahre mit Maxima oder Minima (Abbildung 28).

Auffällig ist, dass in den vergangenen zehn Jahren scheinbar ein Plateau erreicht wurde, wobei bei den Starkniederschlagskenntagen über 10 mm Tagesniederschlag die Marke von 25 Tagen nicht mehr überschritten

wird. Es bleibt abzuwarten, ob sich dieses Niveau halten wird, weiter absinkt oder auch wieder höhere Werte auftreten werden.

Bei den hier gewählten, recht niedrig angesetzten Grenzwerten für die Dauerstufe 24 Stunden ergibt sich eine ähnliche räumliche Verteilung der Starkniederschlagstage wie bei der Jahres- oder Jahreszeitsumme (Abbildung 29 und Abbildung 30), mit hohen Werten in der Eifel, dem Bergischen Land und dem Sauer- und Siegerland.

Starkniederschlagstage >10 mm Niederschlag pro Tag

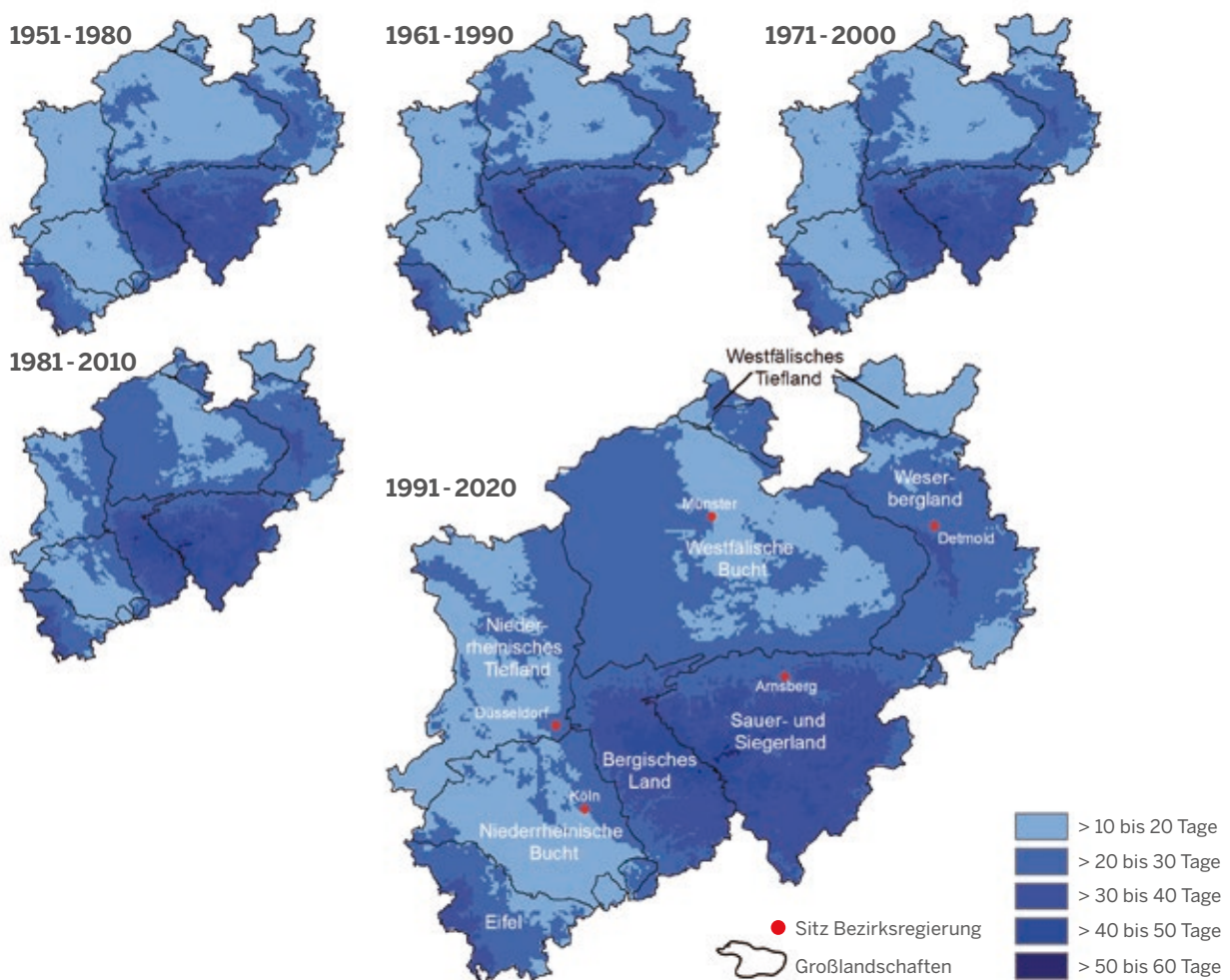


Abb. 29: Karten der Anzahl der Starkniederschlagstage >10 mm in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Datengrundlage: DWD)



Starkniederschlagstage >20 mm Niederschlag pro Tag

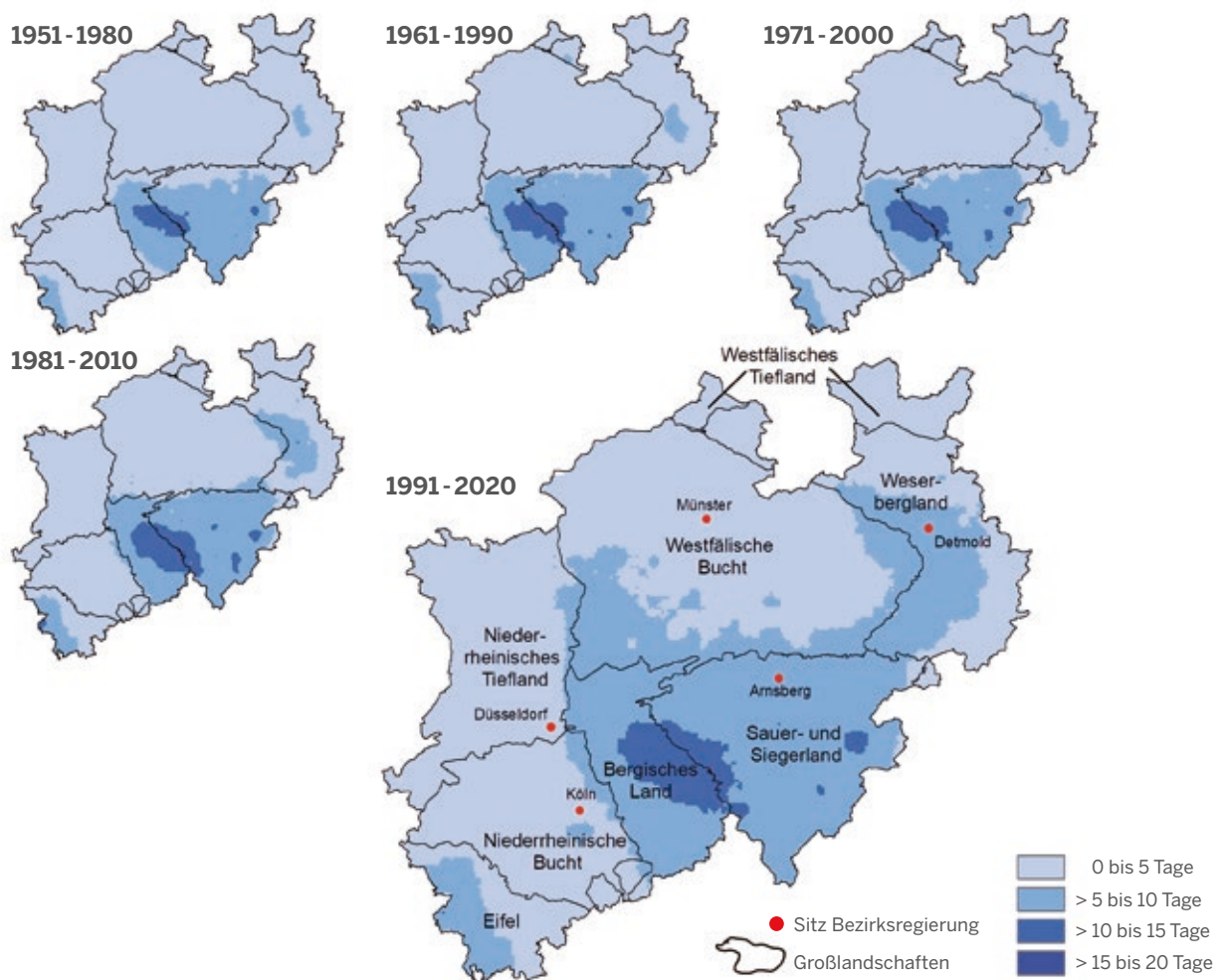


Abb. 30: Karten der Anzahl der Starkniederschlagstage >20 mm in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Datengrundlage: DWD)



2.4 Niederschlagsextreme



Extremniederschläge nehmen statistisch signifikant zu

Starkregenfälle können zu ganz erheblichen Überschwemmungen und Schäden führen. Dies gilt zum Beispiel für landwirtschaftliche Flächen, wo ganze Jahresernten durch Überflutungen vernichtet werden können.

Ebenfalls hoch ist das Gefahrenpotenzial im städtischen Raum, wo Infrastrukturen und das persönliche Hab und Gut beschädigt oder zerstört werden können.

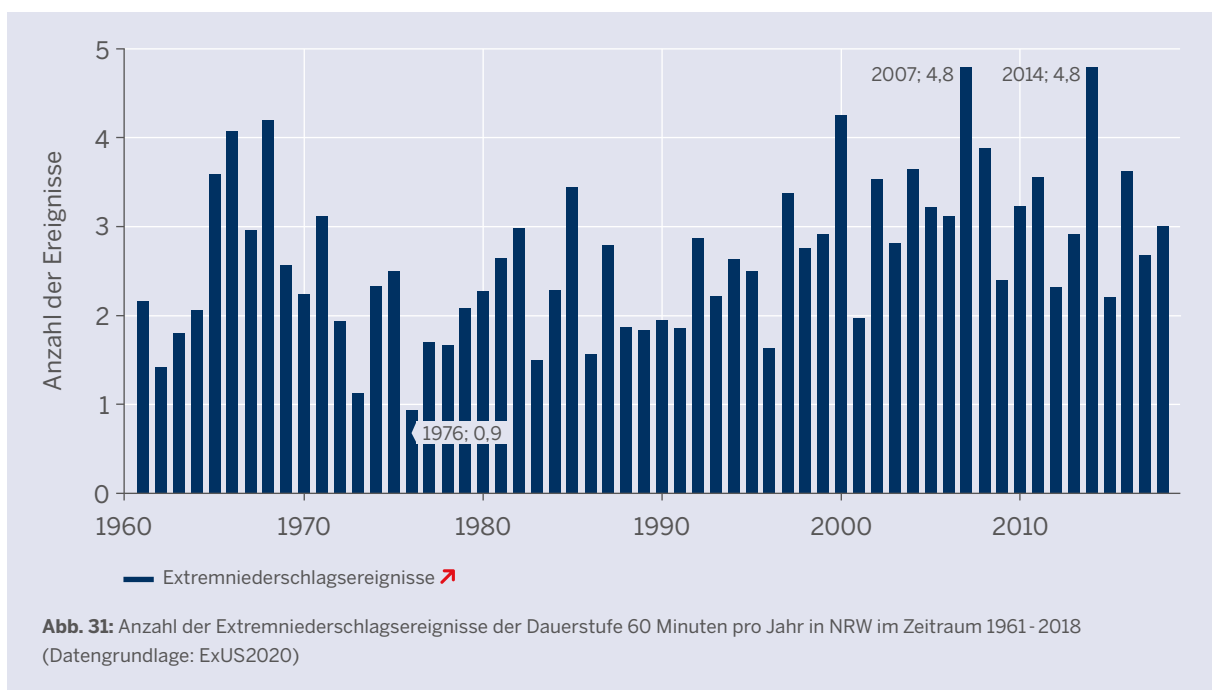


Abbildung 31 stellt die Anzahl der Extremniederschlagsereignisse der Dauerstufe 60 Minuten dar. Hier liegen die Niederschlagssummen für ein Ereignis dieser Dauer an verschiedenen Stationen zwischen 8,2 und 12,2 mm. Dies macht sehr deutlich, dass diese Ereignisse deutlich gravierender sein können als es die Starkniederschlags-tage im Indikator 2.3 „Starkniederschlags(kenn)tage“ zeigen. Insgesamt hat die Anzahl der Extremereignisse über den Gesamtmeszeitraum in NRW statistisch signifikant zugenommen. Einzelne Jahre mit einer ge-

ringen Anzahl an Extremniederschlagsereignissen, wie 1976, stehen Jahren mit vielen Ereignissen, wie 2007 oder 2014 gegenüber. Auswertungen für weitere Dauerstufen sind im Projekt ExUS 2020 erfolgt. Dort hat sich gezeigt, dass die Extremniederschlagsereignisse insbesondere für kurze Dauerstufen bis vier Stunden zunehmen, wohingegen längere Dauerstufen keinen eindeutigen Trend zeigen (LANUV o.J.), wie es auch hier beim Vergleich der Indikatoren 2.3 „Starkniederschlags(kenn)tage“ und 2.4 „Niederschlagsextreme“ zu sehen ist.



2.5 Überschreitungsstunden

Starkregenwarnstufe ≥ 3



Extreme Starkregen können überall auftreten

Zusätzlich zu den auf tatsächlichen Regenmesswerten beruhenden Starkniederschlagsserien von Indikator 2.4 bieten auch statistische Auswertungen von Regenradardaten eine gute Möglichkeit, Veränderungen des Starkniederschlagsgeschehens zu

erfassen. Mit den flächenhaft vorliegenden Daten zur Andauerzeit von Starkregen entsprechend der Warnstufe 3 und höher aus dem „Starkregenatlas“ (GDV 2018) können Zeitreihen für NRW erstellt werden.



Starkregen der Warnstufe 3 und höher übersteigen die Werte bis zu denen beim Indikator 2.4 „Niederschlags-extreme“ ein Extremniederschlagsereignis gezählt wird. Die Warnstufe 3 entspricht einem Stundenniederschlag von mindestens 25 l/m² oder einer Niederschlags-summe von mindestens 35 l/m² verteilt über sechs Stunden. Somit muss mit entsprechenden Folgen, beginnend bei Sichteinschränkung im Straßenverkehr bis hin zu Überflutungen von Senken und ganzen Stra-ßenzügen inklusive Kellergeschossen etc. gerechnet

werden. Dementsprechend wird vom Deutschen Wet-terdienst für solche Situationen eine Starkregenwar-nung ausgesprochen (Indikator 10.1 „Unwetterwarnun-gen“).

Der Verlauf der Zeitreihe der Starkregenstunden-summen ähnelt dem der Extremniederschlagsereignisse (Abbildung 32 und 31). Auch hier tritt das Jahr 2007 mit der höchsten Anzahl an Starkregenstundensummen in der Zeitreihe hervor. Ein signifikanter Trend liegt nicht vor.



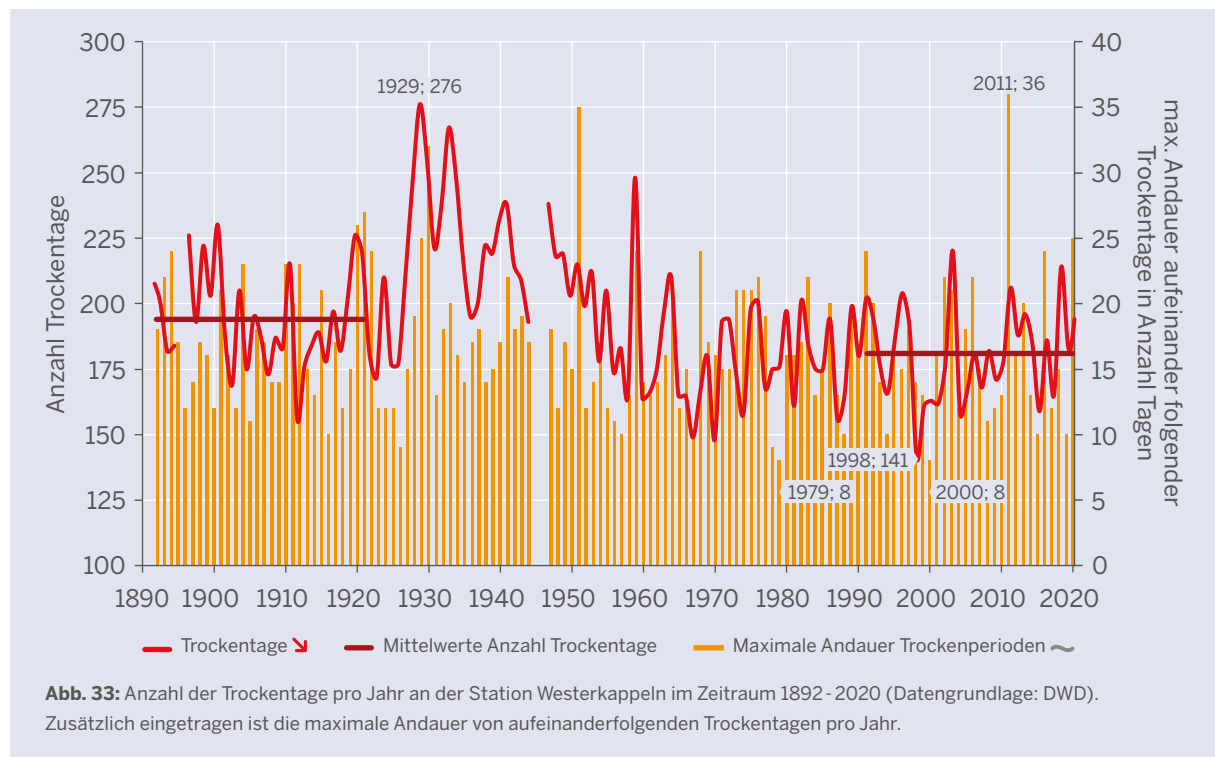
2.6 Trockentage



Trockentage werden weniger

Neben den Extremniederschlägen ist es auch wichtig zu beobachten, ob Zeiten mit Trockenheit zunehmen. Trockentage sind Tage, an welchen die Tagesniederschlagssumme den Wert von 0,1 mm nicht

übersteigt. Insbesondere während der Vegetationszeit haben ausbleibende Niederschläge deutliche Folgen für das Pflanzenwachstum, sowohl in der Natur als auch auf den landwirtschaftlichen Flächen.





In Abbildung 33 ist die Anzahl der Trockentage, also der Tage ohne Niederschlag, an der Station Westerkappeln im Tecklenburger Land dargestellt. An dieser Station gab es zwischen 1920 und 1960 eine Episode mit sehr vielen Trockentagen, davor und danach liegt die Anzahl der Trockentage deutlich darunter (Tabelle 4). Dennoch ist insgesamt ein Rückgang der Trockentage über den Gesamtzeitraum oder im Vergleich der Zeiträume 1892-1920 und 1991-2020 festzustellen. Diese Beobachtung passt mit dem allgemeinen Anstieg der mittleren jährlichen Niederschlagssumme (Indikator 2.1 „Durchschnittliche Jahresniederschlagssumme“) gut zusammen. Diesen Rückgang zeigen weitere Stationen, die nach derselben Methodik für Trockentage ausgewertet wurden (Tabelle 4).



Neben dem Rückgang der Anzahl der Trockentage insgesamt muss auch das Auftreten der Trockentage im Jahresverlauf und die Andauer der Trockentage im Jahr betrachtet werden, um die Auswirkungen auf Natur und Landschaft besser abschätzen zu können.

An der Station Westerkappeln nimmt die Anzahl der Trockentage in allen Jahreszeiten statistisch nachweisbar ab (nicht dargestellt). Die maximale Andauer der aufeinanderfolgenden Trockentage hat sich an dieser Station über den Gesamtzeitraum nicht signifikant verändert (Abbildung 33). Da sich jedoch die Temperaturverhältnisse verändert haben und die Temperaturen in allen Jahreszeiten höher liegen, muss trotz des Rückgangs der Trockentage insgesamt mit negativen Folgen für Umwelt und Landschaft beim Auftreten langandauernder Trockenperioden gerechnet werden. Die längste Trockenperiode an der Station Westerkappeln trat mit 36 aufeinanderfolgenden Tagen im Herbst 2011 auf.



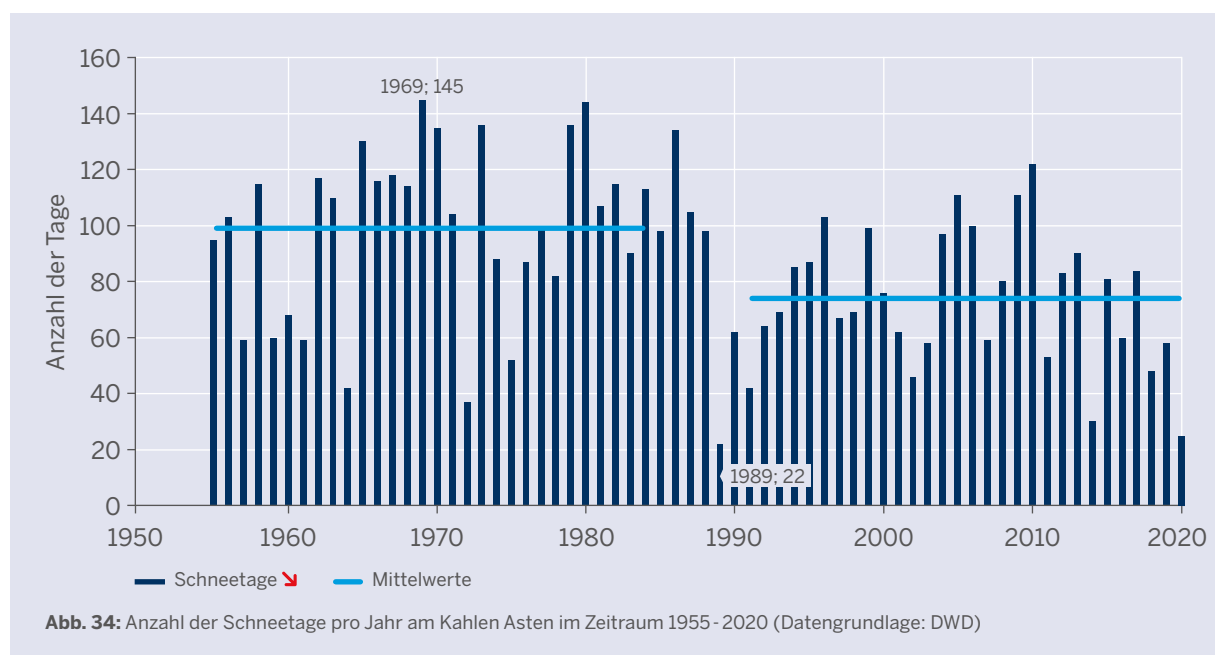
2.7 Schneetage



Weniger Schneetage am Kahlen Asten

Das Vorhandensein einer geschlossenen Schneedecke beziehungsweise das Fehlen einer geschlossenen Schneedecke bietet als Zeitreihe eine sehr gute Möglichkeit, Klimaveränderungen darzustellen. Eine immer weniger häufig vorhandene Schneedecke führt unter anderem dazu, dass Wildschweine in immer höhere Lagen vordringen und sich immer besser vermehren können (Indikator 6.8 „Jagdstre-

cke Schwarzwild“). Auch für den Tagestourismus im Winter, aber vor allem für die Wintersportorte im Sauerland (Indikatoren 19.1. „Schneedecke für den Wintersport“ und 19.2 „Übernachtungen in Wintersportorten“) werden sich durch die anthropogene Erderwärmung bzw. -erhitzung Auswirkungen ergeben.



Die Anzahl der Schneetage (Tage mit einer Schneehöhe von 10 cm oder mehr) am Kahlen Asten ist über die Gesamtmesszeitreihe gesehen deutlich zurückgegangen. Dies zeigen die Mittelwerte 1955 - 1984 und 1991 - 2020 im Vergleich (Abbildung 34). Die Abnahme ist statistisch signifikant nachweisbar. Ähnlich den Jahresnie-

derschlagssummen gibt es eine hohe Schwankungsbreite der Schneetage von Jahr zu Jahr. Das absolute Minimum der Zeitreihe im Jahr 1989 stellt einen Bruch in der Zeitreihe mit einer deutlichen Reduktion der Schneetage nach diesem Zeitpunkt dar.

Abbildung 35 stellt flächendeckend die Anzahl der Schneedeckentage dar, die bereits ab einem Zentimeter Schneehöhe erfasst werden, also einen anderen Kennwert darstellen als der Parameter Schneetage am Kahlen Asten in Abbildung 34. In den wärmebegünstigten Großlandschaften Niederrheinische Bucht und Niederrheinisches Tiefland treten über alle Klimanormalperioden hinweg betrachtet nur sehr wenige

Schneedeckentage im Jahr auf, sodass sich hieran keine Veränderung zeigt.

In den Mittelgebirgsbereichen hingegen ist im Vergleich der Zeiträume 1951-1980 und 1991-2020 ein deutlicher Rückgang von meist mehr als 20 Tagen im Jahr zu beobachten.

Schneedeckentage

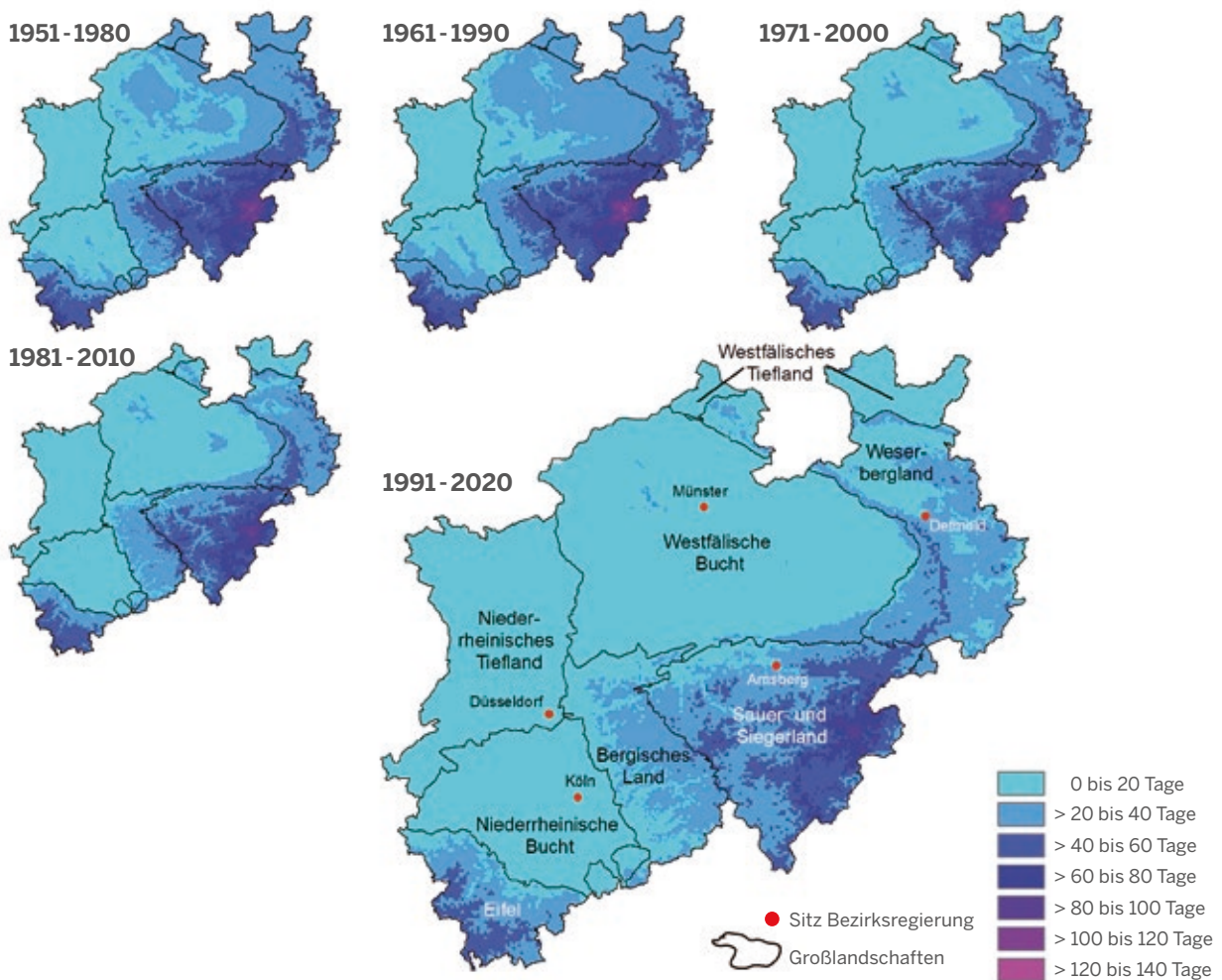


Abb. 35: Karten der Schneedeckentage in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Datengrundlage: DWD)



3. Sonne

In den 1980er-Jahren war nicht die globale Erderwärmung das Umweltthema Nummer eins, sondern das Waldsterben, welches in Folge des Sauren Regens ein äußerst dramatisches Ausmaß angenommen hat. Die Ursache dafür war die damals massive Luftverschmutzung mit Schwefeldioxid durch den Verkehr, die Schwerindustrie und die Energieerzeugung. Smog war in den Ballungsräumen in den 1970er-Jahren ein ernstes Problem. Eine weitere Folgeerscheinung der massiven Luftverschmutzung durch Schwefeldioxide war, dass der damals schon stark erhöhte Treibhausgasanteil in der Atmosphäre und der sich dadurch verstärkende Treibhauseffekt durch eben diese Schwefeldioxide zum Teil ausgeglichen wurde. Die Schwefeldioxidverschmutzung führte zur Bildung von Schwefelsäure-Aerosolen, die das Sonnenlicht reflektierten, anstatt wie bei Treibhausgasen in zusätzliche Wärme umgewandelt zu werden. Dieser Effekt, das „global dimming“, wurde durch die positiven Entwicklungen in der Luftreinhaltung immer schwächer, sodass die globale Erderwärmung keinen „dreckigen Gegenspieler“ mehr hatte. Die Folgen sind messbar: Weniger Smog bei zunehmend stationären Hochdrucklagen, die für lange, sonnige Witterungsabschnitte sorgen.



Indikatoren-Kernaussagen:

- Seit den 1950er-Jahren hat die sogenannte globale Verdunklung abgenommen.
- Betrachtet über die Gesamtzeitreihe scheint die Sonne nun eine Woche länger im Jahr.
- Jahre mit einem sehr warmen Sommer sind meist auch Jahre mit einer sehr hohen Sonnenscheindauer.

Tab. 5: Übersicht des Indikators zum Abschnitt 3 „Sonne“

Indikator	Einheit	räumliche Einheit	Zeitreihe	Mittelwert Zeitreihe	Trend Zeitreihe	Änderung Zeitreihe	Mittelwert der Klimanormalperioden					Auswirkungen auf Handlungsfelder
							1951 - 1980	1961 - 1990	1971 - 2000	1981 - 2010	1991 - 2020	
3.1 Sonnenscheindauer	Stunden	NRW	1951 - 2020	1.506		+191	1.457	1.440	1.474	1.512	1.573	alle

 Trend mit Trendumkehr: zuerst fallend, dann steigend;
keine Bewertung der Entwicklung möglich oder gleichzeitig
günstige und ungünstige Entwicklungsaspekte vorhanden



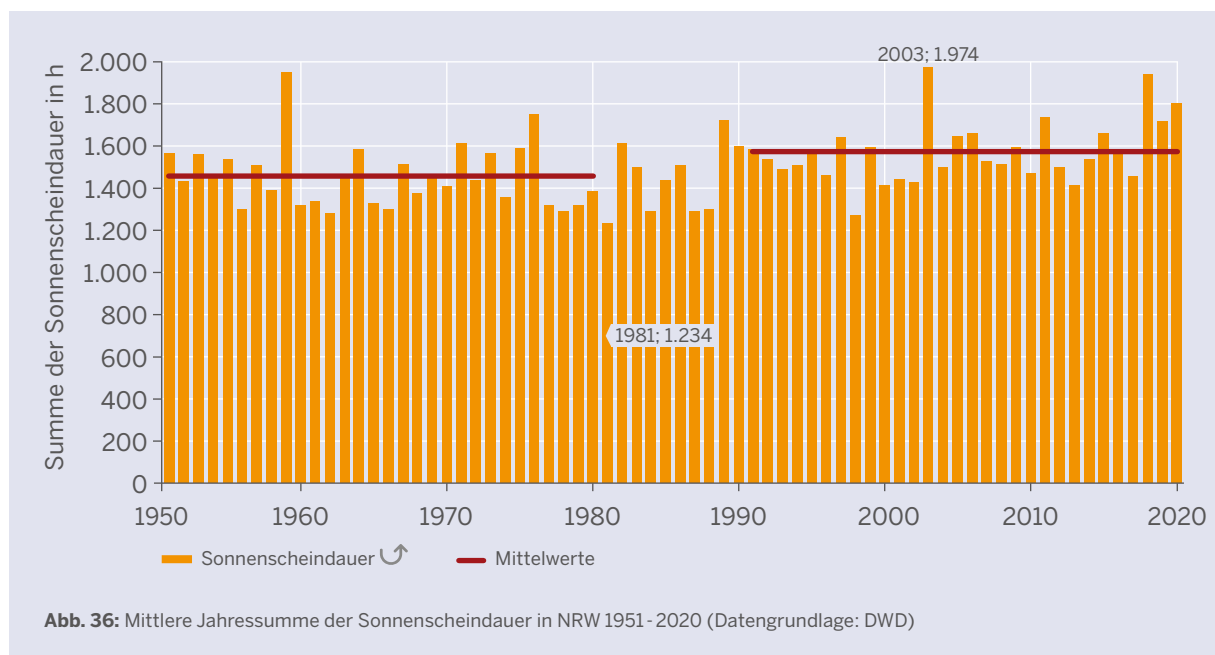
3.1 Sonnenscheindauer



Weniger Luftverschmutzung lässt die Sonne mehr strahlen

Der Zusammenhang zwischen Klimawandel und Sonnenscheindauer erschließt sich nicht unbedingt auf den ersten Blick. Doch hat die Veränderung der auf dem Atmosphärenoberrand eintreffenden Sonnenstrahlung erhebliche Auswirkungen auf das globale Klima. In kürzeren Zeiträumen ändert sich die von der Sonne ausgehende Strahlung jedoch kaum

und wird auch als Solarkonstante bezeichnet. Erdgeschichtlich haben vor allem Änderungen der Erdbahnparameter, wie Entfernung Erde-Sonne (Abweichung von Kreisbahn) und der Neigungswinkel, dazu geführt, dass die Erde einen stark variierenden Strahlungsgenuss hatte, was sich erheblich auf das Erdklima ausgewirkt hat.



Bezogen auf NRW wird die Sonnenscheindauer durch den Klimawandel in Folge von sogenannten „blockierenden Wetterlagen“ (vgl. Abschnitt „Wetterextreme“, Seite 32) beeinflusst. Diese verhindern den typischen Wechsel von Hochdruck- und Tiefdruckgebieten, sodass sich über längere Zeitperioden Wetterlagen stationär halten. Je nachdem wie Hoch- und Tiefdruckgebiete zum Liegen kommen, kann es beispielsweise langanhaltende „Schönwetterphasen“ mit viel Sonnenschein

in NRW geben. Dennoch ist der Klimawandel nicht der einzige Einflussfaktor auf die Sonnenscheindauer in NRW. Der Anstieg der Sonnenscheindauer um 116 Stunden im Vergleich der Klimanormalperioden 1951 - 1980 und 1991 - 2020 (Abbildung 36) ist auch auf die Reduktion von Luftschadstoffen in diesem Zeitraum zurück zu führen. Die 1950er- bis 1980er-Jahre spiegeln den Zeitraum der „globalen Verdunkelung“ wider, in dem durch eine hohe Luftschadstoffbelastung die Intensi-

tät des Tageslichts bzw. der Sonneneinstrahlung reduziert war. Seit den 1980ern hat sich durch eine verstärkte Filterung von Abgasen und Schadstoffen aus der Luft die „globale Verdunkelung“ reduziert, was auch im Anstieg der Sonnenscheinstunden abzulesen ist. Dieser Zusammenhang lässt sich weltweit in verschiedenen Regionen nachweisen (Ohmura 2009).

Einzelne Jahre wie 2018, 2003 und 1959 stechen mit besonders hohen Werten von über 1.900 Stunden Sonnenscheindauer im Jahr hervor. Diese Jahre standen auch mit einem überdurchschnittlich warmen und trockenen Sommer und blockierenden Wetterlagen in Verbindung.

Die räumliche Verteilung der Sonnenstunden in NRW zeigt ein West-Ost-Gefälle in fast allen Zeiträumen (Abbildung 37). So treten im Niederrheinischen Tiefland, in der Niederrheinischen Bucht und in der Eifel ca. 100 Sonnenstunden mehr auf als in weiten Teilen des Weserberglands sowie des Sauer- und Siegerlands. Die Zunahme der Sonnenscheindauer hat in der gesamten Landesfläche nahezu gleichmäßig stattgefunden und sich im Vergleich der Klimanormalperioden 1951-1980 und 1991-2020 flächendeckend um mehr als 100 Stunden erhöht.

Jahressonnenscheindauer

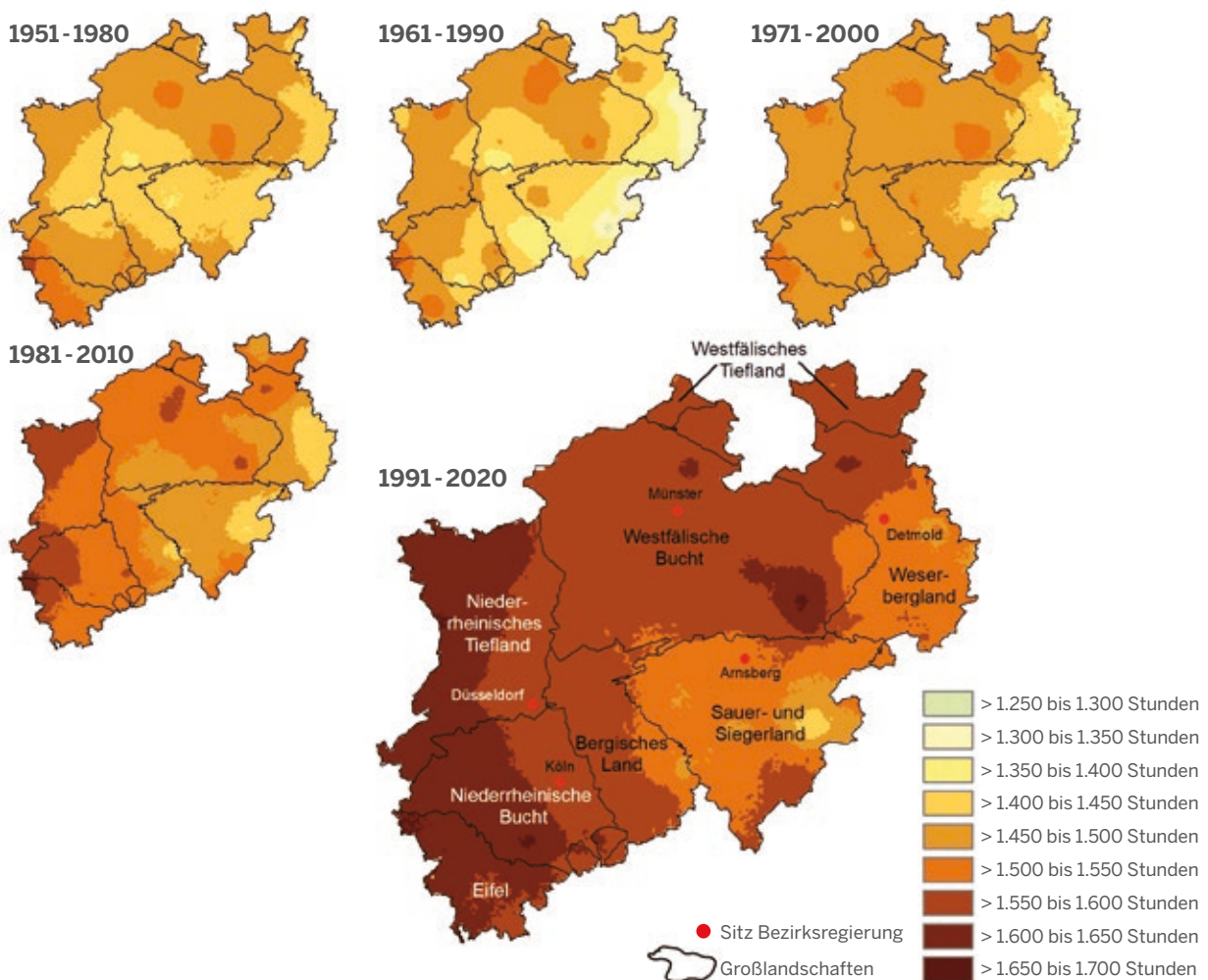


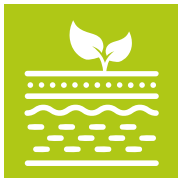
Abb. 37: Karten der mittleren Jahressonnenscheindauer in NRW für alle Klimanormalperioden (Datengrundlage: DWD)



Handlungsfelder Umwelt



4. Wasserwirtschaft und Hochwasserschutz



5. Boden



6. Biodiversität und Naturschutz



7. Wald und Forstwirtschaft



8. Landwirtschaft



4. Wasserwirtschaft und Hochwasserschutz

Die einzelnen Komponenten des Wasserkreislaufs und der Wasserwirtschaft zeigen eine hohe Anfälligkeit gegenüber klimatischen Veränderungen – von der Gewässer- und Talsperrenbewirtschaftung über die Wasserversorgung bis hin zur Siedlungsentwässerung und zum Hochwasserschutz. Vor dem Hintergrund des Klimawandels sind daher wichtige Ziele der Wasserwirtschaft, die Gewässer so zu bewirtschaften, dass sie als gesunder Bestandteil des Naturhaushalts erhalten bleiben, sie möglichst ökologisch zu verbessern, die Trink- und Brauchwasserversorgung der Menschen und der Industrie hinsichtlich Klimarisiken zu optimieren und Hochwasserrisiken – auch infolge von Starkregenereignissen – zu mindern. Zudem sind der mengenmäßige Zustand der Grundwasserkörper im Spannungsfeld zwischen erhöhtem Wasserverbrauch und Verdunstung auf der einen Seite sowie den potenziell unregelmäßiger fallenden Niederschlägen auf der anderen Seite zu betrachten.

Indikatoren-Kernaussagen:

- Der standardisierte Niederschlagsindex SPI zeigt die Trockenphasen (der vergangenen Jahre) deutlich an.
- Fehlende Niederschläge im Sommer reduzieren die Bodenkühlleistung.
- Im Jahr 2018 ist die erste negative klimatische Wasserbilanz seit Messbeginn aufgetreten.
- Der mittlere Abfluss an der Lahn nimmt vor allem im Sommerhalbjahr ab.
- Im Sommer gibt es mehr Niedrigwassertage an der Lahn.
- Niedrig- und Hochwasser führen zu Einschränkungen für die Binnenschifffahrt auf dem Niederrhein.
- Die Gewässertemperatur im Rhein steigt an.
- Die steigenden Temperaturen reduzieren die Grundwasserneubildung in Neuenkirchen und verringern die Grundwasserstände in Hamminkeln.
- Heiße Sommer führen zu einem erhöhten Trink- und Brauchwasserbedarf.

Auswirkungen des Klimawandels

Die Klimaprojektionen deuten darauf hin, dass sich die Niederschläge vermehrt vom Sommer in den Winter verschieben werden. Gleichzeitig nehmen Extremniederschlagsereignisse zu. Dies wäre eine Fortsetzung einer Entwicklung, wie sie auch schon in den Beobachtungsdaten zu sehen ist. Das bedeutet, dass im Sommer durch weniger Niederschlag und einer gleichzeitig höheren Verdunstung weniger Wasser zur Verfügung stehen kann, sich gleichzeitig bei höheren Temperaturen im Zuge des Klimawandels der Wasserbedarf aber wahrscheinlich erhöht. Hier sind insbesondere die Landwirtschaft, Industrie, Energiewirtschaft sowie die Trinkwasserversorgung zu nennen. Darüber hinaus kann die Schiffbarkeit von Wasserstraßen bei Niedrigwasser häufiger eingeschränkt sein. In manchen Regionen kann durch vermehrte Wasserentnahme im Sommer der Grundwasserspiegel sinken, vor allem dann, wenn die Entnahme durch Grundwasserneubildung im Winter nicht ausgeglichen werden kann. Zudem gibt es durch die veränderte Niederschlagsverteilung bzw. die verringerten Niederschläge im Jahr vermehrt Probleme bei der Bewirtschaftung von Talsperren. Aber auch einzelne Extremniederschlagsereignisse, wie beispielsweise im Juli 2021 im südlichen NRW geschehen, können die Talsperren vor enorme Herausforderungen stellen.

Es besteht die Möglichkeit, dass Hochwasser und die damit verbundene Überschwemmungsgefahr, unter anderem durch die saisonale Verschiebung der Niederschläge in den Winter, vermehrt auftreten können. Die Situation wird verstärkt, wenn durch die höheren Temperaturen weniger Niederschlag als Schnee gebunden wird oder Schneeschmelze und starke Niederschläge

zusammenfallen und somit zusätzlich den Abfluss erhöht. Durch Starkniederschlagsereignisse, die das ganze Jahr über auftreten können, können ebenfalls Überflutungen auftreten, wenn das Kanalnetz überlastet wird, die Fließgewässer bereits viel Wasser führen oder die Böden die Wassermenge nicht mehr bzw. nicht schnell genug aufnehmen können. Sowohl Flusshochwasser als auch starkniederschlagsbedingte Überschwemmungen können enorme Infrastrukturschäden verursachen und Menschenleben gefährden.

Höhere Lufttemperaturen bewirken auch eine Erhöhung der Wassertemperaturen, was ggf. durch die Einleitung von Kühlwasser verschärft werden kann. Die geringe Löslichkeit von Sauerstoff im warmen Wasser und die höhere Sauerstoffzehrung wirken sich negativ auf die ökologische Wasserqualität aus. Zusätzlich führt die temperaturbedingt verstärkte Verdunstung zu einer geringeren Abflusshöhe im Einzugsgebiet und zu insgesamt niedrigeren Abflüssen, die vor allem den Basisabfluss betreffen und sich somit bei Niedrigwasser auswirken. Tendenziell erhöhen sich durch den geringeren Abfluss im Gewässer auch Schadstoffkonzentrationen, wenn beispielsweise der Schmutzwasseranteil bei Kläranlageneinleitungen konstant bleibt. Aber auch Hochwasser, Starkregenabschläge oder Einleitungen aus der Misch- und Trennkanalisation können zu einer Verschlechterung der Wasserqualität führen. Bei Hochwasserereignissen ist die Nährstoff- und Trübstofffracht im Gewässer erhöht und durch Überflutungen können Krankheitserreger oder Schadstoffe in das Gewässer eingetragen werden (zum Beispiel durch Überflutung von Kläranlagen).



Tab. 6: Übersicht der Indikatoren zum Handlungsfeld 4 „Wasserwirtschaft und Hochwasserschutz“

Indikator		Einheit	räumlicher Bezug	Zeitreihe	Mittelwert Zeitreihe	Trend Zeitreihe
4.1 Standardisierter Niederschlagsindex (SPI)		–	NRW	1881 - 2020	0	~
4.2 Evapotranspiration	aktuelle	mm	NRW	1991 - 2020	448	↗
	potenzielle	mm	NRW	1991 - 2020	505	↘
4.3 Klimatische Wasserbilanz	Jahr	mm	NRW	1961 - 2020	303	↗
	Frühling	mm	NRW	1961 - 2020	19	↗
	Sommer	mm	NRW	1961 - 2020	-20	↗
	Herbst	mm	NRW	1961 - 2020	114	↘
	Winter	mm	NRW	1961 - 2020	190	~
4.4 Mittlere Abflusshöhe	Winter	mm	Feudingen/ Lahn	1951 - 2020	590	~
	Sommer	mm		1951 - 2020	208	↘
	Verhältnis Winter/Sommer	mm		1951 - 2020	4,2	~
4.5 Hoch- und Niedrigwasser	Winter	Anz. Hochwassertage	Feudingen/ Lahn	1951 - 2020	0,6	–
	Sommer	Anz. Hochwassertage		1951 - 2020	1,8	–
	Winter	Anz. Niedrigwassertage	Feudingen/ Lahn	1951 - 2020	7,3	–
	Sommer	Anz. Niedrigwassertage		1951 - 2020	21,7	–
4.6 Schiffbarkeit der Binnenschiffahrtsstraßen	jährl. Höchstwert (Niedrigwasser)	Anzahl	Rees, Köln, Ruhrort	1950 - 2020	20,1	~
	jährl. Höchstwert (Marke I)	Anzahl	Köln, Ruhrort	1950 - 2019	13,5	~
	jährl. Höchstwert (Marke II)	Anzahl	Köln, Ruhrort	1950 - 2019	1,9	–
4.7 Gewässer-temperatur fließender Gewässer	Mittel	°C	Kleve-Bimmen	1974 - 2020	13,5	↗
	Maximum	°C	Kleve-Bimmen	1974 - 2020	24,7	↗
4.8 Grundwasser-neubildung	Grundwasser-neubildung	mm	St. Arnold	1966 - 2020	390	↘
	Niederschlag	mm	St. Arnold	1966 - 2020	791	~
4.9 Grundwasser-stand	Jahr	mNHN	Hamminkeln, Bislicher Wald	1951 - 2020	19,0	↘
	Jahr	mNHN	Ratingen-Fahrenkothen	1951 - 2020	74,1	↘
	Jahr	mNHN	Niederbauer	1952 - 2020	68,3	↘
	Jahr	mNHN	Bokel	1953 - 2020	74,7	~
	Jahr	mNHN	Stellerdamm	1953 - 2020	39,1	↘
	Jahr	mNHN	Wachtendonk	1963 - 2020	27,7	~
4.10 Wasserentnahme der öffentlichen Wasserversorgung		Mrd. m³/a	NRW	2012 - 2020	1,1	↗

- ↗ steigender Trend
 ↘ fallender Trend
 ↗↘ Trend mit Trendumkehr: zuerst fallend, dann steigend
 ↘↗ Trend mit Trendumkehr: zuerst steigend, dann fallend
 ~ kein Trend

- ↗↘↗↘ günstige Entwicklung
 ↘↗↘↗ ungünstige Entwicklung
 ↗↘↗↘~ keine Bewertung der Entwicklung möglich oder gleichzeitig günstige und ungünstige Entwicklungsaspekte vorhanden

[illegible]



4.1 Standardisierter Niederschlagsindex (SPI)

I

Der SPI zeigt die Trockenphasen (der vergangenen Jahre) deutlich an

Die Veränderung des Niederschlags ist eine Folge der Temperaturänderung. Die Zunahme der Temperatur wirkt sich unter anderem auf den Wasserdampfgehalt der Luft und auf die Zirkulationssysteme der Erde aus, sodass sich Niederschlagsmuster regional

ändern können. Anthropogene Nutzungen und Beeinträchtigungen beeinflussen den Wasserhaushalt zusätzlich regional unterschiedlich. Sie überlagern sich mit den Klimafolgen und daher können die Ursache-Wirkungsbeziehungen sehr komplex sein.

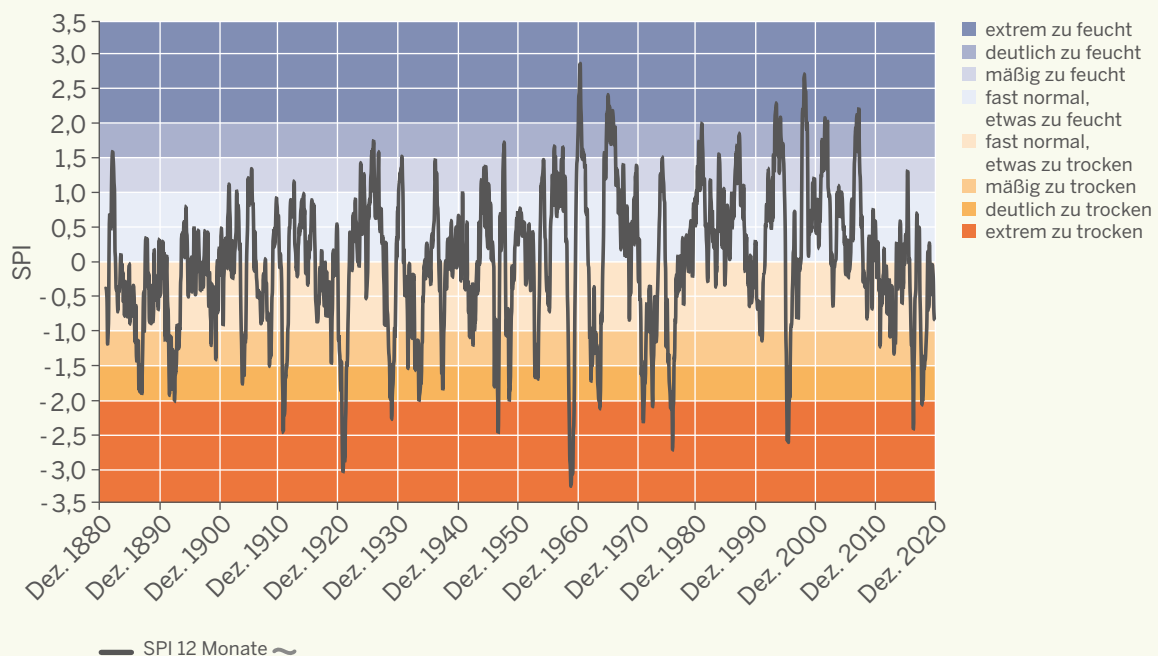


Abb. 38: Standardisierter Niederschlagsindex (SPI) 12 Monate im Zeitraum Dezember 1881 bis Dezember 2020 im Mittel für NRW (Datengrundlage: DWD)

Der in Abbildung 38 dargestellte standardisierte Niederschlagsindex (SPI) ist ein Niederschlagsindex, der auf der Basis der monatlichen Niederschlagsdaten für NRW angibt, ob ein Zeitraum (zum Beispiel 3, 6 oder 12 Monate) im Vergleich zum selben Zeitraum im langjährigen Verlauf (komplette Zeitreihe) zu trocken oder zu feucht ist (DWD 2020c). Als Indikator wird hier der SPI 12 Monate verwendet, das heißt, dass für gleitende 12-Monats-Zeiträume der SPI berechnet wird. Der SPI 12 Monate wurde gewählt, da sich über diesen Zeitraum ohne klimatische Veränderungen die Niederschläge ausgleichen sollten. Ein Trend zeigt daher eine Veränderung des Niederschlagsgeschehens hin zu trockeneren (fallender Trend) oder feuchteren (steigender Trend) Verhältnissen an.

Der SPI dient hier als Index zur Beurteilung einer meteorologischen Dürre. Weitere Begriffe in diesem Zusammenhang, zum Beispiel Bodendürre, hydrologische Dürre, Grundwasser-Dürre oder landwirtschaftliche Dürre, sind anders definiert und können allenfalls indirekt beurteilt werden. Die extremsten SPI-Werte, sowohl für eine „extrem zu trockene Situation“, als auch für eine „extrem zu feuchte Situation“, sind Ende der

1950er/Beginn der 1960er Jahre aufgetreten. Im Dezember 1959 lag der SPI bei -3,3 und im Januar 1960 bei -3,2. Dagegen lag der SPI im Juni 1961 bei 2,7 und im Juli 1961 bei 2,9. Für die letzten zehn Jahren zeigt der SPI 12 Monate, dass überwiegend „fast normale“ Verhältnisse vorherrschten. „Mäßig feuchte“ Verhältnisse gab es nur im Juni und Juli 2016. Die allgemein präsenten Trockenphasen der letzten drei Jahre werden als „mäßig zu trocken“ vom Februar 2017 bis August 2017 und vom September 2018 bis August 2019, sowie als „deutlich zu trocken“ im Juni/Juli 2017 und vom Oktober 2018 bis Januar 2019 bezeichnet. In diesem Zeitraum lagen einzelne Monate auch in der Kategorie „extrem zu trocken“. Ende 2020 befand sich der SPI 12 Monate im Bereich „fast normal“/„etwas zu trocken“.

Über den gesamten Zeitraum ist kein statistisch signifikanter Trend zu erkennen. Bei Betrachtung der letzten 20 Jahre hingegen zeigt sich eher eine Tendenz hin zu trockeneren Verhältnissen, aber auch hier liegt keine statistische Signifikanz vor.

Dürre-Monitoring in NRW

Das Fachinformationssystem Klimaanpassung des LANUV (www.klimaanpassung-karte.nrw.de, LANUV NRW 2021a) stellt im Handlungsfeld „Dürre“ umfassende Informationsgrundlagen zum Thema Dürre bereit, zum Beispiel für Anwendende aus der Land- und Forstwirtschaft. Neben dem SPI, der zur Feststellung von meteorologischen Dürren dient, werden der Dürremonitor Deutschland des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung (UFZ-Dürremonitor) zur groben Orientierung zum Feuchte- und Dürrezustand der Böden für die Land- und Forstwirtschaft und die Dürreempfindlichkeitskarte mit Informationen zur potenziellen Dürregefährdung forstlicher Standorte dargestellt.

Der UFZ-Dürremonitor stellt tagesaktuelle, flächendeckende Karten zum modellierten Bodenfeuchte- und Dürrezustand mit einer räumlichen Auflösung von vier mal vier Kilometern für Deutschland dar (www.ufz.de/duerremonitor, UFZ 2021). Es wird zwischen dem Dürrezustand des Gesamtbodens (bis 1,80 m Tiefe) und Oberbodens sowie dem pflanzenverfügbaren Bodenwasser (jeweils bis 25 cm Tiefe) unterschieden. Als Datengrundlage für die Modellierung werden täglich Eingangsdaten zu Niederschlag und Lufttemperatur vom DWD von ca. 2.500 Wetterstationen in Deutschland zur Verfügung gestellt. Boden- und Landnutzungsdaten werden aus der Bodenkarte und der Hydrogeologischen Karte sowie Corine Landcover Datensätzen für Deutschland entnommen.



Die Berechnung der Bodenfeuchte im UFZ-Dürremonitor erfolgt mithilfe des mesoskaligen hydrologischen Modells (mHM). In einem weiteren Schritt wird mit dem Soil Moisture Index (SMI) ein Bodenfeuchteindex berechnet. Der SMI besitzt eine Wertespanne zwischen null und eins und wird in fünf Dürreklassen kategorisiert (Abbildung 39). Die Beispielkarte für NRW zeigt den SMI für den Gesamtboden (bis 1,80 m Tiefe) vom 25.05.2020. Durch die sehr trockene Witterung im Mai 2020 herrscht vor allem in der Eifel, im Bergischen Land, in großen Teilen des Sauer- und Siegerlandes sowie Weserberglandes eine „extreme“ bzw. „außergewöhnliche Dürre“.

In der Karte zur Dürreempfindlichkeit der forstlichen Standorte vom Geologischen Dienst NRW wird die potenzielle Empfindlichkeit von Waldstandorten gegenüber meteorologischer Dürre dargestellt (GD NRW 2020). Die Dürreempfindlichkeit wird nach fünf Dürreempfindlichkeitsklassen eingeteilt (Abbildung 40).

Die Auswertung der Dürreempfindlichkeit der forstlichen Standorte basiert maßgeblich auf den Gesamtwasserhaushaltsstufen der Forstlichen Standortkarte im Maßstab 1:50.000 (FSK50). Für die FSK50 wurden die Bodenkarte 1:50.000 für NRW (BK50), Klimadaten des DWD sowie Reliefanalysen auf Basis des digitalen Höhenmodells (DGM10) verwendet.

Der Gesamtwasserhaushalt basiert auf der flächenspezifisch berechneten nutzbaren Feldkapazität eines Standortes (bis 2 m Tiefe) und seiner klimatischen Wasserbilanz in der forstlichen Vegetationsperiode (Tage mit Mitteltemperatur größer 10 °C). In einem weiteren Schritt erfolgen für reliefabhängige Parameter Zu- und Abschläge. Die durch Grund- und Stauwasser geprägten Standorte wurden unabhängig von der nutzbaren Feldkapazität und Wasserbilanz eingestuft.

Der beispielhafte Kartenausschnitt für die Großlandschaft Eifel (Abbildung 40) zeigt die kleinräumige Differenzierung und Bandbreite der Klassen (gering bis hoch) bei der Dürreempfindlichkeit der Waldstandorte. Standorte mit geringer Empfindlichkeit gegenüber Dürre sind in der Eifel (42 %) am häufigsten vertreten. Die Eifel besitzt allerdings mit rund 24 % der Waldfläche die größten prozentualen Flächenanteile an Standorten in NRW mit den beiden höchsten Dürreempfindlichkeitsklassen „hoch, (sehr) trocken“ bzw. „hoch“.



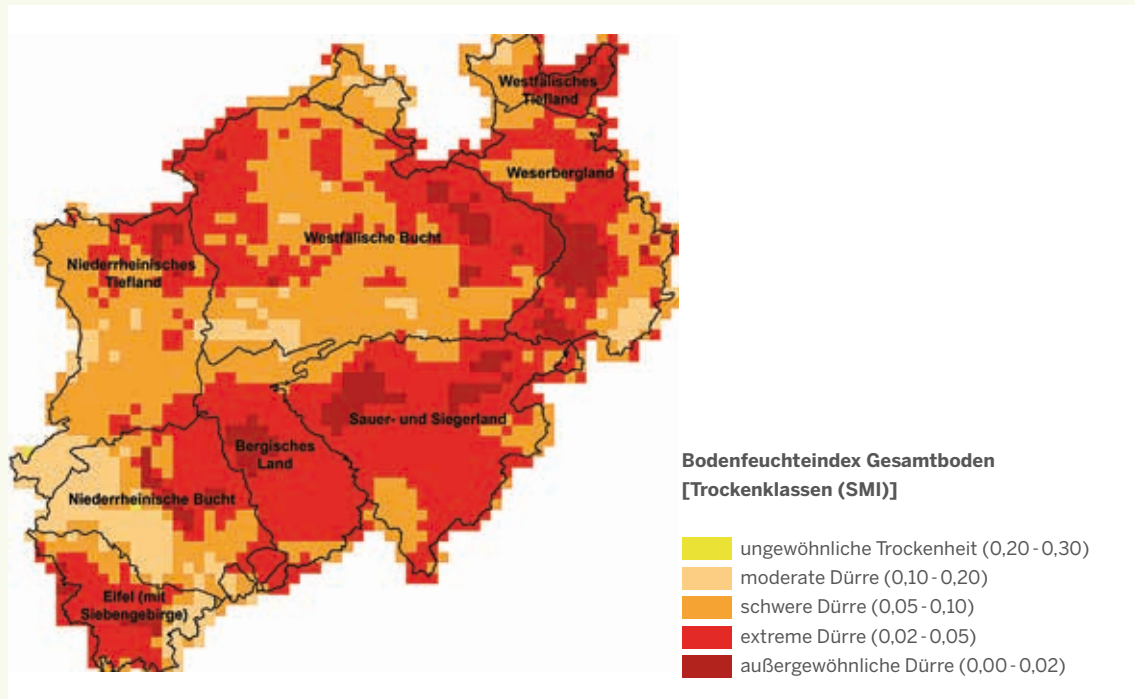


Abb. 39: Beispielkarte für den Bodenfeuchteindex (SMI) des Gesamtbodens (bis 1,80 m Tiefe) in NRW vom 25.05.2020
(Datengrundlage: UFZ-Dürremonitor, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung)

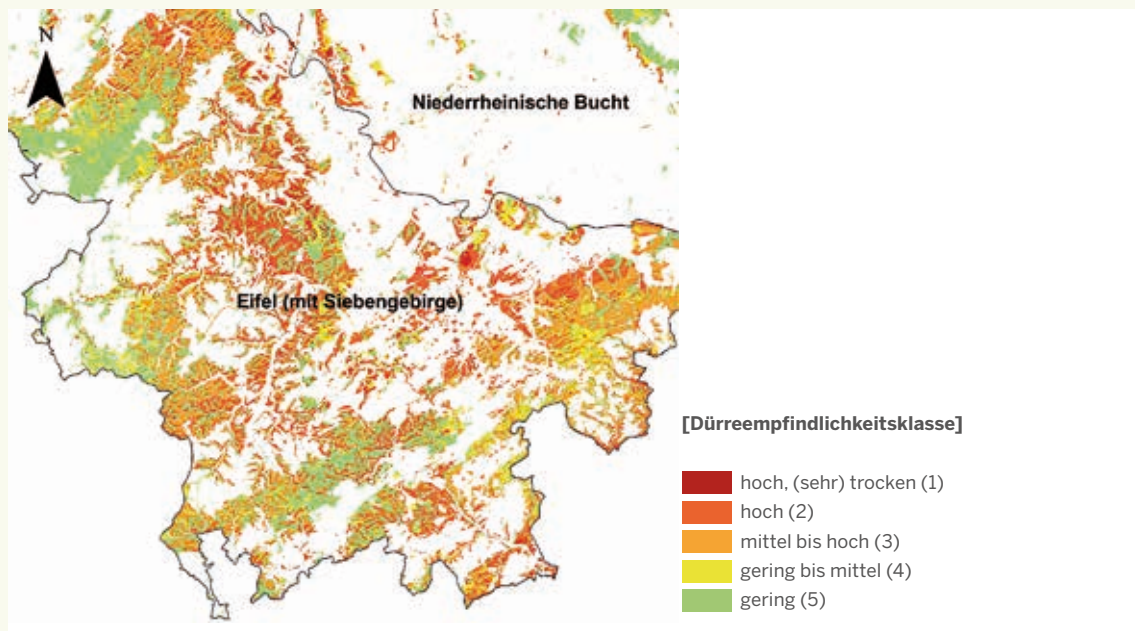


Abb. 40: Ausschnitt aus der Dürreempfindlichkeitskarte der forstlichen Standorte für die Großlandschaft Eifel.
(Datengrundlage: Geologischer Dienst NRW)



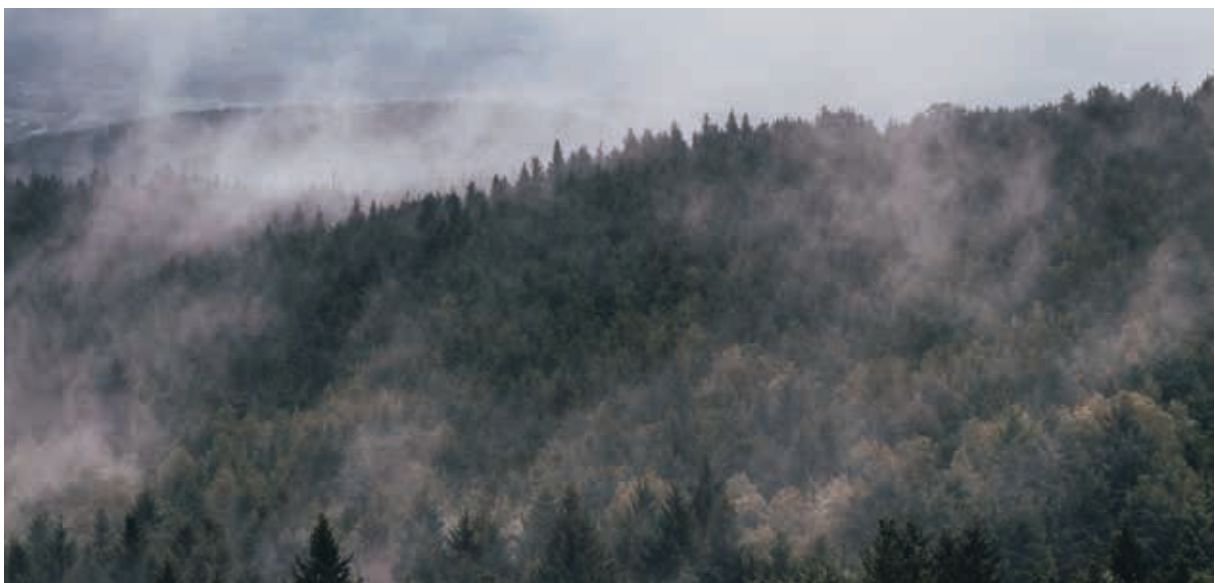
4.2 Evapotranspiration

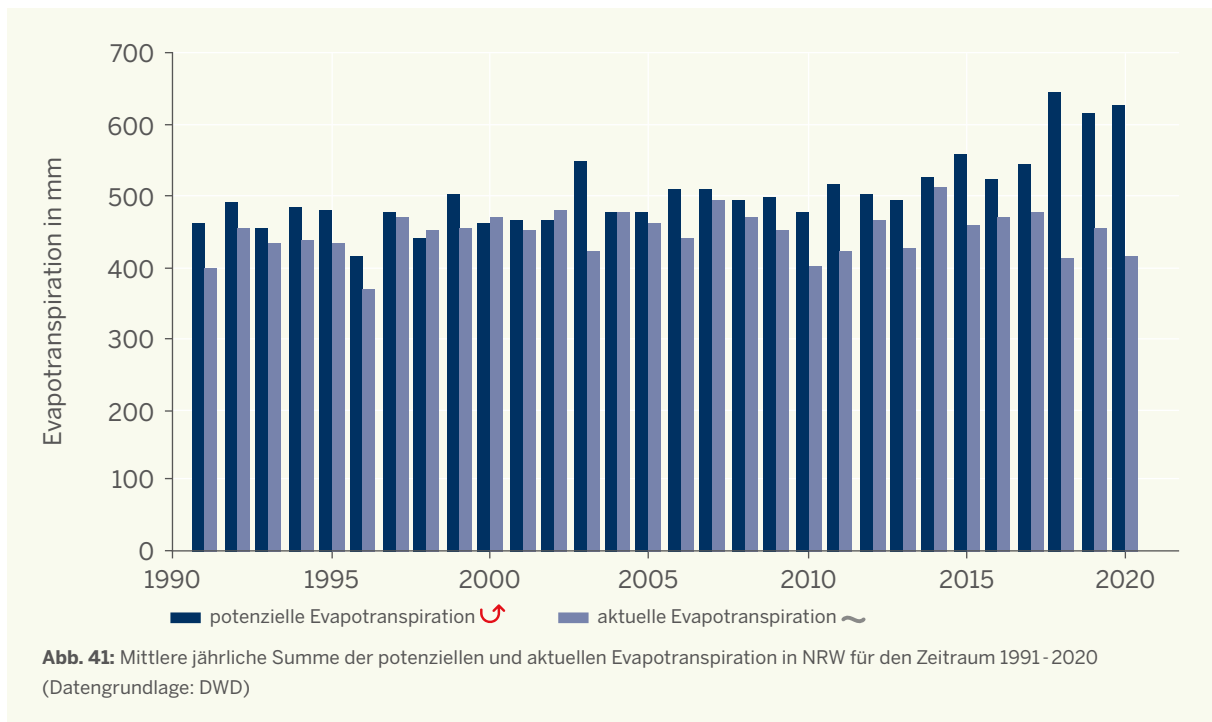
I

Fehlende Niederschläge im Sommer reduzieren die Bodenkühlleistung

Die steigende Lufttemperatur und die sich ändernden Niederschläge wirken sich auf die Evapotranspiration aus. Wärmere Luft kann mehr Wasserdampf aufnehmen und führt bei genug verfügbarem Wasser zu höheren maximal möglichen Verdunstungs- und Transpirationssraten (potenzielle Evapotranspiration). Sich ändernde Niederschläge beeinflussen jedoch das zur Verfügung stehende Wasserangebot, das von Oberflächen verdunsten kann und den Pflanzen für Transpirationsprozesse zur Verfügung steht. So können geringe Niederschläge in der Vegetationsperiode zu einer Abnahme der tatsächlichen (aktuellen) Evapotranspiration führen. Eine ausreichende Wasserverfügbarkeit – bei sich im Klimawandel erhöhenden Lufttemperaturen – kann hingegen zu einem Anstieg der aktuellen Evapotranspiration während dieser Phasen führen.

Die Evapotranspiration besitzt eine hohe Klimarelevanz und Veränderungen haben Auswirkungen auf verschiedene Handlungsfelder, wie beispielsweise die Landwirtschaft (8), den Boden (5) und die Biodiversität (6). Gleichzeitig können Evapotranspirationsprozesse beispielsweise gezielt in überwärmten Städten zur Kühlung eingesetzt werden, indem innerstädtische Grün- und Wasserflächen angelegt werden, die das im Boden gespeicherte Wasser entweder über die Bodenfläche selbst, aber auch über die Pflanzen, verdunsten und dabei Verdunstungskälte freisetzen (sogenannte Bodenkühlleistung, vgl. Indikatoren 5.5 „Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche“ und 13.1. „Wärmeinsel-Intensität“).





Die Evapotranspiration wird als Verdunstung von einer bewachsenen Bodenoberfläche (hier Gras) definiert und ist die Summe aus Evaporation (Verdunstung einer unbewachsenen Landoberfläche oder freien Wasseroberfläche) 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. Als Indikator werden die aktuelle und potenzielle jährliche Evapotranspiration in mm (Abbildung 41) dargestellt.

Evapotranspiration ist von der Wasserverfügbarkeit abhängig und liegt natürlicherweise unter der potenziellen Evapotranspiration. Es ist noch kein statistisch signifikanter Trend vorhanden. Jedoch ist anhand der letzten Jahre der Einfluss der niederschlagsarmen Sommer bei gleichzeitig hohen Temperaturen sichtbar. Die Schere zwischen potenzieller und aktueller Evapotranspiration geht weiter auseinander. So zeigt das Jahr 2018 bei der potenziellen Evapotranspiration den höchsten Wert mit einer Summe von 777 mm für NRW und liegt damit mit den Jahren 2019 und 2020 deutlich über dem Durchschnitt der Messreihe. Gleichzeitig zählen die Werte der aktuellen Evapotranspiration für 2018 und 2020 zu den niedrigsten Werten der Zeitreihe.

Im Zeitraum 1991 - 2020 liegt die mittlere potenzielle Evapotranspiration bei 505 mm. Die gestiegenen Lufttemperaturen (Indikator 1.1 „Durchschnittliche Jahreslufttemperatur“) haben zu einer signifikanten Zunahme der potenziellen Evapotranspiration um 132 mm geführt (Abbildung 41). Die aktuelle, also tatsächliche



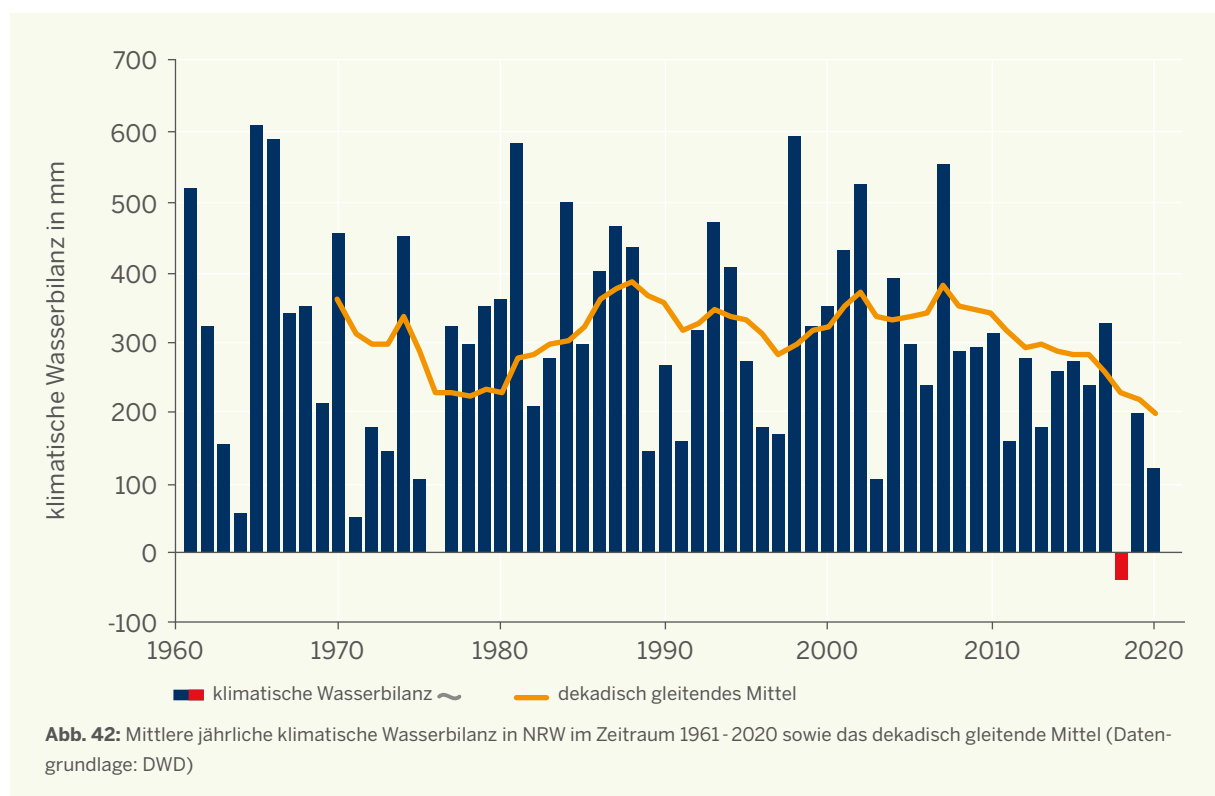
4.3 Klimatische Wasserbilanz

I

Seit Messbeginn erste negative klimatische Wasserbilanz im Jahr 2018

Die Temperaturzunahme als Folge der Klimaerwärmung wirkt sich unter anderem auf den Wasserdampfgehalt der Luft und auf die Zirkulationssysteme der Erde aus. Regionale Niederschlagsmuster können sich somit ändern und beeinflussen auch

die klimatische Wasserbilanz. Diese berechnet sich aus der Differenz von Niederschlag und Verdunstung. Die Verdunstung ist direkt abhängig von der Temperatur.



Die in Abbildung 42 präsentierte Zeitreihe der klimatischen Wasserbilanz stellt eine quantitative Gegenüberstellung von Wassergewinn und -verbrauch in einem bestimmten Gebiet für einen festgelegten Zeitraum dar. Sie beschreibt auch, wie sich meteorologische Bedingungen auf den Bodenwasserhaushalt auswirken. Ist der Niederschlag höher als die Verdunstung, so ist die Wasserbilanz positiv und man spricht von einem humiden, also feuchten Klima. Den umgekehrten Fall, also eine negative Wasserbilanz, nennt man trocken oder arid. Als Indikator wird das Gebietsmittel der klimatischen Wasserbilanz für Nordrhein-Westfalen pro Jahr in der Einheit Millimeter (mm) Wassersäule pro Jahr angegeben.

Gemittelt über den Gesamtzeitraum 1961 - 2020 ist die klimatische Wasserbilanz in NRW mit 303 mm positiv, es herrschen somit humide Bedingungen in NRW. Zwischen den Jahren schwanken die Werte jedoch sehr stark. Die höchsten Werte liegen bei rund 600 mm, die bis 2007 in regelmäßigen Abständen vorkommen.

Das Jahr 2018 weist mit -38 mm den niedrigsten und einzigen negativen Wert über die gesamte Zeitreihe auf. 2018 war auffällig warm und niederschlagsarm. 2019 und 2020 liegen die klimatischen Wasserbilanzen mit 201 mm bzw. 120 mm wieder im positiven Bereich, aber deutlich unter dem langjährigen Mittel der Gesamtzeitreihe.

Für den Zeitraum seit 1961 ist bisher kein signifikanter Trend nachzuweisen. Anhand des dekadisch gleitendes Mittels ist aber deutlich zu erkennen, dass die klimatische Wasserbilanz seit dem Jahr 2007 rückläufig ist. Eine solche Entwicklung gab es schon einmal in den 70er Jahren.





Abb. 43: Mittlere klimatische Wasserbilanz der Jahreszeiten in NRW im Zeitraum 1961-2020 sowie die dekadisch gleitenden Mittel (Datengrundlage: DWD)

Bei Betrachtung der mittleren klimatischen Wasserbilanz der einzelnen Jahreszeiten für den Zeitraum 1961-2020 (Abbildung 43) liegt der Frühling bei +19 mm. Der Sommer liegt hingegen mit -20 mm im leicht negativen Bereich, sodass es zu dieser Zeit zu einem Wasserdefizit kommt. Dieses Defizit kann mit +114 mm im Herbst und +190 mm im Winter wieder ausgeglichen werden.

Für den Zeitraum seit 1961 ist für den Frühling eine signifikante Abnahme der klimatischen Wasserbilanz um -78 mm festzustellen. Dabei wird die Abnahme insbesondere durch den Monat April beeinflusst,

der ebenfalls eine signifikante Abnahme der klimatischen Wasserbilanz um -45 mm aufweist. Hier wird das Zusammenspiel der früher einsetzenden Vegetationszeit (Indikator 6.1 „Beginn der phänologischen Jahreszeiten“) mit erhöhter Pflanzenverdunstung, bedingt durch höhere Lufttemperaturen früh im Jahr, und des zurückgehenden Niederschlags deutlich.

Für den Herbst wurde ein statistischer Trend mit einer Trendumkehr zu Anfang der 90er Jahre identifiziert, wobei dieser vor allem durch den enorm hohen Wert im Jahr 1998 zustande kommt und daher in seiner Aussagekraft begrenzt ist.





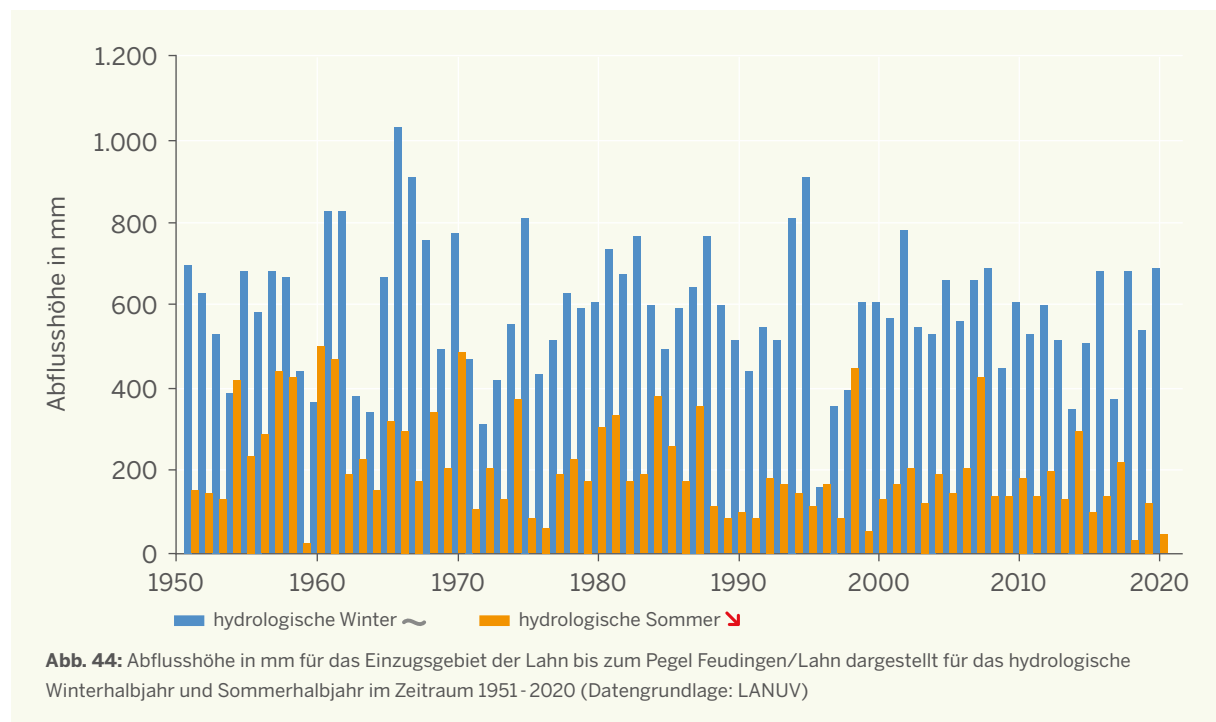
4.4 Mittlere Abflusshöhe

I

Der mittlere Abfluss nimmt an der Lahn vor allem im Sommerhalbjahr ab

Das natürliche Abflussgeschehen in Fließgewässern wird vor allem von der Menge und der jahreszeitlichen Verteilung der Niederschläge in den jeweiligen Einzugsgebieten bestimmt. Die Art der Niederschläge sowie die Morphologie der Einzugsgebiete spielen ebenfalls eine Rolle. Als Folge der Klimaveränderungen können sich regionale Niederschlags-

muster ändern. Die Temperaturänderung wirkt sich unter anderem auf den Wasserdampfgehalt der Luft und somit auf die Wasserhaushaltsgrößen aus. Dies kann sich in veränderten Abflüssen in Fließgewässern zeigen und diese wiederum ein Hinweis auf die Folgen des Klimawandels sein.



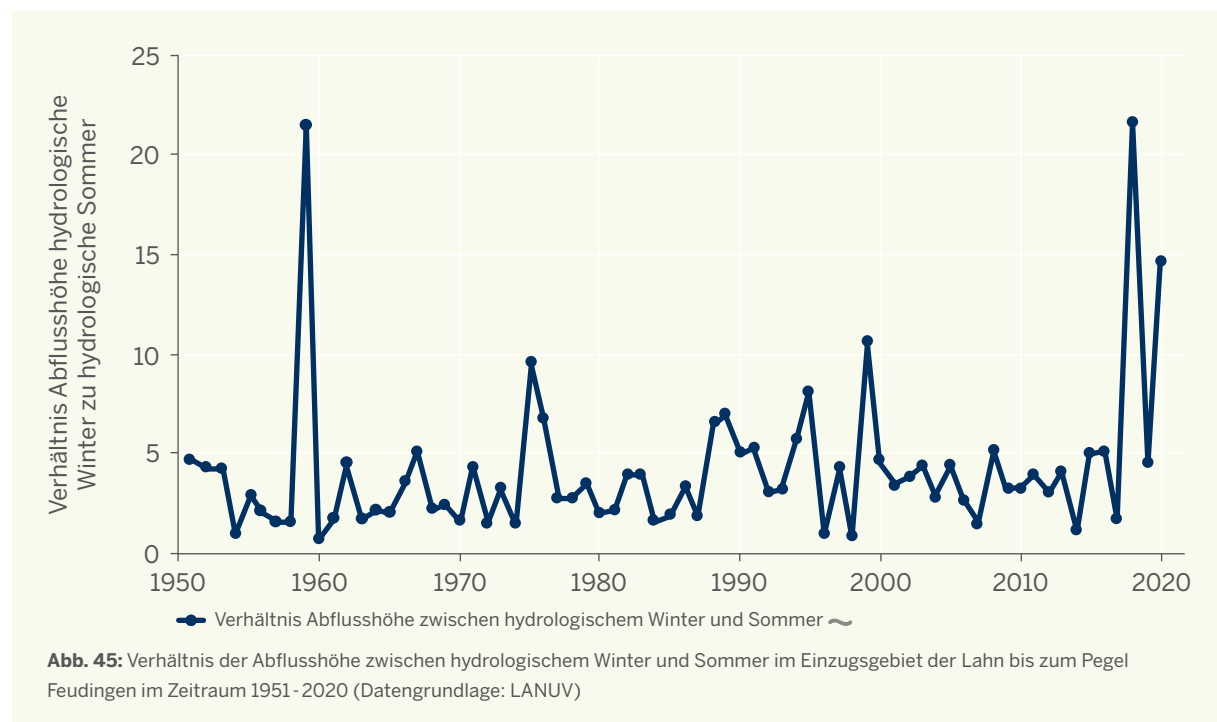
Als Indikator wird die Abflusshöhe in mm im hydrologischen Winterhalbjahr (1. November - 30. April) und im hydrologischen Sommerhalbjahr (1. Mai - 31. Oktober) für den Pegel Feudingen/Lahn im Kreis Siegen-Wittgenstein verwendet (Abbildung 44). Das natürliche Abflussgeschehen wird häufig durch den Einfluss des Menschen verändert. Die ausgewählte Pegelstation inklusive ihres Einzugsgebietes wurde hier ausgewählt, weil sie eine nur geringe anthropogene Beeinflussung und Nutzungsänderungen in der Umgebung aufweist. Nur dann können Änderungen im Abflussverhalten des Fließgewässers auf rein natürliche Ursachen zurückgeführt werden, wie beispielsweise ein sich änderndes Niederschlagsgeschehen und eine durch steigende Lufttemperaturen bedingte höhere Verdunstung. Neben der Abflusshöhe wird der Verhältnisswert der Abflusshöhe zwischen Winter- und Sommerhalbjahr als dimensionsloser Wert angegeben.

Über den Gesamtzeitraum 1951 - 2020 liegt die Abflusshöhe während des hydrologischen Winterhalbjahres im Mittel bei 590 mm und im Sommerhalbjahr bei 208 mm (Abbildung 44). Der Abnahmetrend über den gesamten Messzeitraum ist für das hydrologische

Sommerhalbjahr signifikant. Über die Gesamtmessreihe ergibt sich eine Abnahme der sommerlichen Abflusshöhe um -147 mm. Für den Winter ist noch kein statistisch signifikanter Trend vorhanden.

Das Verhältnis der Abflüsse zwischen dem hydrologischen Winterhalbjahr und dem hydrologischen Sommerhalbjahr liegt als dimensionsloser Wert im Mittel über die gesamte Zeitreihe 1951 - 2020 bei 4 (Abbildung 45). Damit übersteigen die winterlichen Abflüsse die sommerlichen Abflüsse im Mittel um den Faktor 3. Über die gesamte Zeitreihe liegt kein statistisch signifikanter Trend zu noch höheren Verhältnissen vor, allerdings gibt es eine steigende Tendenz.

Sowohl bei den Abflusshöhen im hydrologischen Sommerhalbjahr, aber vor allem im Verhältnis zwischen dem Abfluss des hydrologischen Winterhalbjahres zum hydrologischen Sommerhalbjahr, fallen die Extremjahre 1959 und 2018 besonders auf (Abbildung 44 und 45). Dort war das Verhältnis auf über 20 angestiegen, in erster Linie, weil der Abfluss im hydrologischen Sommerhalbjahr extrem gering war.





4.5 Hoch- und Niedrigwasser

I

Mehr Niedrigwassertage an der Lahn im Sommer durch ausbleibende Niederschläge

Niederschläge sind sowohl räumlich als auch zeitlich sehr variabel. Das natürliche Abflussgeschehen in Fließgewässern wird vor allem durch die Menge und die jahreszeitliche Verteilung der Niederschläge in den jeweiligen Einzugsgebieten bestimmt. Weitere Einflussfaktoren sind die Art der Niederschläge in Form von Regen oder Schnee und die morphologischen Eigenschaften der Einzugsgebiete. Als Folge

von Klimaveränderung können sich regionale Niederschlagsmuster ändern. Auch Sekundärfolgen des Klimawandels können, zum Beispiel durch Anpassungsmaßnahmen in dem Einzugsgebiet (Natur, Landwirtschaft etc.), das Abflussverhalten beeinflussen. Dies ist aber hier nicht Gegenstand der Betrachtung.

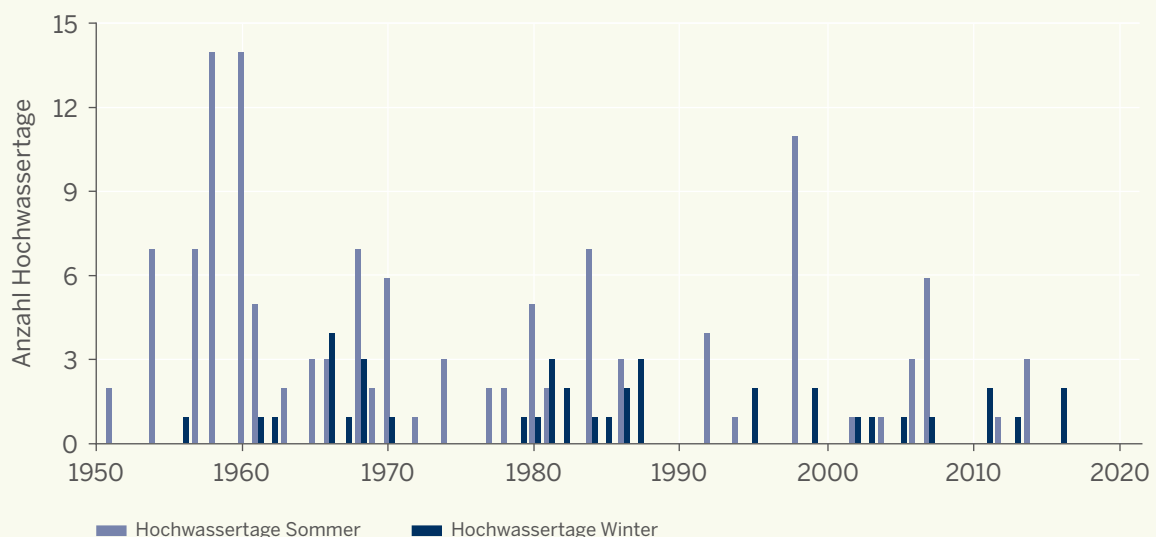


Abb. 46: Anzahl der Hochwassertage des hydrologischen Winterhalbjahres und des hydrologischen Sommerhalbjahres an der Station Feudingen/Lahn im Zeitraum 1951 - 2020 (Datengrundlage: ELWAS)



Der Indikator „Hochwasser“ beschreibt die Veränderung von Abflüssen, indem pro Jahr die Überschreitung des Tagesabflusses gegen einen Hochwasserkennwert gezählt wird. Der Hochwasserkennwert ist hier definiert als arithmetisches Mittel der jährlichen maximalen Abflüsse der hydrologischen Halbjahre der Periode 1961-1990, ausgewertet auf Basis von Tagesdaten (Tagesmittelwerten). Insoweit ist der Indikator „Hochwasser“ kein Indikator für schadbringende Hochwasser im Sinne der Hochwasserrisikomanagementrichtlinie, sondern für erhöhte Abflüsse.

Für den Indikator „Hochwasser“, dargestellt in Abbildung 46, wird das natürliche Abflussgeschehen langjährig an der Station Feudingen/Lahn ausgewertet. Um den häufig vorhandenen Einfluss des Menschen möglichst auszuschließen, wurde die hier verwendete Pegelstation inklusive ihres Einzugsgebietes so gewählt, dass sie möglichst keine anthropogene Beeinflussung und Nutzungsänderungen in der Umgebung aufweist. Nur dann können Änderungen im Abflussverhalten des Fließgewässers weitestgehend auf klimatische Ursachen zurückgeführt werden, wie beispielsweise ein sich änderndes Niederschlagsgeschehen und eine durch steigende Temperaturen bedingte höhere Verdunstung.

An der Station Feudingen/Lahn ergibt sich in der Periode 1961-1990 im Sommer ein Hochwasserabfluss-Kennwert von $2,6 \text{ m}^3/\text{s}$ und für den Winter von $7,7 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Auswertung der Überschreitungstage findet getrennt nach dem hydrologischen Sommerhalbjahr (01.05. bis 31.10.) und Winterhalbjahr (01.11. bis 30.04.) statt.

Über den Gesamtzeitraum 1951-2020 wurden am Pegel Feudingen/Lahn während des hydrologischen Winterhalbjahres im Mittel ein und im Sommerhalbjahr zwei Hochwassertage registriert. Aufgrund der zahlreichen Nullstellen auf der y-Achse war eine Trendberechnung mit der DAS-Methode für beide Zeitreihen nicht möglich (vgl. Abschnitt Statistik, S. 15). Vergleicht man die erste verfügbare Klimaperiode 1951-1980 mit der letzten Klimaperiode 1991-2020 (Tabelle 6), fand ein Rückgang der Hochwassertage im hydrologischen Sommerhalbjahr um fast zwei Tage statt. Die Anzahl der Hochwassertage im hydrologischen Winterhalbjahr hat sich hingegen kaum verändert.

Für den Indikator „Niedrigwasser“ werden die Niedrigwassertage als Tage definiert, an welchen der mittlere Tagesabfluss unter dem Niedrigwasserabfluss-Kennwert liegt. Der Niedrigwasserabfluss-Kennwert ergibt sich als arithmetisches Mittel der jährlichen minimalen Abflüsse der hydrologischen Halbjahre für den Zeitraum 1961 - 1990, ausgewertet auf Basis von Tagesdaten (Tagesmittelwerten). Für Feudingen/Lahn, welcher hier als Beispielpegel dient, ergibt sich in der Periode 1961 - 1990 im Sommer ein Niedrigabfluss-Kennwert von $0,063 \text{ m}^3/\text{s}$ und für den Winter von $0,110 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Auswertung findet getrennt nach dem hydrologischen Sommerhalbjahr (01.05. bis 31.10.) und Winterhalbjahr (01.11. bis 30.04.) statt.

Im Mittel über den Gesamtzeitraum 1951 - 2020 werden am Pegel Feudingen/Lahn während des hydrologischen Winterhalbjahres sieben und im Sommerhalbjahr 22 Niedrigwassertage registriert (Abbildung 47). Ebenso wie beim Indikator 5.4 „Hochwasser“ ergibt die Trendberechnung aufgrund der Eigenart der Zeitreihe mit vielen Nullen kein valides Ergebnis. Vergleicht man die erste verfügbare Klimanormalperiode 1951 - 1980 mit der letzten (1991 - 2020) fand eine Zunahme der Niedrigwassertage im hydrologischen Sommer um sieben Tage statt (Tabelle 6). Die Anzahl der Niedrigwassertage im hydrologischen Winterhalbjahr hat sich hingegen kaum verändert.

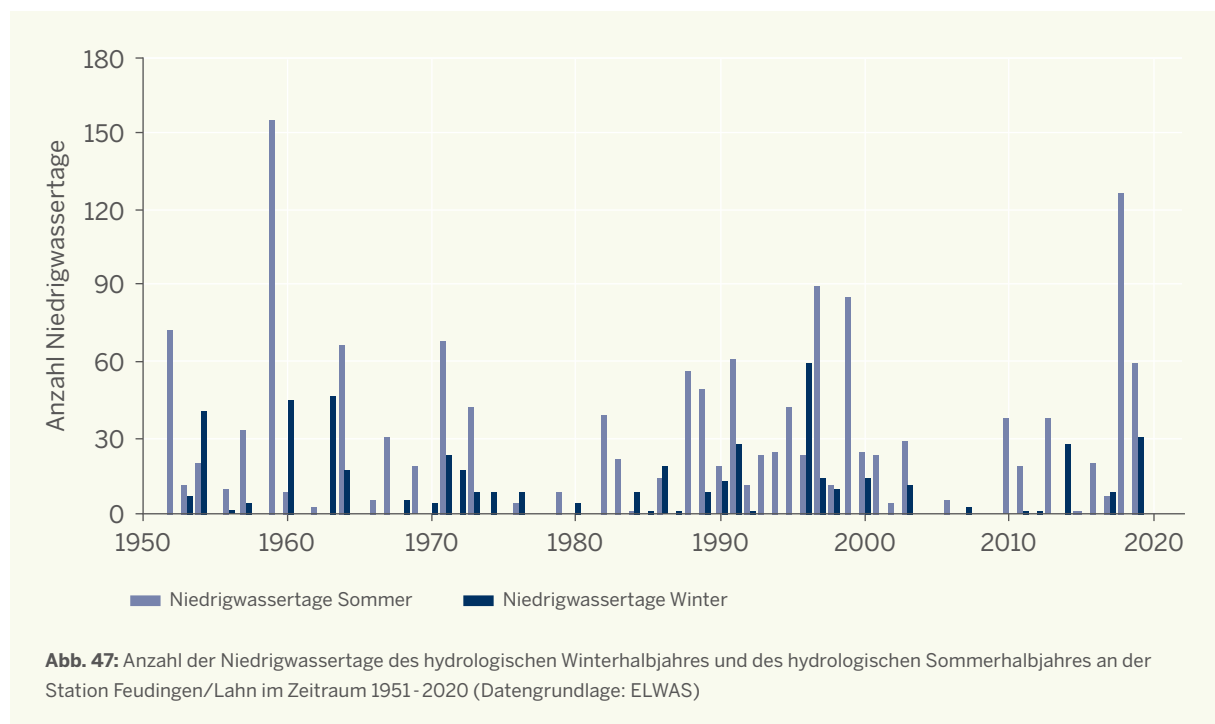


Abb. 47: Anzahl der Niedrigwassertage des hydrologischen Winterhalbjahres und des hydrologischen Sommerhalbjahres an der Station Feudingen/Lahn im Zeitraum 1951 - 2020 (Datengrundlage: ELWAS)

Retentionsräume und Hochwasserschutz

Klimamodelle legen nahe, dass die Häufigkeit von Extremereignissen mit dem Klimawandel zunehmen wird. Hierzu zählen auch die Hochwasserereignisse der Flüsse in NRW (Landesregierung NRW 2021b). Doch nicht nur der Klimawandel sorgt für ein erhöhtes Hochwasserrisiko. Der anthropogene Umbau von Flüssen, zum Beispiel die Begradigung zur Schaffung von landwirtschaftlichen und wohnbaulichen Nutzflächen, die Verlegung der Flüsse in Betonbetten und die Errichtung künstlicher Dämme und die Versiegelung von Flächen im Einzugsgebiet der Flüsse, führen zu einem erhöhten Hochwasserrisiko. Allein im Rheineinzugsgebiet in NRW werden 1,4 Millionen Menschen durch 370 km Rheindeiche vor Hochwassern geschützt (Landesregierung NRW 2021b).

Ein Weg zur Unterstützung des Hochwasserschutzes in NRW ist die Renaturierung der Flüsse und Retentionsräume. Hierbei handelt es sich um Gebiete, in denen zeitweilig ein Wasser- oder Stoffrückhalt erfolgen kann. Zu diesen Gebieten zählen natürliche Überschwemmungsflächen wie zum Beispiel Auen, aber auch der Speicherraum im Boden- und Grundwasserkörper.

Seit 1990 läuft das Gewässerauenprogramm in NRW. Ziel ist es, die Gewässer und Auen in einen möglichst naturnahen Zustand zurückzuführen, um eine natürliche Überflutungsdynamik gewährleisten zu können. Seit dem Jahr 2009 sind die Gewässerentfesselung und Vernetzung mit den Auen Bestandteil der Maßnahmenprogramme nach Wasser Rahmenrichtlinie (WRRL).

Ein Beispiel ist die „Fluss- und Auenentwicklung der Lippe“ bei Haus Vogelsang in Datteln-Ahsen und Olfen. Auf insgesamt 110 ha Auenfläche und über 5 km Gewässerstrecke, wurde eine naturnahe Flusslandschaft geschaffen, eingebettet in extensive Weiden, Wiesen und Wälder (Landesregierung NRW 2021b). Ein weiteres Beispiel ist die Umgestaltung der Ruhr bei Witten und Wetter (Bezirksregierung Arnsberg o.J.). Ziel ist es, die Ruhr anhand von alten Karten zu ihrer ursprünglichen Breite zurückzuführen. Für dieses Vorhaben hat die Landesregierung größere Flächen der Auen gekauft, sodass die Planung und Umsetzung der Renaturierung auf öffentlichen Flächen stattfinden kann. In der Vergangenheit kam es nämlich immer wieder zu Nutzungskonflikten mit der Landwirtschaft. Zur Umsetzung der Maßnahmen bietet das Land NRW den Kommunen finanzielle Unterstützung. Jährlich stehen 80 Millionen Euro zur Entwicklung lebendiger Gewässer zur Verfügung (Landesregierung NRW 2021b).





4.6 Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen

I

Extremwetterphasen beeinträchtigen die Binnenschifffahrt am Niederrhein

Beinahe die Hälfte des bundesweiten Güterumschlags in der Binnenschifffahrt wird in NRW abgewickelt (Destatis 2021). Insbesondere der Rhein besitzt als wichtigste Binnenschifffahrtsstraße Deutschlands eine herausragende Bedeutung für den Güterverkehr, indem er wichtige industrielle Zentren verbindet und einen kostengünstigen Warenaustausch ermöglicht. Durch häufiger auftreten-

de Hoch- oder Niedrigwasser infolge des Klimawandels kann es zu Einschränkungen in der Binnenschifffahrt kommen, wenn die Wasserstände bestimmte Schwellenwerte über- oder unterschreiten. Auch auf dem Niederrhein in Nordrhein-Westfalen können hierdurch Produktions- und Lieferketten beeinträchtigt werden.

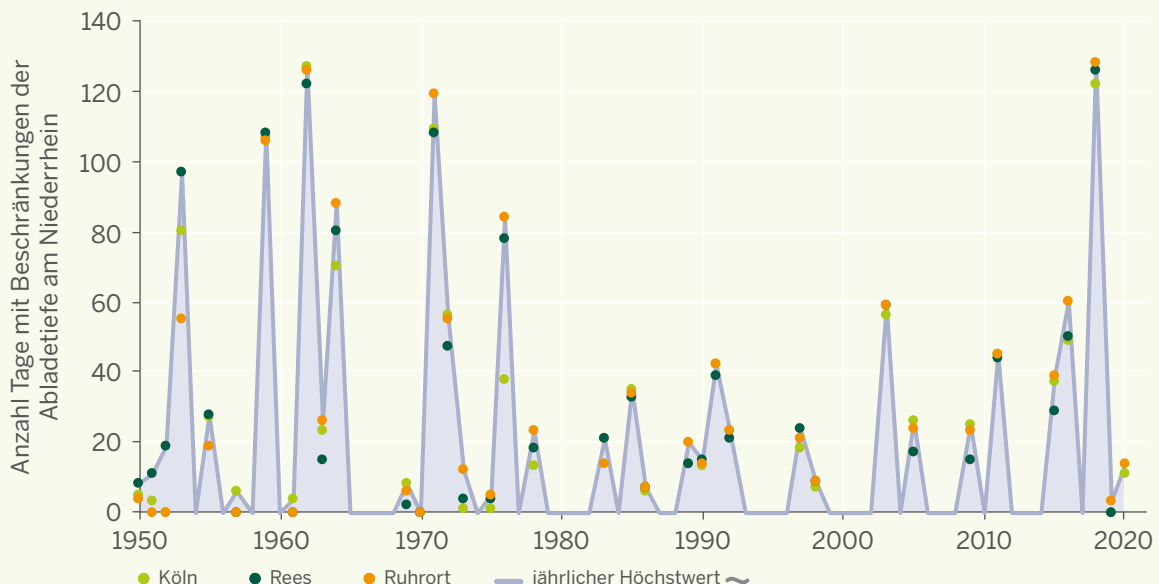


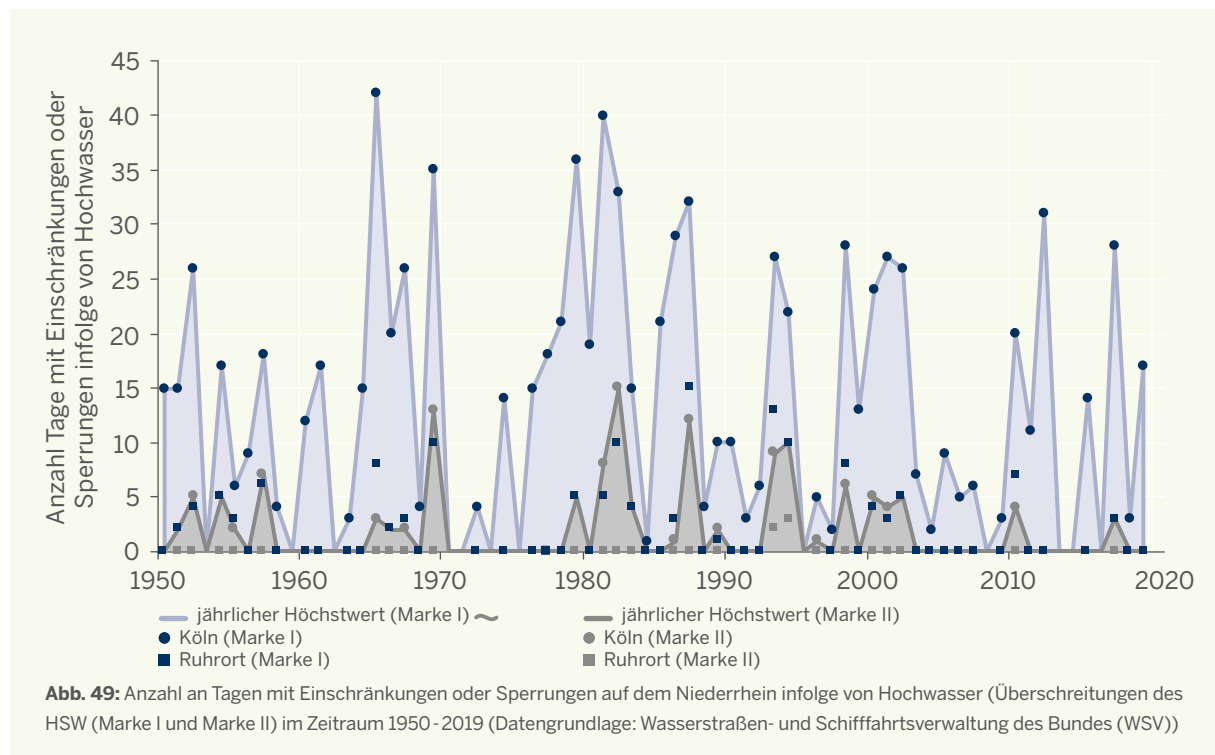
Abb. 48: Anzahl an Tagen mit Beschränkungen der Abladetiefe am Niederrhein infolge von Niedrigwasser (Unterschreitung des Gleichwertigen Wasserstandes (GIW)) im Zeitraum 1950 - 2020 (Datengrundlage: Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV))

Als Indikator wird die Anzahl der Tage mit Sperrungen in der Binnenschifffahrt aufgrund von Hoch- und Niedrigwasser auf dem Niederrhein herangezogen. Niedrigwasser infolge von Hitze und Trockenheit liegt vor, sobald der sogenannte „Gleichwertige Wasserstand“ (GIW) erreicht oder unterschritten ist. In diesem Fall ist Binnenschifffahrt zwar noch möglich, jedoch unterliegen Abladetiefe und Beladung gewissen Einschränkungen, sodass zum Beispiel mit einer Fahrt weniger Ladung transportiert werden kann. Hochwasser wird in der Regel durch Starkregen oder Schneeschmelze verursacht. Wenn der sogenannte „Höchste Schifffahrtswasserstand“ (HSW Marke II) überschritten ist, muss die Schifffahrt eingestellt werden. Der Indikator bildet Einschränkungen für die Binnenschifffahrt beispielhaft über die Pegel Köln, Rees (nur GIW) und Ruhrort ab.

Für die Auswertung der Schifffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen bzw. Beschränkungen der Abladetiefe wurden die jährlichen Höchstwerte anstelle der

durchschnittlichen Überschreitungen der Pegelstände genutzt. Die einzelnen Messwerte des HSW gelten jeweils für das hydrologische Jahr (01.11. - 31.10.); jene des GIW für das jeweilige Wasserhaushaltsjahr (01.04. - 31.03.).

Die Anzahl der Tage, an denen die Schifffbarkeit des Niederrheins aufgrund von Niedrigwasser eingeschränkt ist, unterliegt großen Schwankungen. Eine signifikante Trendentwicklung liegt bisher nicht vor. In der in Abbildung 48 dargestellten Datenreihe sind durchschnittlich 20 Tage im Jahr mit Beschränkungen der Abladetiefe aufgeführt. Die Zeitreihe zeigt deutlich den Einfluss von Wetterextremen. So kam es infolge der langanhaltenden Trocken- und Hitzeperiode im Sommer 2018 zu Beschränkungen der Abladetiefen, die mehr als 120 Tage galten. Solche dauerhaften Unterschreitungen des gleichwertigen Wasserstandes (GIW) traten zuletzt in den Jahren 1972 und 1963 auf. In diesen beiden Jahren waren die Einschränkungen jedoch über-



wiegend dem Einfluss der Speicherbewirtschaftung im Alpenraum geschuldet, die ab den Jahren 1960 - 1970 für eine Änderung des Niedrigwasserabflusses sorgte. Betrachtet man nur den Zeitraum 1991 - 2020, deutet sich eine Zunahme der Tage mit Niedrigwassereinschränkungen an.

Infolge von Hochwasser kann es ebenfalls zu Einschränkungen der Binnenschifffahrt auf dem Rhein kommen. Im Mittel über die Zeitreihe traten jährlich 14 Tage mit hochwasserbedingten Einschränkungen auf (Überschreitung der HSW-I-Marke) (Abbildung 49).

An durchschnittlich zwei Tagen im Jahr musste die Schifffahrt wegen einer Überschreitung des höchsten schiffbaren Wasserstands (HSW-II-Marke) eingestellt werden. In den 1980er und 1990er Jahren führten Überschreitungen der HSW II zu längeren Sperrungen des Niederrheins. In den 2000er und 2010er Jahren kommen Sperrungen hingegen weniger häufig auf dem Niederrhein vor. Dies ist auch auf Maßnahmen des Hochwassermanagements zurückzuführen. Überschreitungen der HSW-I-Marke kommen hingegen auch in jüngerer Vergangenheit noch regelmäßig vor.

Das Niedrigwasserjahr 2018

Die heißen Temperaturen des Sommers 2018 sind sicherlich vielen Menschen in Erinnerung geblieben. Dieses Jahr zeichnete sich zudem durch eine extreme Trockenheit aus. Die langanhaltende Trockenheit führte dazu, dass die Pegelstände kräftig fielen und die Abladetiefe für die Binnenschiffe auf dem Niederrhein insgesamt über vier Monate lang beschränkt werden musste. Solche Beschränkungen führen zunächst dazu, dass Binnenschiffe ihre Ladekapazitäten nicht voll ausschöpfen können. Bei extrem niedrigen Pegelständen müssen die Abladetiefen dann soweit eingeschränkt werden, dass ein wirtschaftlicher Betrieb von Binnenschiffen kaum noch möglich ist. Dies hat nicht nur Folgen für die Schifffahrtsunternehmen, sondern auch für die am Rhein ansässige Industrie, die auf die Binnenschiff-

fahrt angewiesen ist (BfG 2019). So musste Shell die Produktion in seinen Raffinerien Köln-Godorf und Wesseling zurückfahren, wodurch es sogar zu Versorgungsengpässen von Tankstellen im Rheinland kam (Witsch 2018). Ein Binnenschiff hat eine Ladekapazität von ca. 100 LKW bzw. 31 Kesselwaggons, weswegen die betroffenen Industrieunternehmen aus Kapazitätsgründen Zulieferung und Abtransport fertiger Produkte nicht vollständig auf die Schiene bzw. Straße verlagern können (Klose 2019).

Mittelfristig strebt beispielsweise Shell, den Transport über die Schiene an sowie Lagerungskapazitäten zu erhöhen, um Engpässe durch Einschränkungen der Binnenschifffahrt besser abfedern zu können (Klose 2019).





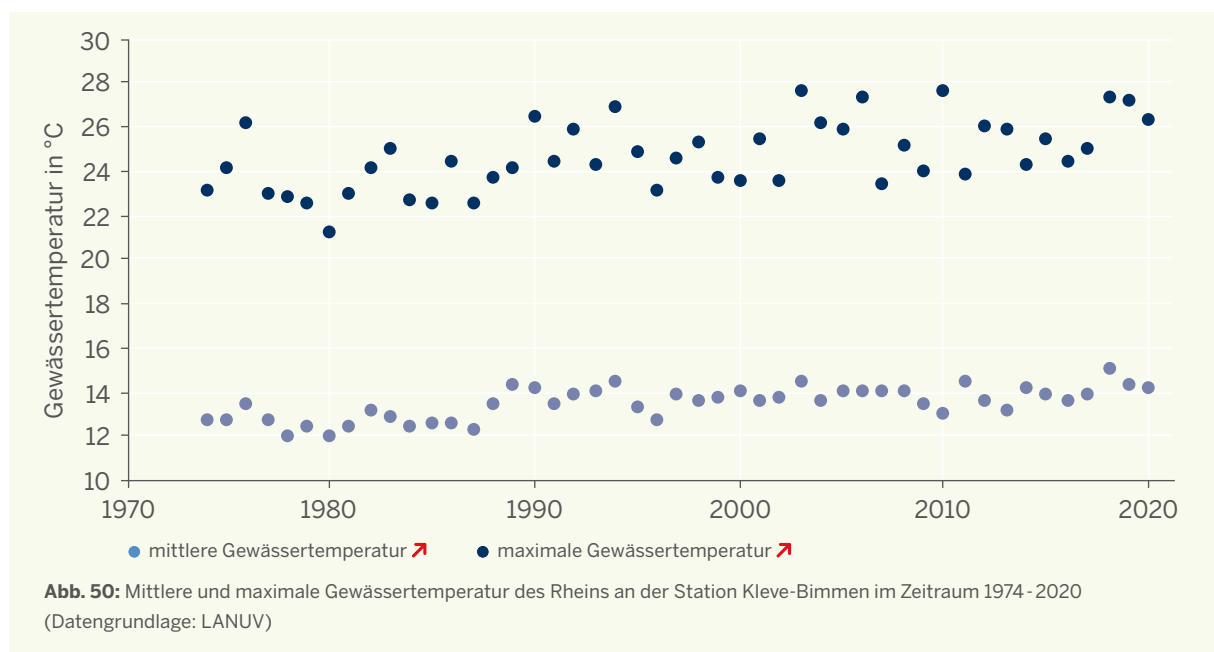
4.7 Gewässertemperatur fließender Gewässer

I

Die Gewässertemperatur im Rhein steigt an

Mit dem klimawandelbedingten Anstieg der mittleren Lufttemperatur gehen auch extreme Hitzeereignisse einher. Die Wassertemperatur von Gewässern wird von der Lufttemperatur beeinflusst und unterliegt wie diese natürlichen Schwankungen im Laufe eines Tages und Jahres.

In vielen Gewässern Nordrhein-Westfalens beeinflussen zusätzlich Abwärmeeinleitungen von Industrie und Kraftwerken die Gewässertemperatur. Die Wassertemperatur wirkt sich auf die Gewässerbiozönose, insbesondere auf die Fischfauna, aus.



Als Indikator wird die mittlere und maximale Gewässertemperatur im Jahr verwendet (Abbildung 50). Grundsätzlich wäre ein thermisch unbeeinflusstes Gewässer für den Nachweis des Klimawandels besser geeignet, jedoch gibt es in NRW keine Messstelle mit einer solch langen Datenreihe. Für das Klimafolgen- und Anpassungsmonitoring NRW wurde die internationale Station Kleve-Bimmen (Rhein-km-865) ausge-

wählt. Die Station wurde 1970 eröffnet und wird heute in Kooperation deutscher und niederländischer Gewässerüberwachung betrieben. Seit 1974 werden dort kontinuierliche Temperaturmessungen durchgeführt. Darüber hinaus haben für den Rhein Wärmeeinleitungen abgenommen (IKSR 2006), sodass davon ausgegangen werden kann, dass Temperaturerhöhungen auf den Klimawandel zurückzuführen sind.

Im Mittel betrug die jährliche mittlere Gewässertemperatur im Zeitraum 1974–2020 an der Station Kleve-Bimmen 13,5 °C und die maximale Gewässertemperatur 24,7 °C. Zwischen 1974 und 2020 hat die mittlere Wassertemperatur des Rheins an dieser Station um rund 1,7 K zugenommen. Die maximale Wassertemperatur ist in dem gleichen Zeitraum um rund 2,9 K gestiegen. Beide Trends sind statistisch signifikant. Seit 2003 steigen die maximalen Wassertemperaturen erstmals über 27 °C an, und das in den Jahren 2018 und 2019 zum ersten Mal in Folge.

Der Temperaturanstieg an der Station Kleve-Bimmen ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf den Klimawandel zurückzuführen, da nach Angaben der Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) die anthropogenen Wärmeeinleitungen in den Rhein im Zeitraum 1989 bis 2004 abgenommen haben (IKSR 2006). Obwohl die hier dargelegten Daten aufgrund der oben genannten Gründe nicht vollständig den Ansprüchen zur Ermittlung von Klimafolgen genügen, ergeben vergleichbare Auswertungen der IKSR am Rhein ähnliche Werte (IKSR 2013).

Auswirkung der steigenden Gewässertemperatur auf Fischbestände

Besonders in trockenen und warmen Sommern kann ein Anstieg der Gewässertemperaturen zu großen Problemen in stehenden Gewässern führen. Fische leiden unter zu hohen Temperaturen. Je höher die Temperatur des Wassers ist, desto weniger Sauerstoff kann darin gelöst werden. 25 °C Gewässertemperatur sind nach der Oberflächengewässerverordnung (OGewV) eine erste Warngrenze. Falls die Gewässertemperatur an mehreren aufeinanderfolgenden Tagen über dieser Grenze bleibt, kann dies zu Fischsterben führen. Der geringere Sauerstoffgehalt des Wassers hat zur Folge, dass der Stoffwechsel der Fische gestört wird und diese im schlimmsten Fall ersticken (DAFV 2018). Die geringsten Sauerstoffwerte treten vor allem am frühen Morgen auf, da in der Nacht die Sauerstoffzehrung, bei zeitgleich fehlender Sauerstoffproduktion durch die fehlende Photosynthese der Algen und höheren Pflanzen, den Sauerstoffgehalt zunehmend reduziert.

Falls eine Erhöhung der Wassertemperatur und die Absenkung des Sauerstoffgehaltes unerkannt oder unbehandelt bleiben, kann dies verheerende Folgen für die Fischbestände haben. Eine solche Situation trat 2018 in Münster auf. Nach einer Reihe von heißen Tagen hatte der Aasee einen so geringen Sauerstoffgehalt, dass gut 90 % der Fischbe-



stände verendeten. 20 Tonnen tote Fische wurden aus dem See entnommen. Gleichzeitig versuchte die Feuerwehr mit Hochleistungspumpen dem See wieder Sauerstoff zuzuführen, um eventuell überlebende Fische vor dem Ersticken zu bewahren (WDR 2018).

In Fließgewässern findet durch die strömungsbedingte Umwälzung des Wassers ein stetiger Austausch mit der Luft statt, sodass in vielen Fließgewässern wie dem Rhein die Sauerstoffsättigung zumeist ausreichend hoch ist und die tageszeitlichen Schwankungen im Vergleich zu vielen Seen geringer ausfallen. Hier ist es den Fischen zudem möglich, sogenannte „Kältereferugien“ aufzusuchen, wo zum Beispiel aufgrund von Strömungen und Schattenwurf die Gewässertemperatur geringer als im Rest des Gewässers ist (Landesregierung NRW 2018).



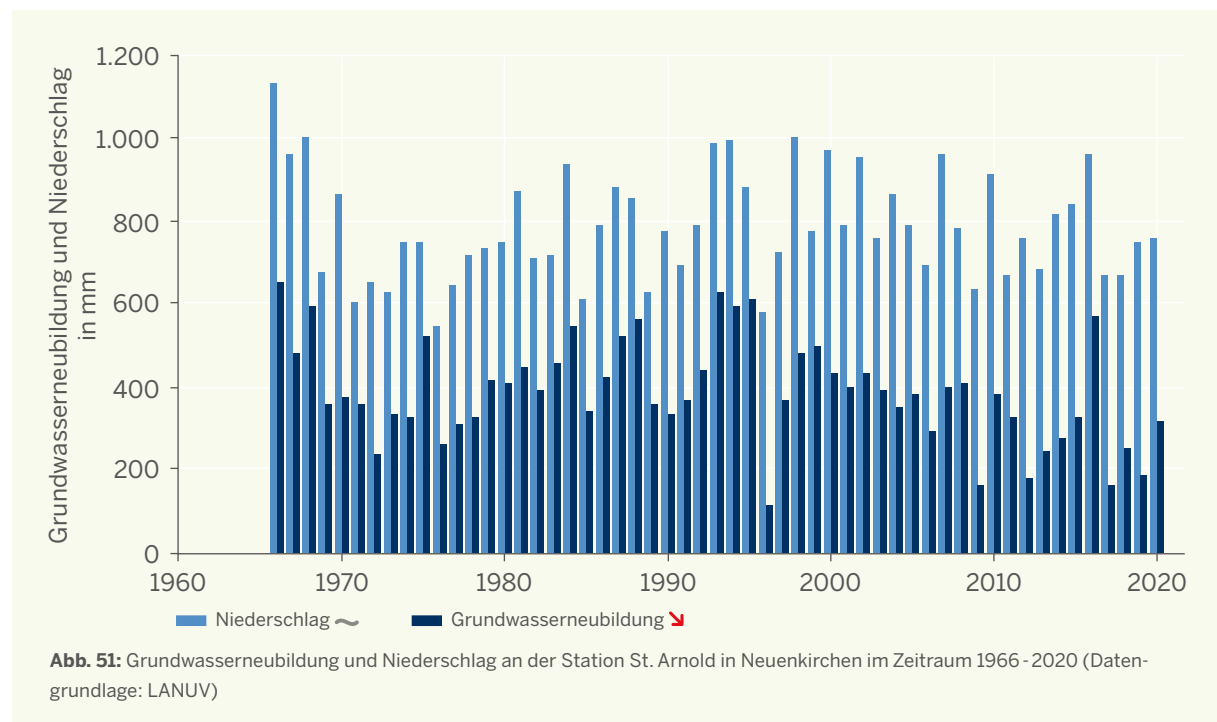
4.8 Grundwasserneubildung

I

Die Grundwasserneubildung ist tendenziell rückläufig

Die Grundwasserneubildung und Grundwasserstände sind von einer Vielzahl unterschiedlicher Einflussgrößen abhängig. Primär führen steigende Temperaturen zu einer höheren Verdunstung und Evapotranspiration. Wird dies nicht durch steigende Niederschlagsmengen kompensiert, kommt es zu einer Abnahme der Grundwasserneubildung.

Allerdings ändern sich diverse klimatische Rahmenbedingungen und damit Niederschlagsmengen und ihre regionale Verteilung, sodass sich die Grundwasserneubildung in unterschiedlicher Hinsicht ändern kann.



Die Grundwasserneubildung wird als „Zugang von infiltriertem Wasser zum Grundwasser“ (Sickerwasser, DIN 4049-3) definiert. Gemessen wird sie mithilfe eines Lysimeters. Hierbei handelt es sich um ein Auffangbehältnis, welches in den Boden eingelassen wird, um am Grund das durchgesickerte Niederschlagswasser in einem Messgefäß zu erfassen. Zur genaueren Bilanzierung werden die Parameter Sonnenscheindauer, Globalstrahlung, Lufttemperatur, relative Feuchte, Wind, Oberflächenabfluss und Niederschlag erfasst. Aus diesen zusätzlichen Parametern können Evaporations-, Transpirations-, und Interzeptionsverluste herausgerechnet werden. Als Indikator wird die mittlere Grundwasserneubildung im hydrologischen Jahr (1. November bis 31. Oktober) verwendet. Die Monate November und Dezember werden jeweils aus dem vorigen Kalenderjahr in die Berechnung mit einbezogen.

Die in Abbildung 51 dargestellten Daten für den Indikator stammen aus St. Arnold in Neuenkirchen. Seit 1965 betreibt das LANUV an diesem Standort eine Großlysimeteranlage. Dargestellt wird die Grundwasserneubildung in Millimetern (mm) unter Grünland im Vergleich zur Niederschlagssumme an derselben Station in mm von 1966 - 2020.

An der Lysimeterstation in St. Arnold lag die jährliche Grundwasserneubildung (Wasserwirtschaftsjahr) im Mittel über den Zeitraum 1966 - 2020 bei etwa 390 mm (Abbildung 51). An den Messwerten ist zu erkennen, dass die Grundwasserneubildung seit 1966 zurückgegangen ist. Über den Gesamtzeitraum fand eine statistisch signifikante Abnahme der Grundwasserneubildung um 145 mm statt. Eine Ausnahme bildet das Jahr 2016. Mit 572 mm weist dieses Jahr einen vergleichsweise hohen Wert auf. Dies ist insbesondere auf vergleichsweise hohe Niederschläge im Winter zurückzuführen.

Die Niederschläge zeigen im gleichen Zeitraum keinen signifikanten Trend. Dies deutet darauf hin, dass die abnehmende Grundwasserneubildung vor allem auf die steigenden Lufttemperaturen und die damit verbundenen höheren Evapotranspirationsraten zurückzuführen ist.



Wasserhaushaltsmodell mGROWA zur Simulation der zukünftigen Grundwasserneubildung

Die zukünftige Grundwasserneubildung kann mithilfe von Modellberechnungen rasterbasiert ermittelt werden. In einem Teilprojekt des Kooperationsprojektes GROWA+ NRW 2021 (LANUV 2021d) wurden Klimaprojektionen durchgeführt, um die zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserneubildung regional und landesweit in NRW darstellen zu können (Hermann et al. 2021). Dazu wurden Projektionen mit einem Multi-Modell-Ensemble bis zum Jahr 2100 sowie statistische Analysen der projizierten Veränderung der Grundwasserneubildung durchgeführt. Das Multi-Modell-Ensemble besteht aus den im Verbundprojekt ReKliEs-De bereitgestellten Klimaprojektionen und dem in Nordrhein-Westfalen auf Landesebene etablierten Wasserhaushaltsmodell mGROWA. Insgesamt wurden 37 potenzielle Entwicklungspfade für eine zukünftige Grundwasserneubildung untersucht. Die Ergebnisse sind im Teilbericht IX des LANUV-Fachberichtes 110 (LANUV 2021d) dargestellt.

Nach Betrachtung der Änderungssignale und der Robustheit ergibt sich in den Großlandschaften und NRW-weit aus den Projektionen für die Szenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 eine geringe Anzahl signifikanter Änderungssignale für die Grundwasserneubildung. Die vor allem durch zunehmende Winterniederschläge in den Projektionen bedingte Stabilisierung der Grundwasserneubildung überwiegt gegenüber den in der Mehrheit als trockener projizierten Sommer- und Herbstniederschlägen leicht.

Demnach konnte in dieser Studie für die Zukunft kein robustes Änderungssignal in den Projektionen entdeckt werden. Dies bedeutet, dass Ende des 21. Jahrhunderts das Niveau der Grundwasserneubildung ungefähr dem derzeitigen Referenzniveau entspricht (Hermann et al. 2021). Allerdings deuten die mit dem gleichen Ansatz modellierten Ergebnisse der Grundwasserneubildung im Zeitraum 1961 - 2020 darauf hin, dass zuletzt die Grundwasserneubildung zurückgegangen ist (Hermann und Wendland 2021). Zusätzlich zeigen die Klimaprojektionen zur Klimatischen Wasserbilanz tendenziell eher in Richtung Rückgang gegenüber der Referenzperiode 1971 - 2000. In wie weit sich die aktuelle beobachtete Situation mit der sinkenden Grundwasserneubildung fortsetzen wird und was die neue Generation von Projektionen an neuen Ergebnissen liefert (diese werden zum neuen IPCC-Sachstandsbericht 2022 verstärkt in Anwendung kommen), wird sich zeigen.

Die Zunahme von Starkregenereignissen kann von globalen Klimamodellen noch nicht abgedeckt werden. Diese sind in Indikator 2.4 „Niederschlags-extreme“ und Abschnitt 5.4 „Regenerosivität“ dargestellt. Die Regenmassen dieser Ereignisse infiltrieren schlechter und gehen direkt durch die Vorfluter zum größten Teil verloren. Auch der Einfluss des schwindenden arktischen Meereises wird in den aktuellen Modellen noch nicht gut abgedeckt.



4.9 Grundwasserstand

I

Trockenheit verringert Grundwasserstände

Der Grundwasserstand hängt von einer Vielzahl unterschiedlicher Einflussgrößen ab. Die sich ändernden klimatischen Rahmenbedingungen wirken sich durch höhere Evapotranspirationsraten, Verkürzung des Grundwasserneubildungszeitraumes und Änderungen in Niederschlagsmenge und -verteilung überwiegend nachteilig auf die Grundwasserneubildung aus. Gleichzeitig nehmen Versiegelung und ein möglicherweise höherer Wasserbedarf, beispielsweise für Bewässerungszwecke, Einfluss auf den Grundwasserstand. Aufgrund der eher trägen Reaktion

von Grundwässern im Vergleich zu Oberflächengewässern, spiegeln Grundwasserstände langfristige Änderungen der klimatischen Änderungen wider. Dabei kann der Einfluss des Menschen das Signal sich verändernder Klimaparameter auf die Grundwasserstände überdecken. Da die Grundwasserneubildung hierzulande überwiegend im hydrologischen Winterhalbjahr (November bis April) stattfindet, ist vor allem die Entwicklung der Winter-Niederschläge Ausschlag gebend.

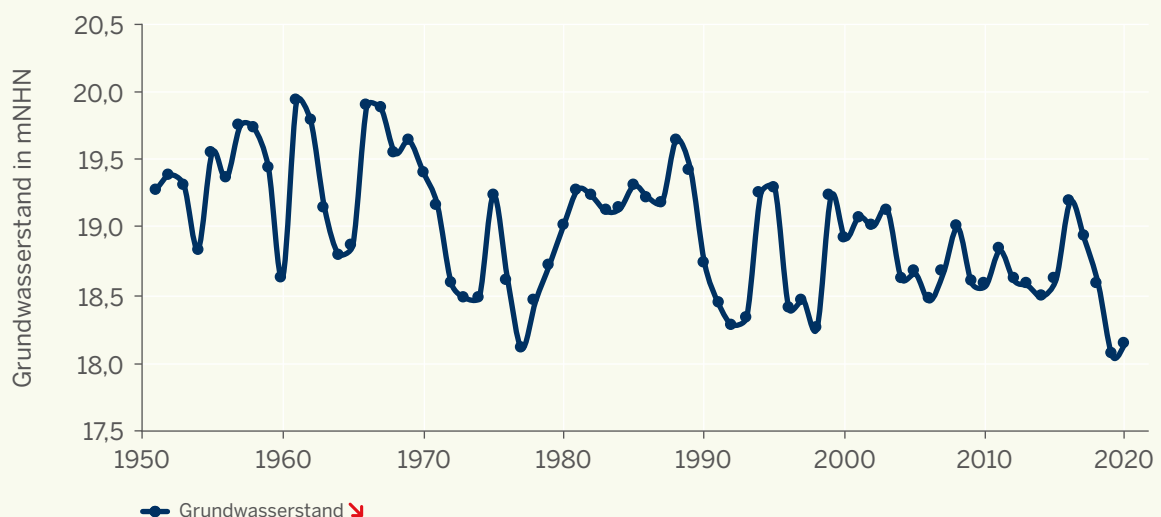


Abb. 52: Grundwasserstand der Station Bislicher Wald in Hamminkeln für die Wasserwirtschaftsjahre (WWJ) 1951 - 2020 (Datengrundlage: LANUV)



Als Indikator wird der mittlere Grundwasserstand des Wasserwirtschaftsjahres (WWJ, 01.11. bis 31.10.) verwendet (Abbildung 52). Dabei werden die Monate November und Dezember jeweils aus dem vorigen Kalenderjahr in die Berechnung mit einbezogen.

Der Grundwasserstand wird anhand des als Abstich gemessenen Grundwasserspiegels als Höhe über dem Meeresspiegel in Meter über Normalhöhennull (mNHN) angegeben. Als Abstich wird der Höhenunterschied zwischen Messpunkt und dem Grundwasserspiegel bezeichnet. Der Grundwasserstand wird an Grundwassermessstellen erfasst. Die hier abgebildete Station Bislicher Wald in Hamminkeln wurde exemplarisch für Nordrhein-Westfalen ausgewählt, da der anthropogene Einfluss hier gering ist und die Messwerte somit für eine Analyse der natürlichen bzw. klimatisch bedingten Änderungen des Grundwasserstandes geeignet sind.

Über den Zeitraum der WWJ 1951 - 2020 lag der Grundwasserstand an der Station Bislicher Wald im Mittel bei 19,0 mNHN. Der Grundwasserstand ist seit Beginn der Messung im Jahr 1951 um rund 0,9 m signifikant gesunken.

In den 1970er Jahren sank der Grundwasserstand besonders deutlich aufgrund der geringen Niederschläge in diesen Jahren. Im Jahr 2019 lag der Grundwasserstand mit 18,0 mNHN an der Station Bislicher Wald auf einem neuen Tiefstand. Auch 2020 lag der Wert nur geringfügig über diesem Tiefstand. Dies ist vor allem auf den trockenen und warmen Sommer 2018 zurückzuführen, da sich die Trockenheit in den tieferen Bodenschichten erst mit Verzögerung zeigt. Hinzu kam, dass im Herbst und Frühjahr in den letzten Jahren ebenfalls Niederschläge ausblieben. Mit 2019 und 2020 folgten danach weitere Jahre mit unterdurchschnittlichen Niederschlägen und erhöhter Evapotranspiration, sodass sich die Grundwasservorräte nicht wieder auffüllen konnten.



4.10 Wasserentnahme der öffentlichen Wasserversorgung

I

Heiße Sommer führen zu einem erhöhten Bedarf der öffentlichen Wasserversorgung

Der durch die Temperaturzunahme herbeigeführte Schwund des polaren Meereises führt dazu, dass der Polarfront-Jetstream stärker mäandriert. Infolgedessen können sich sehr warme und trockene Wetterlagen oder sehr nasse Wetterlagen über längere Zeiträume im Jahresverlauf in NRW etablieren. Paradebeispiele hierfür sind das Jahr 2018, das eine besonders heiße und trockene Periode aufwies – oder das Jahr 2021, welches in Teilen sehr nass war.

Anhand der beobachteten Daten und Klima-Projektionen zeigt sich, dass in den Sommermonaten die Gefahr für Trockenstress zugenommen hat und auch weiter zunehmen wird. Hitzetage und Trockenheit sorgen für erhöhten Wasserverbrauch, unter anderem auch, weil mehr Wasser für Garten und Freizeit, wie zum Beispiel für private Swimmingpools, genutzt wird.

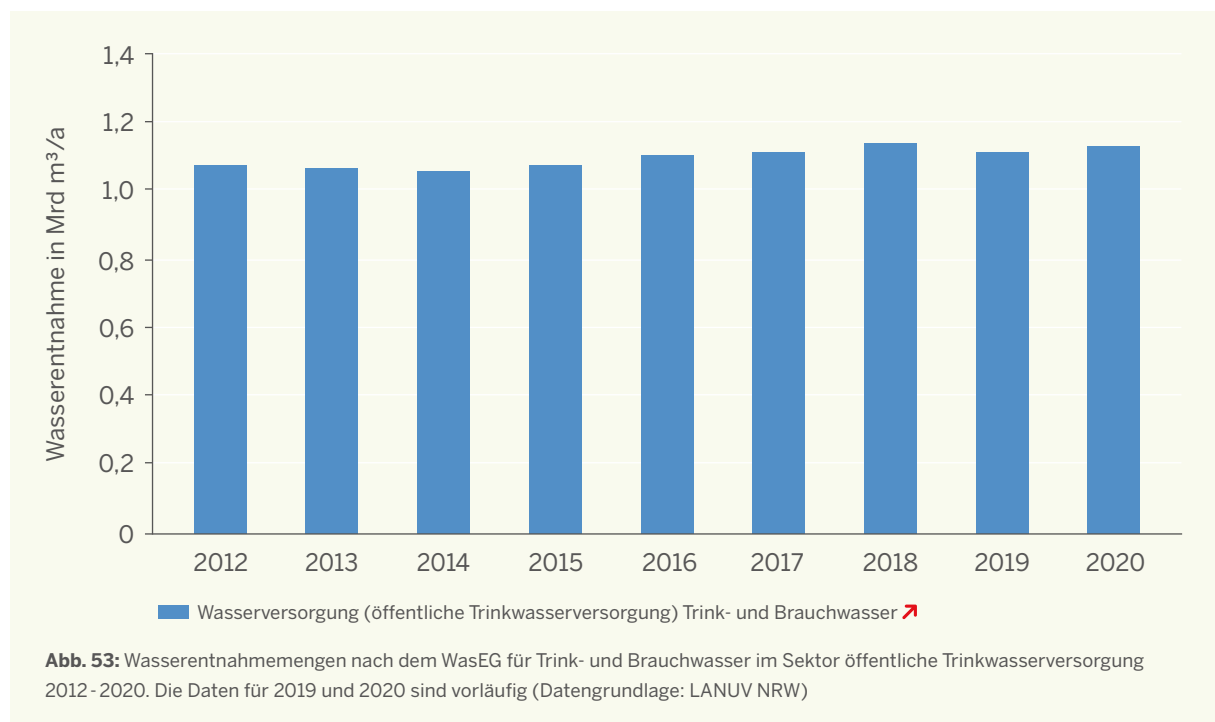


Mithilfe der Wasserentnahme der öffentlichen Trink-/ Brauchwasserversorgung, dargestellt in Abbildung 53, ist es möglich, den indirekten Einfluss extremer Hitze und Trockenheit auf den Wasserbedarf zu erfassen. Als Indikator wird die im Rahmen des Wasserentnahmeentgeltgesetzes (WasEG) erfasste Wasserentnahmemenge für Trink- und Brauchwasser im Wirtschaftszweig „Trinkwasser (öffentliche Wasserversorgung)“ verwendet, die systematisch ab dem Jahr 2012 vorliegt. Aufgrund der Festsetzungsfrist von zwei Jahren handelt es sich bei den Daten 2019 und 2020 um vorläufige Daten.

Bei Betrachtung der relativ kurzen Zeitreihe erkennt man bis zum Jahr 2014 zunächst eine kleine Abnahme der Wasserentnahmemenge und dann eine stärkere Zunahme ab dem Jahr 2015. Die Trendanalyse ergibt für die gesamte Zeitreihe einen statistisch signifikant steigenden Trend. Entlang der linearen Trendgeraden ergibt sich ein Anstieg von 0,076 Mrd m³/a. Es lässt sich in dieser Zeitreihe ablesen, dass das Jahr

2018 mit seiner Trockenheit und andauernd hohen Temperaturen zu dem im Betrachtungszeitraum höchsten Wert bei der Wasserentnahme geführt hat. Hierfür verantwortlich sind vor allem die zusätzliche Gartenbewässerung, Poolbefüllungen und mehrmaliges Duschen.

Nachdem die Wasserentnahmemenge 2019 deutlich unter der Menge von 2018 lag, stieg sie im Jahr 2020 wieder an und lag knapp unter der Menge von 2018. Der Anstieg in 2020 ist neben den hohen Temperaturen möglicherweise zusätzlich auf die Coronapandemie zurückzuführen. Durch Lockdown und geschlossene Schwimmbäder haben viele Menschen einen Pool gekauft und zuhause „Badeurlaub“ gemacht.





5. Boden

Ohne einen gesunden Boden kann sich keine vitale Flora oder Fauna entwickeln und auch keine ertragreiche Landwirtschaft betrieben werden, die für eine Versorgung mit hochwertigen Lebens- und Futtermitteln unerlässlich ist. Darüber hinaus nehmen Böden eine wichtige Ausgleichsfunktion für die Atmosphäre und den Wasserhaushalt wahr, sie dienen als bedeutender Kohlenstoffspeicher und sorgen für den Ab- und Umbau organischer Substanzen, die Umwandlung und Filterung von Stoffen sowie die Mobilisierung von Nährstoffen.

Daher ist es wichtig, unversiegelte Flächen zu sichern, naturnahe Böden vor zunehmender Inanspruchnahme, Erosion und verdichtungsbedingten Gefügeschäden zu schützen, Flächen in urbanen Räumen zu entsiegeln und die Wasserspeicher- und Kühlleistungsfähigkeit sowie die Kohlenstoffspeicherung von Böden zu erhalten bzw. zu verbessern. Nur durch den Erhalt oder die Schaffung vegetationsgeprägter Freiflächen, die der Frisch- und Kaltluftversorgung hitzebelasteter Siedlungsbereiche, der Wasserspeicherung oder der Grundwasserneubildung dienen, können Folgen des Klimawandels, wie das verstärkte Auftreten von Sturzfluten aufgrund von Starkregenereignissen oder zunehmende städtische Wärmeinseleffekte, abgemildert werden.

Um den Schutz und die Wiederherstellung von Bodenfunktionen auch unter Klimawandelbedingungen durch geeignete Anpassungsmaßnahmen zu ermöglichen, ist eine Erhebung der Veränderungen der Bodenbeschaffenheit bzw. der Bodenqualität von hoher Bedeutung.

Auswirkungen des Klimawandels

Durch den Klimawandel steigen die Lufttemperaturen. Dies führt dazu, dass sich der Boden ebenfalls erwärmt. Höhere Bodentemperaturen bewirken eine Beschleunigung der biologischen Prozesse im Boden. Bei ausreichender Wasserversorgung bewirkt der Temperaturanstieg ein erhöhtes Bodenleben, einen verstärkten Stoffumsatz im Boden und einen beschleunigten Abbau der organischen Substanz, des Humus, unter erhöhter Freisetzung von CO₂. Somit kann durch den Klimawandel Humus als wichtiger Nährstoff- und Kohlenstoffspeicher schwinden und zusätzlich treibhauswirksames CO₂ in die Atmosphäre abgegeben werden. Der Klimawandel wird infolgedessen weiter angetrieben.

Ein verstärkter Stoffumsatz führt zu einer Erhöhung der Nährstoffe im Boden. Diese können zusätzlich zu anthropogen eingebrachten Stoffen, wie etwa Nitrat aus der Düngung, durch Sickerwasser in das Grundwasser ausgewaschen werden. Das Risiko für Auswaschungen erhöht sich im Winter durch zunehmende Niederschläge mit vermehrter Sickerwasserbildung.

Voraussichtlich steigt in Zukunft die Niederschlagsmenge während des Winterhalbjahres weiter (Hübener et al. 2017). Dies könnte zur Folge haben, dass vermehrt Ackerflächen von Staunässe betroffen sind. Wo über einen längeren Zeitraum Staunässe herrscht, finden die Zersetzungsprozesse organischer Materialien nur noch unter Luftabschluss statt. Unter diesen Bedingungen wird mehr Lachgas und Methan freigesetzt, was den Klimawandel weiter verstärkt. Zusätzlich wirkt sich Staunässe negativ auf das Bodengefüge aus.

Nicht nur für die Stoffumsetzung wird Bodenwasser benötigt, auch für das Pflanzenwachstum ist es von besonderer Bedeutung. Die Wasserspeicherefähigkeit der Böden sowie die Verfügbarkeit des Bodenwassers für Pflanzen hängen dabei stark von der Bodenart ab und werden zusätzlich durch die regionalen Niederschlagsverhältnisse beeinflusst. Durch die Niederschlagsabnahme im Frühling, sowie der Stagnation im Sommer (Indikator 2.2 „Durchschnittliche Jahreszeiteniederschlagssumme“) und die durch die Temperaturerhöhung (Indikator 1.2 „Durchschnittliche Jahreszeitenlufttemperatur“) verstärkte Verdunstung (Indikator 4.2 „Evapotranspiration“) kann es zur Austrocknung des Bodens kommen. Falls nicht ausreichend Bodenwasser vorhanden ist, führt dies zu einer Verringerung der Pflanzenproduktivität.

Ein ausgetrockneter Boden kann das Wasser bei Starkniederschlagsereignissen mit hohen Niederschlagsmengen in kurzer Zeit nur schlecht infiltrieren und wird durch oberflächiges Abfließen abgetragen. Auch der umgekehrte Fall, wenn der Boden im Winter wassergesättigt ist, führt dazu, dass Starkniederschläge nicht vom Boden aufgenommen werden können, oberflächlich abfließen und viel Boden abtragen. Diese Erosion tritt vor allem in Hanglagen auf.

Indikatoren-Kernaussagen:

- Die Bodentemperatur nimmt an den untersuchten Messstationen zu.
- Die Datenreihen über Humusvorräte sind noch zu kurz für Aussagen.
- Die Regenerosivität nimmt zu.
- Unversiegelte Flächen sind essenziell für die Anpassung an den Klimawandel.



Tab. 7: Übersicht der Indikatoren zum Handlungsfeld 5 „Boden“

Indikator	Einheit	räumlicher Bezug	Zeitreihe	Mittelwert Zeitreihe	Trend Zeitreihe	
5.1 Bodentemperatur	°C	Essen-Bredene 5 cm Tiefe	1951 - 2020	10,4	↗	
	°C	Essen-Bredene 50 cm Tiefe	1951 - 2020	10,6	↗	
	°C	Essen-Bredene 2 m über Boden	1951 - 2020	10,0	↻	
	°C	Köln-Bonn 5 cm Tiefe	1961 - 2020	11,4	↗	
	°C	Köln-Bonn 50 cm Tiefe	1961 - 2020	11,4	↗	
	°C	Waldfeucht 5 cm Tiefe	1993 - 2020	11,8	↗	
	°C	Waldfeucht 50 cm Tiefe	1993 - 2020	11,6	↗	
5.2 Bodenfeuchte	Vol. %	Gevenich 5 cm Tiefe	2012 - 2019	23,5	↘	
	Vol. %	Gevenich 20 cm Tiefe	2012 - 2019	23,4	↘	
	Vol. %	Gevenich 50 cm Tiefe	2012 - 2019	24,5	↘	
	Vol. %	Schöneseiffen 5 cm Tiefe	2010 - 2020	27,6	~	
	Vol. %	Schöneseiffen 20 cm Tiefe	2010 - 2020	33,6	~	
	Vol. %	Schöneseiffen 50 cm Tiefe	2010 - 2020	33,7	~	
5.3 Humusvorrat	t/ha	Niederrheinisches Tiefland Oberboden bis 60 cm Tiefe	2009, 2012, 2015, 2018	125,1	-	
	t/ha	Niederrheinische Bucht Oberboden bis 60 cm Tiefe	2009, 2012, 2015, 2018	114,6	-	
	t/ha	Westfälische Bucht Oberboden bis 60 cm Tiefe	2009, 2012, 2015, 2018	194,0	-	
	t/ha	Mittelwert Oberboden bis 60 cm Tiefe	2009, 2012, 2015, 2018	144,6	-	
5.4 Regenerosivität	N/h-a	NRW	1973 - 2020	80,0	↻	
5.5 Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche	ha/d	NRW	1997 - 2017 (Datengrundlage: ALB)	13,1	↘	
	ha/d	NRW	2017 - 2020 (Datengrundlage: ALKIS)	6,3	-	

↗ steigender Trend

↘ fallender Trend

↻ Trend mit Trendumkehr: zuerst fallend, dann steigend

↻ Trend mit Trendumkehr: zuerst steigend, dann fallend

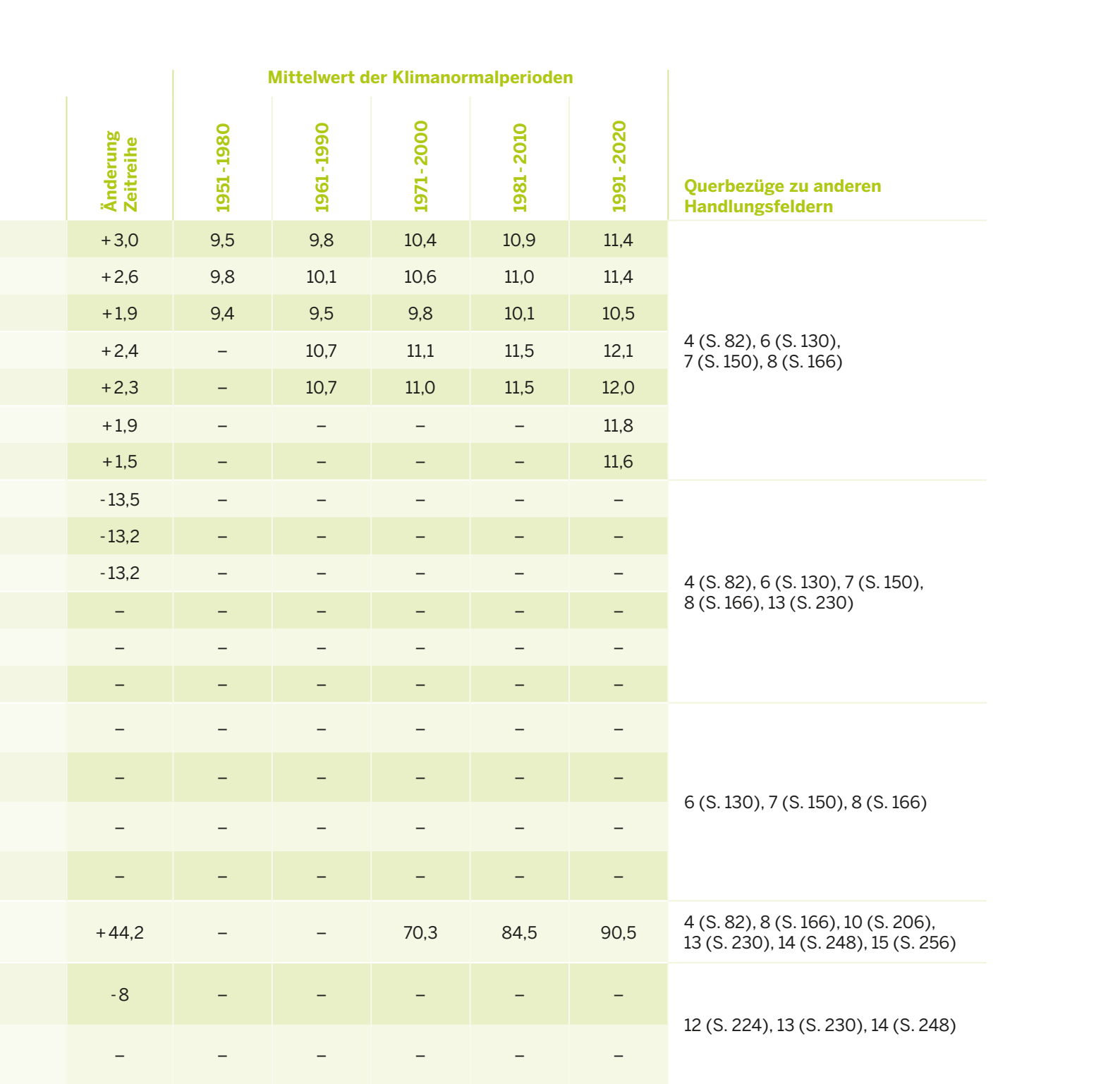
~ kein Trend



günstige Entwicklung

ungünstige Entwicklung

keine Bewertung der Entwicklung möglich oder gleichzeitig günstige und ungünstige Entwicklungsaspekte vorhanden





5.1 Bodentemperatur

I

Der Boden wird wärmer

Die Bodentemperatur wird von der Lufttemperatur beeinflusst. Sie unterliegt wie diese natürlichen Schwankungen im Laufe eines Tages und Jahres. Höhere Lufttemperaturen und zunehmende Sonnenscheindauer führten in den vergangenen Jahren zu

einem Anstieg der Bodentemperaturen. Der Wärmehaushalt von Böden beeinflusst beispielsweise die Aktivität von Bodenorganismen und die damit in Verbindung stehende Entwicklung von Humus im Boden.

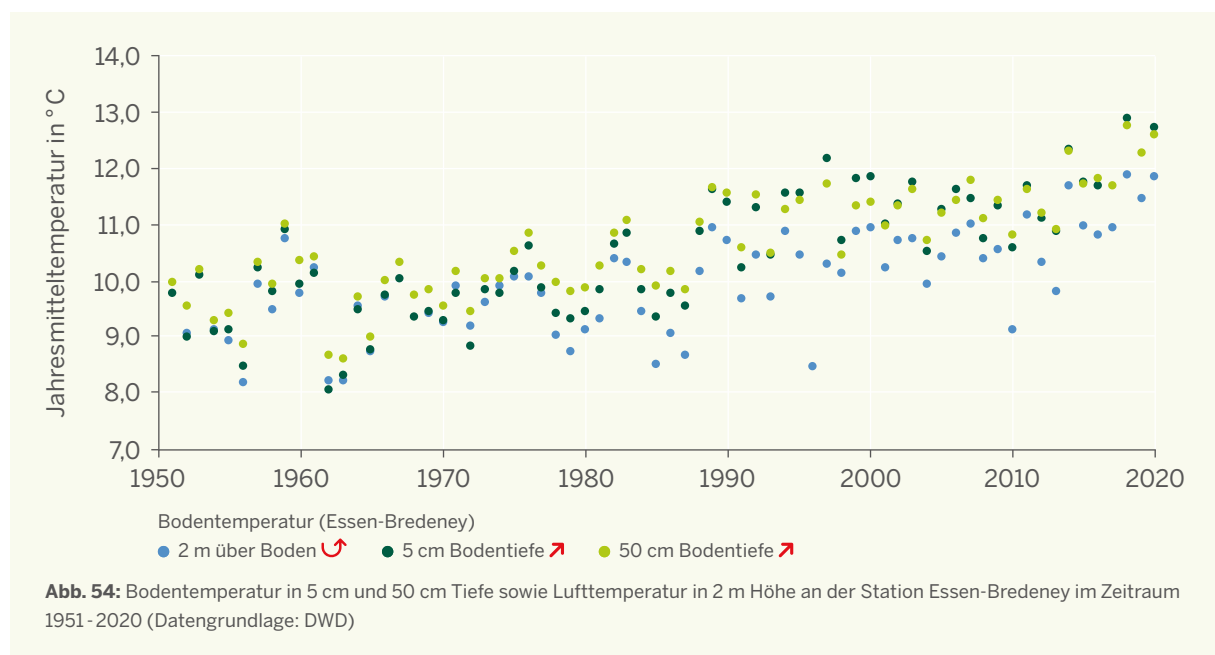


Abbildung 54 zeigt die Zeitreihe der DWD-Station Essen-Bredeney. Die Zeitreihe Essen-Bredeney zeigt, dass die Bodentemperaturen von 1951 bis heute stark angestiegen sind. Dies lässt sich statistisch signifikant nachweisen. Die höchsten Werte der Bodentemperatur wurden in den Jahren 2018, 2020 und 2014 erreicht, die auch bezogen auf die Lufttemperatur die drei wärmsten Jahre in NRW darstellen (Indikator 1.1 „Durchschnittliche Jahreslufttemperatur“). Im Klimafolgen- und Anpassungsmonitoring NRW werden für den Indikator

Bodentemperatur ebenfalls die Zeitreihen der DWD-Station Köln-Bonn und der LANUV-Station Waldfeucht verwendet (Tabelle 7). Die Bodentemperaturen liegen an allen drei betrachteten Standorten (Tabelle 7) im Jahresmittel über denen der Lufttemperatur. Auch die Temperaturzunahme ist bei der Bodentemperatur stärker ausgeprägt als bei der Lufttemperatur. Dies könnte auf die trägere Reaktion des Bodens auf Temperaturschwankungen zurückzuführen sein.

Wie reagieren Regenwürmer auf den Klimawandel?

Höhere Bodentemperaturen wirken sich direkt auf Bodenorganismen aus. Das Temperaturoptimum für heimische Regenwurmarten liegt im Bereich zwischen 10 °C und 15 °C (LUBW 2012). Daher sind Regenwürmer bei mäßigen Temperaturen und feuchten Bedingungen im Frühjahr und Herbst am aktivsten (Walter et al. 2017). Auf besonders hohe oder tiefe Temperaturen reagieren Regenwürmer, je nach Art, unterschiedlich. Zu den Anpassungsstrategien zählen das Ausweichen in tiefere Erdschichten, das Übergehen in ein Ruhestadium bei reduzierter Stoffwechselaktivität und das Einkokonnieren. Insbesondere mit Hitzeperioden einhergehende längere Trockenperioden wirken sich ungünstig auf Regenwurmpopulationen aus, dies hat der in verschiedenen Regionen sehr warme und trockene Sommer 2003 gezeigt. Das seltenere Auftreten von Regenwürmern in trockenen, sandigen Böden legt dies ebenfalls nahe (LUBW 2012). Von Trockenperioden erholen sich Regenwurmpopulationen nur sehr langsam (LUBW 2012), es bleibt daher abzuwarten, welche Auswirkungen die warmen, trockenen Sommer der letzten Jahre auf die Regenwurmpopulationen haben werden. Gerade bei den Regenwürmern

zeigt sich, dass die Folgen der Erderwärmung selten alleine wirksam sind, sondern als Kombination nochmals stärker wirken. Die Bodenfeuchte als ein auch für Regenwurmpopulationen wichtiger Parameter wird im folgenden Indikator 5.2 „Bodenfeuchte“ intensiver beleuchtet.

Dabei können Regenwürmer gerade vor dem Hintergrund von Klimaveränderungen selbst positive Effekte für Boden und Landwirtschaft bewirken. Durch Regenwurmröhren kann Wasser bei Starkregen besser in den Boden eindringen. Pflanzenwurzeln können leichter in aufgelockerten Böden wurzeln, was in Trockenphasen zu einer besseren Wasserversorgung führt (LUBW 2012).

Die Landwirtschaft kann zum Schutz des Regenwurms vor Klimaveränderungen beitragen. Hier sind vor allem Maßnahmen zu nennen, die zu einer Humusanreicherung führen (Indikator 5.3 „Humusvorrat“), beispielsweise der Anbau humusmehrender Zwischenfrüchte oder eine bodenschonende Bearbeitung durch geringes Pflügen (Walter et al. 2017).





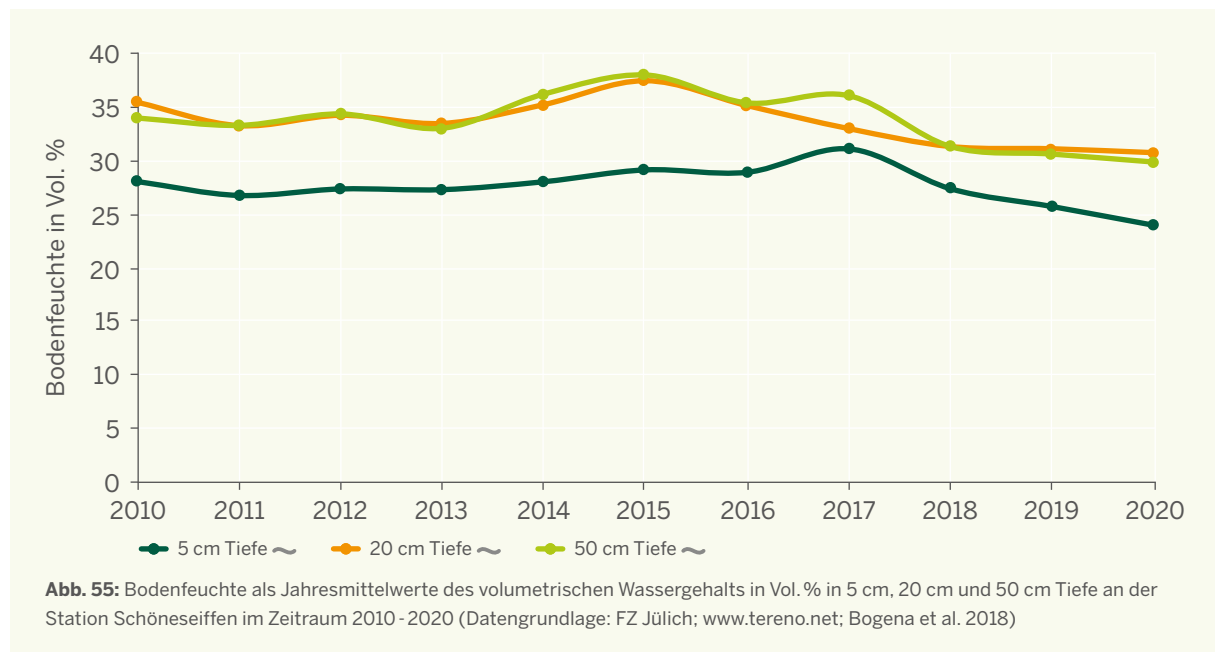
5.2 Bodenfeuchte

I

Bodenfeuchte nimmt in den vergangenen Jahren tendenziell ab

Die steigenden Temperaturen und die voraussichtlich trockener werdenden Frühjahre und Sommer wirken sich negativ auf die Bodenfeuchte aus. Eine sinkende klimatische Wasserbilanz insbesondere im Frühling, führt dazu, dass die Bodenwasservorräte nicht ausreichend gefüllt werden. In zunehmend früher beginnenden und länger andauernden Vege-

tationszeiten zehren die Pflanzen zusätzlich am begrenzt verfügbaren Bodenwasser. Dies führt zu einer verringerten Bodenfeuchte, zum Beispiel mit Konsequenzen für die Pflanzen-, Nahrungsmittel- und Futtermittelproduktion in der Forst- und Landwirtschaft.



Die Bodenfeuchte wird in Nordrhein-Westfalen, im Vergleich zur Bodentemperatur, nur an wenigen Stellen und meist erst seit kurzer Zeit gemessen. Im Klimafolgen- und Anpassungsmonitoring NRW werden zwei Stationen des Forschungszentrums Jülich aus dem Tereno-Projekt (www.tereno.net; Bogena et al. 2018) verwendet.

Zum einen handelt es sich um den in Abbildung 55 dargestellten und im Folgenden beschriebenen Standort Schöneseeffien in der Eifel, zum anderen um die Station Gevenich im Niederrheinischen Tiefland, die im Onlineangebot www.klimafolgenmonitoring.nrw.de ebenfalls dargestellt wird. Bisher lassen sich bei den Zeitreihen der Station Schöneseeffien keine statistisch

signifikanten Änderungstrends nachweisen. Gut zu erkennen ist, dass die oberste Messtiefe von 5 cm deutlich trockener ist als die tieferen Messtiefen 20 cm und 50 cm, die recht nah bei einander liegen, was die Bodenfeuchte betrifft.

Auffällig sind die Werte der Jahre 2018, 2019 und 2020 mit deutlich niedrigeren Werten als beim Rest der Zeitreihe. Hier zeigt sich der Einfluss der Witterung der Jahre 2018 - 2020 mit sehr hohen Temperaturen und geringen Niederschlägen, der sich insbesondere

in den oberflächennahen Tiefen auswirkt. Gleichzeitig ist zu erkennen, dass die Jahre 2015 und 2017 lokale Maxima (bei 20 cm besteht 2017 interessanterweise kein Maximum) bei der Bodenfeuchte haben.

Die Station Grevenich (Tabelle 7), für die nur eine kürzere Datenreihe für den Zeitraum 2012 - 2019 vorliegt, zeigt hingegen in allen Tiefen für die Bodenfeuchte signifikant fallende Trends. Es bleibt abzuwarten, ob sich diese negative Entwicklung in Zukunft fortsetzen und auch an anderen Stationen zeigen wird.

Modell der „Bodenfeuchte-Blöcke“

Beim Deutschen Wetterdienst (DWD) liegen Ergebnisse zur mittleren Bodenfeuchte flächendeckend für NRW und Deutschland seit 1991 vor (DWD 2021a). Diese Ergebnisse basieren auf Modellierungen der Bodenfeuchte für einen hypothetisch flächendeckend vorhandenen Boden unter Gras und sandigem Lehm (Abbildung 56). Basierend auf den auf die Landesfläche berechneten Landesmittelwerten für jeden Monat können für den Zeitraum 1991 - 2021 die absoluten Werte des pflanzenverfügbaren Wassers in % nutzbare Feldkapazität (nFK) als „Bodenfeuchte-Blöcke“ dargestellt werden. Mit dieser von Ed Hawkins ursprünglich für jährliche Temperatur-

zeitreihen entwickelten Darstellungsform können langfristige Veränderungen gut erkennbar gemacht werden. Bei der Darstellung der auf die Monate aufgelösten modellierten Bodenfeuchte bestätigt sich die Beobachtung der letzten drei Jahre, die beim Indikator 5.2 „Bodenfeuchte“ gemacht wurde. Ab dem Jahr 2018 gibt es besonders hell gekennzeichnete Monate, die eine modellierte Feldkapazität von zum Teil unter 50 % nFK über mehrere Monate hinweg anzeigen. Innerhalb der zugegebenermaßen noch kurzen Zeitreihe sind diese für NRW gemittelten Monatswerte in dieser Häufung durchaus beispiellos.

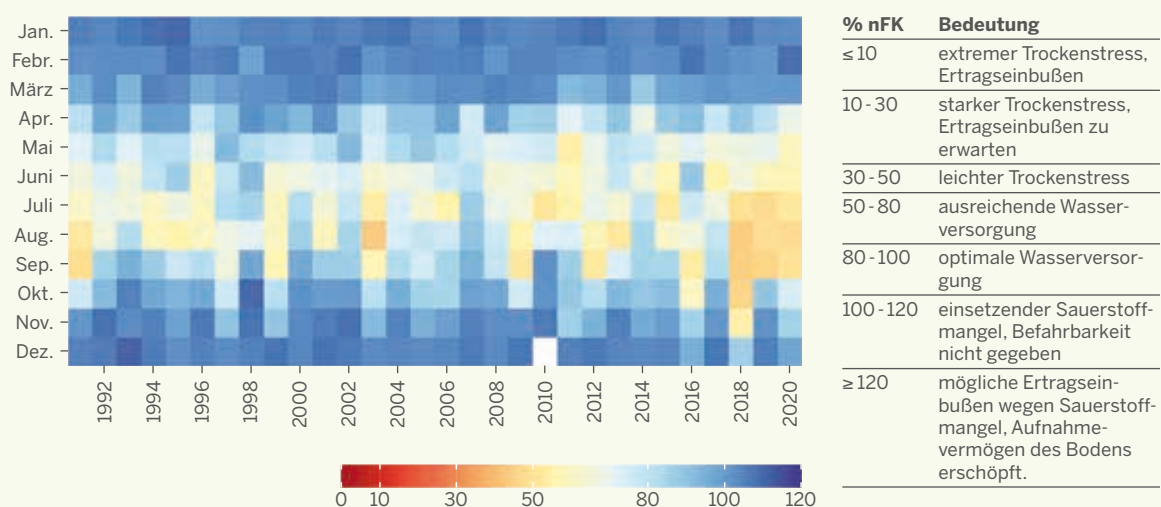


Abb. 56: Modellierte Bodenfeuchte in % nFK für NRW (Quelle: DWD)



5.3 Humusvorrat

I

Humusvorrat – bisher keine Änderungen erkennbar

Unter Humus versteht man die organisch zersetzte Bodensubstanz. Meist ist insbesondere der Oberboden bis zu einer Tiefe von ca. 30 cm besonders humusreich. Humus wird durch die Zersetzung organischen Materials (bspw. Blätter) durch Bodenlebewesen und Mikroorganismen gebildet.

Die durch den Klimawandel veränderten Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse wirken sich unmittelbar auf den Boden aus. Die Bodentemperatur, der Bodenwasserhaushalt und das Bodengefüge verändern sich, was sich letztendlich auch in veränderten Humusgehalten und den daraus für eine

bestimmte Bodentiefe berechneten Humusvorräten zeigen kann. Humus ist für die Fruchtbarkeit von Böden, das Bodenleben und damit die landwirtschaftliche Produktion essenziell.

Außerdem ist der Humus auch für die Funktion von Böden als CO₂-Senke von Bedeutung. Je mehr Humus im Boden eingelagert werden kann, desto mehr CO₂ kann aus der Atmosphäre gebunden werden. Wird der Humusvorrat durch klimatische Faktoren oder auch durch landwirtschaftliche Tätigkeiten verringert, gelangt CO₂ wieder in die Atmosphäre und trägt zur Erderwärmung bei.

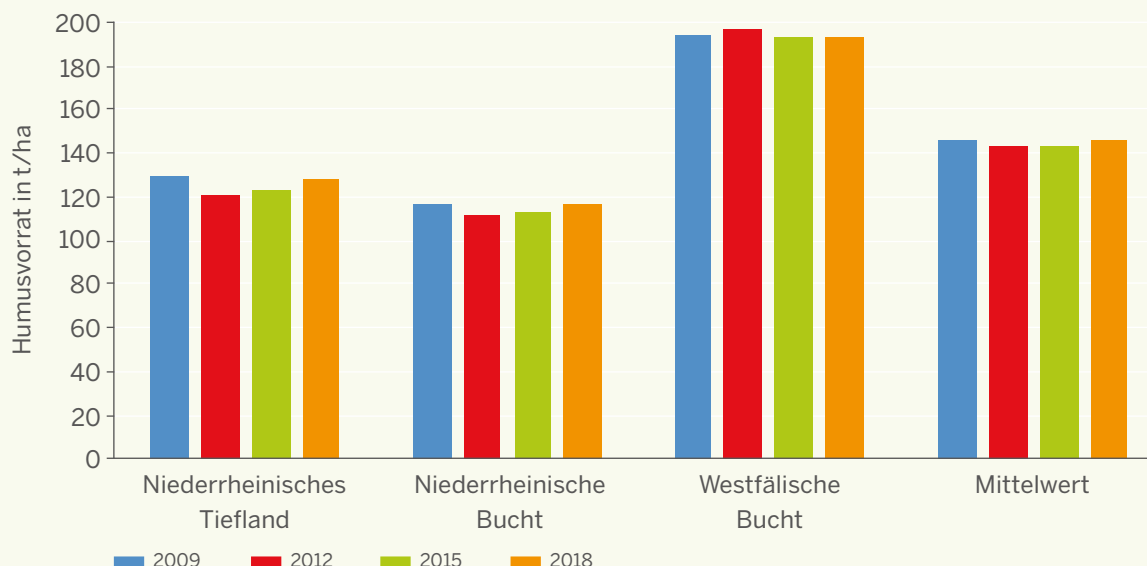


Abb. 57: Humusvorrat in t/ha im Ober- und Unterboden bis 60 cm Tiefe in den drei am stärksten landwirtschaftlich genutzten Großlandschaften NRWs, Niederrheinisches Tiefland, Niederrheinische Bucht und Westfälische Bucht, basierend auf 15 Messstandorten pro Großlandschaft, sowie als Mittelwert über alle Flächen für die Erfassungsjahre 2009, 2012, 2015 und 2018 (Datengrundlage: Humusmonitoring NRW, LANUV)

Der Prozess der Humusbildung und die Wirkung veränderter klimatischer Bedingungen ist recht komplex. Einerseits wird bei höheren Temperaturen mehr Biomasse gebildet, die zur Humusbildung zur Verfügung steht, andererseits laufen bei höheren Temperaturen die Prozesse, die zum Humusabbau führen, deutlich schneller ab. Wobei für beide Prozesse eine ausreichende Wasserversorgung wesentlich ist. Es wird davon ausgegangen, dass es durch die Klimaveränderungen insgesamt zu einem Humusrückgang kommen wird.

Abbildung 57 stellt basierend auf 15 Messstandorten des Humusmonitoring NRW den Humusvorrat in t/ha zusammengefasst für die drei landwirtschaftlich am intensivsten genutzten Großlandschaften dar. Dabei handelt es sich um die Großlandschaften Niederrheinisches Tiefland, Niederrheinische Bucht und um die Westfälische Bucht. An allen Standorten schwanken die Humusvorräte leicht über die Messreihe, dabei zeigt sich kein einheitliches Bild über alle Großlandschaften hinweg. Daher kann anhand der bisher zur Verfügung stehenden Datenreihe keine Aussage zur langfristigen Humusentwicklung und des Klimawandeleinflusses auf diese Entwicklung getroffen werden.

Ein Vergleich der Regionen zeigt, dass trotz der eher sandigen Böden der Westfälischen Bucht die Humusvorräte 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 damit Humus.



Humus als Klimaschützer

Die Funktion von Humus ist vielfältig: Humus enthält viele Nährstoffe, die das Pflanzenwachstum ermöglichen und unterstützen. Humus kann sehr gut Wasser speichern. Darüber hinaus stellt die Humusschicht im Boden einen Lebensraum für viele Arten dar. Die Humusschicht kann bis zu einem gewissen Grad Schadstoffe aufnehmen und filtern. Sie verhindert so, dass diese ins Grundwasser gelangen. Neben diesen auf Pflanzen und Lebewesen bezogenen Funktionen kann Humus CO_2 speichern. Diese Fähigkeit besitzt direkte Auswirkungen auf den Klimaschutz, denn neben der drastischen Einsparung von CO_2 -Emissionen spielen CO_2 -Senken, wie der Humusgehalt im Boden, aber auch Wälder und Moore, eine ganz zentrale Rolle zur Erreichung der Klimaziele (UNFCCC 2015; IPCC 2019) von Paris.

Auf landwirtschaftlich genutzten Flächen kann der Humusgehalt des Bodens durch eine angepasste Bodenbearbeitung verbessert werden. Hierzu zählen organische Düngung, Verbleib von Ernteresten auf den Feldern, Zwischenfruchtanbau mit weniger und kürzeren Brachzeiten, entsprechende Fruchtfolgegestaltung und weitere Maßnahmen (Don et al. 2018). Noch größere Effekte könnten

erzielt werden, wenn Ackerfläche in Grünland oder Wald umgewandelt oder ehemals feuchte Böden oder Moore wieder vernässt würden (Minasny et al. 2017). Die Fähigkeit des Humus, CO_2 zu speichern, ist bei allen Maßnahmen auch von den klimatischen Bedingungen und dem Ausgangshumusgehalt abhängig.

Über eine Erhöhung des Humusgehalts und somit der CO_2 -Speicherfähigkeiten des Bodens kann die Belastung der Erde mit diesem klimaschädlichen Gas reduziert werden. Im Rahmen der Weltklimakonferenz 2015 hat sich eine Initiative gebildet, die sich die Erhöhung des Humusgehalts um vier Promille pro Jahr zum Ziel gesetzt hat. Durch eine Erhöhung des Humusgehalts um jährlich 4 Promille in den Böden bezogen auf die Gesamtmenge von 2.400 Gigatonnen gespeicherten Kohlenstoff in allen Böden weltweit, könnte die jährliche weltweite CO_2 -Emission von etwa 8,9 Gigatonnen CO_2 kompensiert werden – zumindest rechnerisch (Don et al. 2018, Minasny et al. 2017). Vor allem in naturnahen Böden ist allerdings kaum eine Steigerung des Humusgehalts möglich, somit stellt die weltweite Berechnung nur einen theoretischen Wert dar (Don et al. 2018).





5.4 Regenerosivität

I

Vermehrter Bodenabtrag durch zunehmende Regenerosivität

Die Regenerosivität beschreibt die erosionswirksame Kraft des Niederschlags, das heißt Bodenpartikel können durch die kinetische Energie von Regentropfen aus ihrem Verbund gelöst und entfernt werden (Elhaus et al. 2019). Je stärker und intensiver der Regen ist, desto mehr Bodenpartikel werden weggespült.

Die klimawandelbedingte Temperaturzunahme wirkt sich auf die Regenerosivität durch folgenden Zusammenhang aus: Die Temperaturzunahme begünstigt den Wasserdampfgehalt der Atmosphäre und beeinflusst so das Niederschlagspotenzial. Zusätzlich ziehen Regenschauer und Gewitter langsamer, weil sich der Polarfront-Jetstream immer weiter abschwächt

und zu stationären Wetterlagen führt. In der Folge können sich regionale Niederschlagsmuster ändern und somit kann es häufiger zu intensiven Starkregenereignissen kommen (Indikator 2.4 „Niederschlags-extreme“). Entgegengesetzt können auch lange Hitze- und Trockenperioden wie 2018 den Boden stark austrocknen und damit anfälliger für Boden-erosion machen. Neben diesen Auswirkungen des Klimawandels gibt es noch weitere Faktoren, die sich auf die Regenerosivität des Bodens auswirken und die Klimafolgen überlagern können. Hierzu zählt vor allem die Bewirtschaftungsweise oder die allgemeine topografische Lage einer Ackerfläche. Die Ursache-Wirkungsbeziehungen sind hierbei sehr komplex.

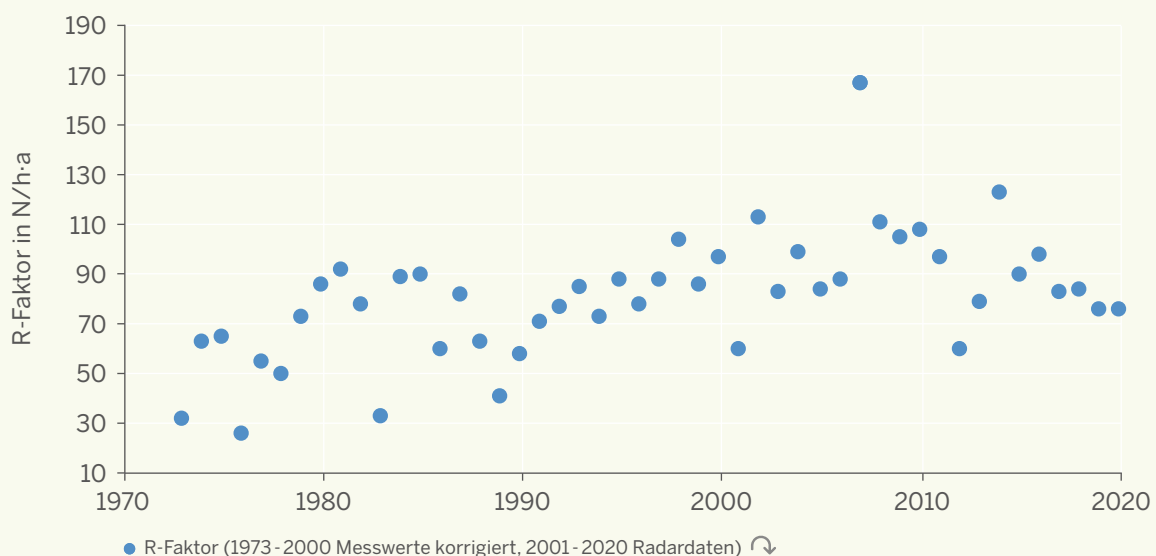


Abb. 58: Regenerosivität in NRW im Zeitraum 1973-2020 (Datengrundlage: Neuhaus et al. 2010 und DWD)

Abbildung 58 zeigt die Zeitreihe der Regenerosivität als R-Faktor (Teil der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung, ABAG, DIN 19708 (2005)). Die Zeitreihe basiert für den Zeitraum 1973 - 2000 auf Messwerten von Niederschlagsstationen (Neuhaus et al. 2010) und ab 2000 auf Radardaten des DWDs (Elhaus et al. 2019; Winterath et al. 2017). Der R-Faktor wird in der Einheit N/h·a angegeben. Die Regenerosivität ist in NRW seit 1973 deutlich angestiegen. Die Trendberechnung ergibt einen quadratischen Trend: dieser Trend mit Trendumkehr ist zuerst steigend und ab 2009 leicht fallend. Verantwortlich für diese Trendumkehr sind die 2010er Jahre, die niedrigere Werte als zuvor aufweisen. Es bleibt abzuwarten, ob diese Trendumkehr sich fortsetzt oder die Werte wieder ansteigen.

Das Jahr 2007 sticht mit einem Wert von 166 N/h·a besonders hervor. Dies ist allerdings nicht verwunderlich, weil 2007 ein Jahresniederschlag von 1.128 mm erreicht wurde. 2007 gilt somit als das dritt niederschlagsreichste Jahr seit Aufzeichnungsbeginn und

fällt auch bei den Starkregen basierten Indikatoren 2.3 „Starkniederschlags(kenn)tage“ und 2.5 „Überschreitungsstunden Starkregenwarnstufe ≥ 3 “ auf. Selbst die sehr bis moderat trockenen letzten drei Jahre 2018 bis 2020 verfügen innerhalb der Zeitreihe über Werte, die nahe dem Mittelwert der Zeitreihe von 80 N/h·a kommen. Dies könnte ein weiteres Indiz dafür sein, dass die Niederschläge insgesamt einen konvektiven Charakter bekommen: also wenn es regnet, dann regnet es intensiver. Diese Beobachtung wird auch im Indikator 2.4 „Niederschlagsextreme“ bestätigt.

Nimmt die Regenerosivität und damit das Risiko von Bodenabtrag und Erosionsschäden zu, erfordert dies entsprechende Gegenmaßnahmen, wie zum Beispiel im Bereich der Landwirtschaft sogenannte Greeningverfahren (Bodenbedeckung durch Unter- und Zwischensaat). Gleichzeitig dürfte auch der Schutzbedarf von zum Beispiel Verkehrsinfrastruktur vor Erosionsereignissen steigen.



Bodenerosion – jeder Millimeter Boden zählt

Es klingt erst mal nicht nach viel, wenn man davon ausgeht, dass im Mittelgebirge in der Regel 0,5 mm Boden im Jahr von einer Ackerfläche abgetragen wird (UBA 2011). Anders ausgedrückt gehen aber auf einen Hektar Ackerfläche, also auf 10.000 Quadratmetern, ganze 5 Kubikmeter Boden pro Jahr verloren. Bei einem angenommenen Gewicht von durchschnittlich 1,3 Tonnen pro Kubikmeter (Hellberg-Rode 2004) sind das etwa 6,5 Tonnen. Zieht man als Beispiel einen landwirtschaftlichen Betrieb von der in NRW durchschnittlichen Größe von knapp 43 Hektar heran, würde dieser Landwirt Jahr für Jahr 280 Tonnen Boden verlieren, dies entspräche ungefähr fünf offenen Güterwagen – 280 Tonnen seiner wichtigsten Erwerbsgrundlage, die es für Generationen zu bewahren gilt.

Bodenerosion tritt nicht überall im selben Umfang auf, sondern es gibt verstärkende Faktoren, wie die Hangneigung, bestimmte Bodenarten, die leichter abgetragen werden oder Pflanzenarten, die den Boden nicht so gut abdecken und somit nicht effektiv vor dem Abtrag schützen. Gleichzeitig können jedoch Gegenmaßnahmen bei der Bodenbewirtschaftung ergriffen werden, um die Erosion zu mindern. Dazu zählen: Pflügen quer zum Hang, Zwischenfrüchte und Untersaaten, Pflanzungen von Hecken oder die Steigerung des Humusgehalts im Boden (Indikator 5.3 „Humusvorrat“). Dieser schützt den Boden durch seine Wasserspeicherfähigkeit vor Austrocknung und die Bodenoberfläche, indem er ihre Bestandteile „verkittet“ und stärker zusammenhält.

Die in diesem Beispiel angegebene Menge an Bodenabtrag kann, je nach Bodengüte, zwar für einige Zeit kompensiert werden, aber Ziel sollte es sein, möglichst bodenerhaltende Bearbeitungsmethoden zu wählen. Schäden durch Bodenerosion direkt auf dem Acker werden als „Onsite-Schäden“ bezeichnet und wirken sich direkt auf die Produktivität der Fläche aus.



Abb. 59: Beispiel „Onsite-Schäden“ auf dem Acker: Erosionsgraben infolge von starkem Niederschlag (Quelle: Geologischer Dienst NRW)



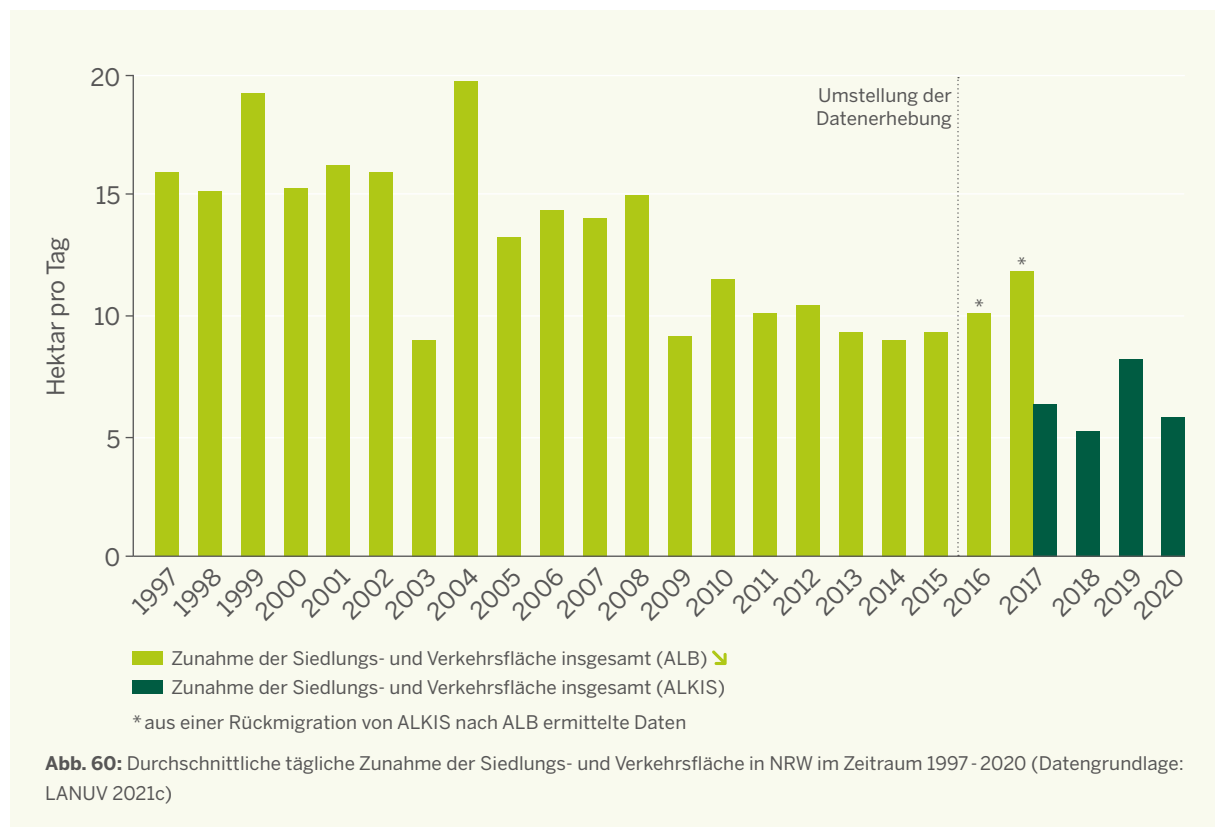
5.5 Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche

R

Flächen für Kühlungs- und Wasserspeicherpotenziale sind essenziell

Um die negativen Folgen des Klimawandels zu verhindern oder aber zumindest abmildern zu können, sind unversiegelte Flächen aufgrund ihrer verschiedenen Funktionen von elementarer Bedeutung. Zu diesen Funktionen gehören unter anderem das Versickern von Niederschlägen im Boden sowie die

Rückhaltung von anstehendem Wasser im Hochwasserfall. Außerdem ist die Sicherung von Freiflächen für die Frisch- und Kaltluftversorgung von Siedlungsbereichen und die Abmilderung von Hitzebelastungen unverzichtbar.



Mit dem Indikator „Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche“ (Flächeninanspruchnahme) wird die durchschnittliche tägliche Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche in Hektar pro Tag in NRW angegeben. Die Berechnung pro Tag erfolgt, indem der jährliche Zuwachs an Siedlungs- und Verkehrsfläche durch die Anzahl der Kalendertage des Jahres geteilt wird.

2016 wurde die Datenerhebung von der Auswertung der Automatisierten Liegenschaftsbücher (ALB) auf die neuen Amtlichen Liegenschaftskataster (ALKIS) umgestellt. In einem Nutzungskatalog sind die neuen Flächennutzungsarten systematisiert worden. Im Jahr 2017 sind die Werte der beiden Auswertungsverfahren

nebeneinandergestellt. Es ist zu erkennen, dass die ALB und ALKIS nicht vergleichbar sind, die alte Methode zeigt deutlich höhere Werte.

Über den Zeitraum 1997-2017 betrachtet nahm die tägliche Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche um 8 ha pro Tag statistisch signifikant ab. In Zukunft wird daher die Frage, wie Fläche möglichst effizient und nachhaltig genutzt wird, von großer Bedeutung sein. Dabei wird auch eine Rolle spielen, inwieweit Kühlungs- und Wasserspeicherungspotentiale durch eine aufgelockere Bebauung realisiert werden können.

Bodenkühlleistung

In dicht besiedelten Städten mit einem hohen Grad an Versiegelung, geringen Grünflächenanteilen und schlechter Luftzirkulation sind die Temperaturen in der Regel höher als im Stadtumland.

Gute Belüftungssituationen können die Qualität des Mikroklimas deutlich verbessern. Aber auch innerstädtische Grünflächen nehmen einen positiven Einfluss auf das Stadtklima. Tagsüber sorgen die Pflanzen durch Schattenwurf und Verdunstung für einen thermischen Ausgleich gegenüber der bebauten Stadt. Da Freiflächen nachts schneller abkühlen, kann durch die Temperaturunterschiede zur aufgeheizten Umgebung ein angeregter Luftaustausch entstehen, der wiederum zur Temperaturabsenkung führt. Besonders in tropischen Sommer Nächten ist dies ein Effekt, der bioklimatisch von großer Bedeutung ist.

Die potenzielle Bodenkühlleistung ist abhängig vom Wasserhaushalt des Bodens. Der Wasserhaushalt beeinflusst wiederum die Verdunstung der Pflanzen. Neben der Verdunstung über Pflanzen



(Transpiration) verdunstet Feuchtigkeit auch über die Bodenoberfläche (Evaporation). Haupteinflüsse hierauf sind die Bodeneigenschaften, die Art und Dichte der Vegetation, der versiegelte Flächenanteil und auch die Wetterbedingungen (LANUV 2015). Gerade vor dem Hintergrund zunehmender Wärmebelastungen in den Städten ist die Bodenkühlleistung und damit ihre Sicherung von zunehmender Bedeutung.



6. Biodiversität und Naturschutz

Die Änderung der Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse, ein geringeres natürliches Wasserangebot während der Vegetationszeit sowie die zunehmende Häufigkeit von extremen Wetterereignissen haben einen direkten Einfluss auf Arten und Lebensräume. Damit verbunden sind Änderungen im Jahresrhythmus, im Verhalten, bei der Fortpflanzung, den Konkurrenzverhältnissen und in den Nahrungsbeziehungen, die bei verschiedenen Arten von Lebewesen zu Bestandsveränderungen und Verschiebungen der Vorkommen führen. So werden etwa einige kälteliebende Arten seltener, wärmeliebende Arten profitieren vom Klimawandel und werden in NRW heimisch.

Indikatoren-Kernaussagen:

- Frühling, Sommer und Herbst beginnen früher im Jahr.
- Die Dauer der Vegetationsperiode nimmt zu.
- Nahrungsangebot für Wildtiere steht früher im Jahr zur Verfügung.
- Mit der Temperatur steigt auch die Anzahl der wärmeliebenden Tier- und Pflanzenarten; kälteliebende Arten nehmen ab.
- Klimawandelbegünstigte invasive Pflanzenarten verändern das Landschaftsbild.
- Der Schwarzwildbestand profitiert von klimawandelbedingt schneeärmeren und wärmeren Wintern.

Auswirkungen des Klimawandels

Veränderungen der Boden- und Lufttemperatur sowie die saisonale Verschiebung der Niederschläge führen zu veränderten Lebensverhältnissen für Tiere und Pflanzen. Arten können von höheren Temperaturen profitieren und ihre Vorkommen ausdehnen. Oder ihre Bestände nehmen bei sich verschlechternden Lebensbedingungen ab, Populationen verinseln und ohne Schutzmaßnahmen können sie lokal, regional oder auch in ihrem gesamten Verbreitungsgebiet aussterben. In jüngster Zeit haben eine ganze Reihe von Tierarten NRW im Zuge des Klimawandels neu oder wieder besiedelt, wie etwa der Bienenfresser. Bestände von Arten, die in Mooren und Feuchtwiesen beheimatet sind, wie die Uferschnepfe, nehmen dagegen trotz langjähriger Schutzbemühungen weiter ab, unter anderem auch aufgrund der verstärkten Trockenheit zur Brutzeit im Frühjahr.

Bei Pflanzen ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Gegensatz zu den meisten Tierarten erheblich langsamer. Die Pflanzen können daher nur sehr eingeschränkt auf Klimaänderungen reagieren. Bei weiter fortschreitendem Tempo der Klimaänderungen steigt daher die Wahrscheinlichkeit, dass Pflanzenarten aussterben.

Zu den indirekten Folgen des Klimawandels zählt eine veränderte Landnutzung, etwa durch Maßnahmen zum Klimaschutz oder durch Anpassung an den Klimawandel. Darunter fallen beispielsweise der Anbau von neuen Energiepflanzen, der Waldumbau oder Hochwasserschutzmaßnahmen. Aber auch das Auftreten oder die Ausbreitung von klimawandel-begünstigten Tier- und Pflanzenarten, insbesondere von invasiven neobiologischen Arten, kann andere Arten beeinträchtigen. Indirekte Folgen haben mitunter einen stärkeren negativen Einfluss als direkte Folgen des Klimawandels.

Genauso wie Arten werden auch Lebensräume von den sich verändernden klimatischen Bedingungen beeinflusst. Besonders gefährdet sind die Lebensraumtypen der Feuchtgebiete und der montanen und submontanen Lagen sowie eine ganze Reihe von Wald-Lebensraumtypen. Sich verändernde klimatische Bedingungen haben einerseits einen Einfluss auf die Verbreitung und Flächenausdehnung von Lebensräumen, andererseits verändern sich die Umweltbedingungen in den Lebensräumen selbst. Dies hat wiederum einen

Effekt auf die dort lebenden Arten durch ein sich veränderndes Nahrungsangebot, verschobene Konkurrenzbeziehungen oder andere Auswirkungen.

Veränderte Lufttemperaturen ziehen Veränderungen der Phänologie von Tieren und Pflanzen nach sich: Blüh- und Fruchttermine bei Pflanzen verschieben sich und damit auch Nahrungsverfügbarkeiten für Tiere. Weiter kann sich das Zugverhalten bestimmter Tierarten verändern. Dadurch kann es zu einem Auseinanderlaufen gegenseitiger Abhängigkeiten kommen, wenn sich beispielsweise Raupen durch höhere Temperaturen früher entwickeln und für später eintreffende Zugvögel nicht mehr in ausreichender Menge zur Fütterung der Jungen vorhanden sind.

Durch die klimatischen Veränderungen kann es zum verstärkten Auftreten von Schadorganismen, wie beispielsweise von Borkenkäfern, kommen. Diese treffen auf Bäume, die durch fortwährende Trockenheit so stark gestresst sind, dass sie weniger widerstandsfähig gegen den Befall von Schadorganismen sind. Darüber hinaus können sich durch veränderte klimatische Bedingungen vermehrt (neue) Krankheitserreger ausbreiten. Durch den zunehmenden internationalen Handel gelangen außerdem Erreger aus anderen Erdteilen leicht nach Westeuropa und finden hier attraktive Bedingungen vor. Der Klimawandel kann auch hier einen verstärkenden Einfluss haben.

Durch die veränderten klimatischen Verhältnisse kommt es zu einem häufigeren Auftreten von extremen Wetterereignissen wie langen Trocken- oder auch Niederschlagsperioden, stärkeren Gewittern und Regengüssen. In deren Folge kann es zu Hochwasser, Sturmwurf oder Waldbrand kommen, mit negativen Folgen für Tiere und Pflanzen. Extremereignisse können aber auch – im Sinne einer Störung – positiv auf Arten und Lebensräume wirken, beispielsweise kann ein Windwurfereignis zu der Zunahme gefährdeter Arten lichter Wälder führen.



Tab. 8: Übersicht der Indikatoren zum Handlungsfeld 6 „Biodiversität“

Indikator		Einheit	räumlicher Bezug	Zeitreihe	Mittelwert Zeitreihe	
6.1 Beginn der phänologischen Jahreszeiten	Frühling	Kalendertag	NRW	1951 - 2020	46	
	Sommer	Kalendertag	NRW	1951 - 2020	150	
	Herbst	Kalendertag	NRW	1951 - 2020	241	
	Winter	Kalendertag	NRW	1951 - 2020	307	
6.2 Dauer der phänologischen Jahreszeiten	Frühling	Anzahl Tage	NRW	1951 - 2020	104	
	Sommer	Anzahl Tage	NRW	1951 - 2020	91	
	Herbst	Anzahl Tage	NRW	1951 - 2020	67	
	Winter	Anzahl Tage	NRW	1951 - 2020	104	
6.3 Länge der Vegetationsperiode		Anzahl Tage	NRW	1951 - 2020	211	
6.4 Blühbeginn Buschwindröschen		Kalendertag	NRW	1951 - 2020	92	
6.5 Klimasensitive Pflanzenarten	mittlerer Temperatur-Zeigerwert	dimensionslos [-]	NRW	2006 - 2020	5,21	
	Anteil Kältezeiger	%	NRW	2006 - 2020	6,1	
6.6 Klimawandelbegünstigte invasive Pflanzenarten		Anzahl pro 100 ha	NRW	2006 - 2020	3,5	
6.7 Temperaturindex der Vogelartengemeinschaften	Community Temperature Index	dimensionslos [-]	NRW	2002 - 2020	12,20	
6.8 Jagdstrecke Schwarzwild		Anzahl	NRW	1951/52 - 2019/20	14.747	

- steigender Trend
 fallender Trend
 Trend mit Trendumkehr: zuerst fallend, dann steigend
 Trend mit Trendumkehr: zuerst steigend, dann fallend
 kein Trend

- günstige Entwicklung
 ungünstige Entwicklung
 keine Bewertung der Entwicklung möglich oder gleichzeitig günstige und ungünstige Entwicklungsaspekte vorhanden

		Mittelwert der Klimanormalperioden						Querbezüge zu anderen Handlungsfeldern
	Trend Zeitreihe	Änderung Zeitreihe	1951-1980	1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2020	
	↘	-30	54	53	46	44	37	7 (S. 150), 8 (S. 166), 9 (S. 184)
	↻	-20	156	155	152	148	143	
	↘	-25	248	245	242	238	233	
	↗	+10	305	306	307	308	311	
	↗	+10	101	102	105	104	107	7 (S. 150), 8 (S. 166), 9 (S. 184)
	↻	-5	92	90	90	90	90	
	↗	+36	57	61	65	71	77	
	↘	-41	115	112	104	101	91	
	↗	+19	206	207	212	214	217	7 (S. 150), 8 (S. 166), 9 (S. 184)
	↘	-11	95	96	93	90	88	7 (S. 150), 8 (S. 166)
	↗	+0,06	-	-	-	-	-	4 (S. 82), 5 (S. 114), 7 (S. 150), 8 (S. 166), 9 (S. 184), 13 (S. 230), 15 (S. 256), 19 (S. 288)
	↘	-1,5	-	-	-	-	-	
	↗	+1,9	-	-	-	-	-	4 (S. 82), 7 (S. 150), 8 (S. 166), 9 (S. 184)
	↻	+0,03	-	-	-	-	-	7 (S. 150), 8 (S. 166), 13 (S. 230), 19 (S. 288)
	↻	+41.329	4.062	5.700	10.669	17.945	27.584	7 (S. 150), 8 (S. 166), 9 (S. 184)



6.1 Beginn der phänologischen Jahreszeiten

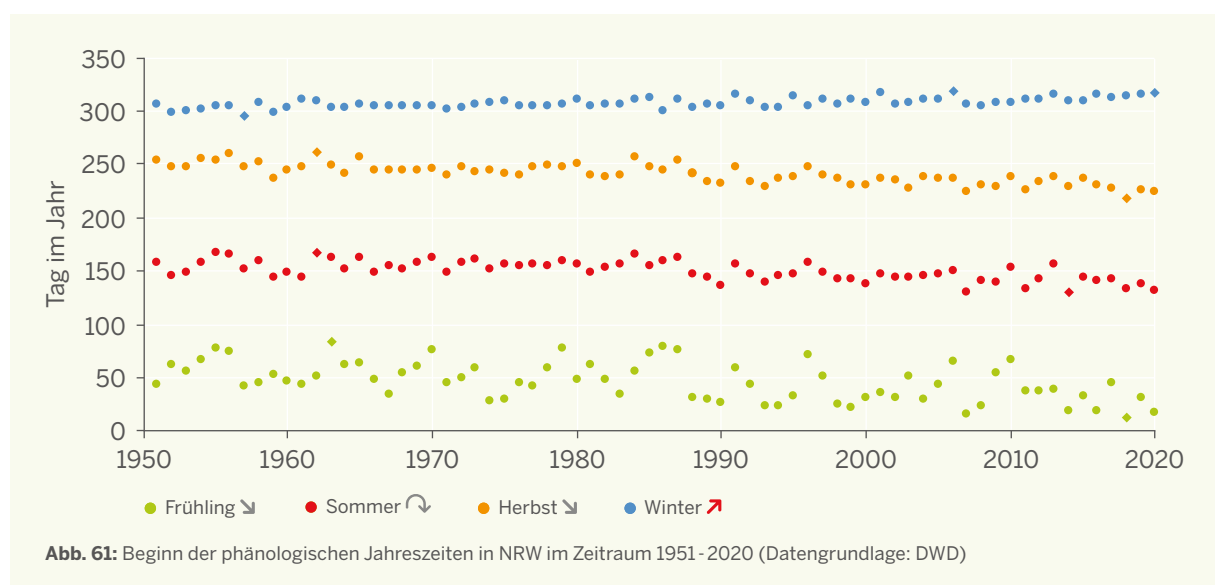
I

Frühling-, Sommer- und Herbstbeginn immer früher im Jahr

Das Eintrittsdatum bestimmter Phasen in der Pflanzenentwicklung wird maßgeblich von der Temperatur beeinflusst. Die Phänologie leitet aus langjährigen Beobachtungen den Einfluss veränderter klimatischer Bedingungen auf die Entwicklung von Pflanzen und Ökosystemen ab. Anders als direkte Temperaturmessungen spiegelt sie eine Reaktion der Natur auf ihre Umwelt wider. Daher ist die Phänologie ein wichtiger und besonders sensibler Bioindikator für den Klimawandel.

Phänologische Beobachtungen an Pflanzen mit Aussagekraft über Temperaturveränderungen sind vor

allem in gemäßigten Klimazonen möglich, da hier die Temperatur einen besonders großen Einfluss auf den Eintritt der verschiedenen Entwicklungsphasen hat. Maßgeblich ist die Temperatur der einer Entwicklungsphase vorausgehenden zwei bis drei Monate. Vor allem die Frühlingsphasen zeichnen sich durch eine starke Korrelation mit der Temperatur aus. Weitere Einflussfaktoren sind die Tageslichtdauer und die Zusammensetzung des Lichtspektrums. Der Eintritt der Herbstphasen dagegen wird von zahlreichen anderen Faktoren (zum Beispiel Niederschlagsmenge im Sommer, Einstrahlung etc.) mitbestimmt.



Der Beginn der phänologischen Jahreszeiten wird durch den Eintritt bestimmter Phasen in der Pflanzenentwicklung festgelegt. Diese phänologischen Zeiger sind für den Frühlingsbeginn der Blühbeginn der Hasel, für den Sommerbeginn der Blühbeginn des Schwarzen Holunders, für den Herbstbeginn die beginnende Fruchtreife beim Schwarzen Holunder und für den Beginn des Winters der Blattfall der Stieleiche. Frühling, Sommer und Herbst treten heute deutlich früher ein als zu Beginn der Messungen, der Zeitpunkt des Winterbeginns hat

sich hingegen leicht nach hinten verschoben (Abbildung 61). Insbesondere in der letzten Dekade sind bei den Jahreszeiten Frühling, Sommer und Herbst besonders frühe Zeitpunkte des Jahreszeitenstarts eingetreten. 2020 weist zusammen mit 2006 das späteste registrierte Eintrittsdatum des Winters auf. Sowohl der spätere Eintrittszeitpunkt des Winters, als auch die Verfrühung der anderen Jahreszeiten lassen sich statistisch signifikant belegen.

Gefahr von Spätfrösten im Klimawandel – nur scheinbar ein Widerspruch

Im Jahr 2017 erfasste zwischen Mitte April und Anfang Mai eine Kältephase mit zahlreichen Frostnächten große Teile Europas und richtete große Ernteaufschläge im Obstbau an (DWD 2017, Munich RE 2021). Spätfrost ist Frost, der nach Beginn der Vegetationsperiode auftritt und für diese Zeit des Jahres nichts Ungewöhnliches. Grundsätzlich muss etwa bis zu den Eisheiligen Mitte Mai mit solchen

Temperaturen gerechnet werden (DWD 2021c). Im Jahr 2017 hatten die Pflanzen jedoch wegen des sehr warmen und damit phänologisch früh eintretenen Frühlings schon weit ausgetrieben und waren in dieser Phase besonders anfällig gegenüber Frost.

Landwirtschaftliche Kulturen sind vor allem während der Blüte und kurz nach dem Austrieb besonders empfindlich. Im Jahr 2017 trat der Frost wegen des frühen Vegetationsbeginns in Nordrhein-Westfalen gerade bei Obst in dieser Phase auf. In anderen Teilen Europas waren auch der Weinbau und in Spanien beispielsweise das Getreide von starken Frostschäden betroffen. Das Ereignis war so außergewöhnlich und gravierend, dass vom Land NRW ein Hilfsprogramm für betroffene landwirtschaftliche Betriebe aufgelegt wurde.



Abbildung 62 zeigt die Entwicklung des Zeitpunktes des letzten auftretenden Frostes im Frühling an der Station Tönisvorst und den Beginn der Apfelblüte an der rund 10 km entfernt liegenden Station Sankt Hubert in Kempen. Die Tendenz zeigt, dass beide Zeitpunkte immer eher im Jahr stattfinden. Es deutet sich an, dass sich der Beginn der Apfelblüte deutlich schneller verfrüht als der letzte Frosttag, sodass sich beide Zeitpunkte immer mehr annähern. Beide Trends sind jedoch noch nicht statistisch signifikant. Als Fazit kann daraus gezogen werden, dass das Thema Spätfröste zukünftig weiterhin sehr ernst genommen werden muss. Trotz der

allgemein steigenden Temperaturen können die verbleibenden Frosttage durch den deutlich verfrühten Blühbeginn der Pflanzen enorme Schäden anrichten.

Mögliche Präventionsmaßnahmen gegen Frostschäden können nächtliche Vliesabdeckungen (zum Beispiel bei Erdbeeren), eine Frostschutzberegnung im Obst- und Gemüseanbau (DWD 2021c), aber auch die richtige Sortenwahl sein. Umfassende Erntever sicherungen können mögliche wirtschaftliche Schäden für Landwirtinnen und Landwirte im Nachhinein reduzieren.

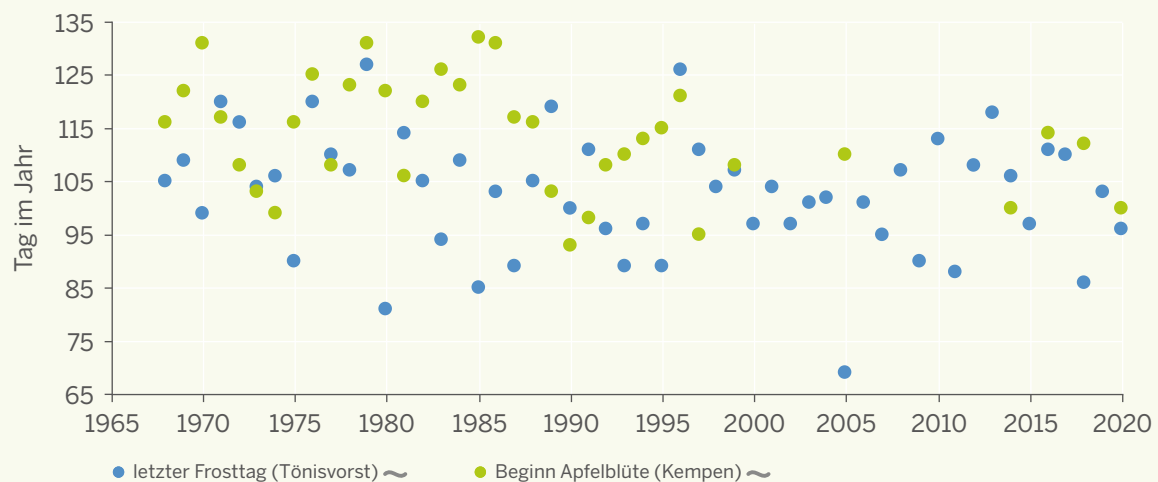


Abb. 62: Beginn der Apfelblüte an der Station Sankt Hubert in Kempen und letzter Frosttag im Frühling an der Station Tönisvorst (jeweils Tag im Jahr) im Zeitraum 1968-2020 (Datengrundlage: DWD)





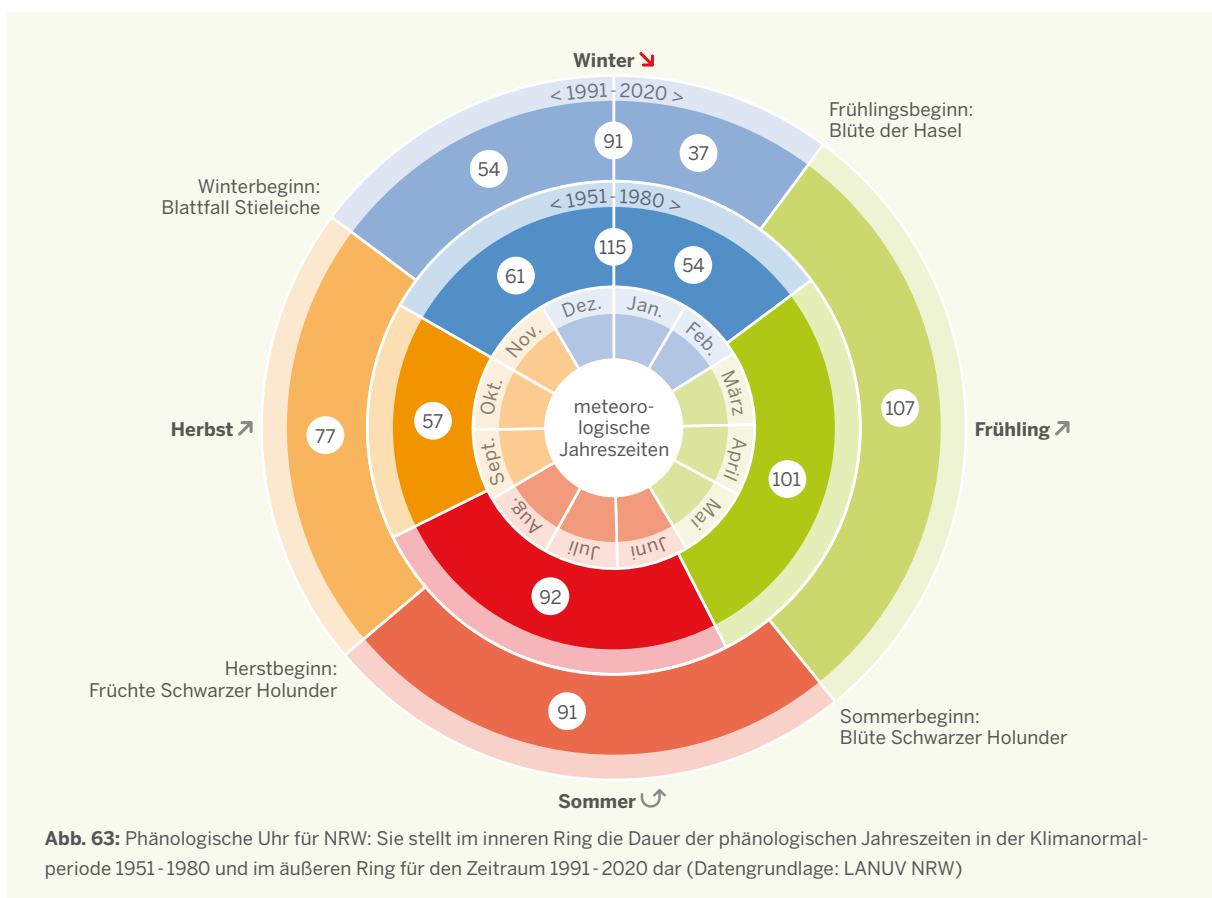
6.2 Dauer der phänologischen Jahreszeiten

I

Frühling und Herbst lösen Winterzeit ab

Entsprechend des Beginns der phänologischen Jahreszeiten (Indikator 6.1) wird die Dauer der phänologischen Jahreszeiten durch den Zeitraum zwischen diesen Eintrittszeitpunkten bestimmt. Die deutlichste Veränderung zeigt der Winter. Die ehemals längste Jahreszeit hat sich im Vergleich der Zeiträume 1951-1980 und

1991-2020 um 24 Tage verkürzt, der Herbst im selben Zeitraum um 20 Tage verlängert (Tabelle 8, Abbildung 63). Insgesamt weisen somit alle Jahreszeiten mit 77 bis 107 Tagen eine ähnliche Dauer auf. Zu Beginn der Aufzeichnungen wurden noch viel deutlichere Unterschiede in der Jahreszeitenlänge festgestellt.





6.3 Länge der Vegetationsperiode

I

Dauer der Vegetationsperiode verlängert sich

Die Dauer der Vegetationsperiode wird durch die Zeitspanne zwischen dem Blühbeginn der Salweide und der Blattverfärbung der Stieleiche als phänologischer Zeiger für den Eintritt des Spätherbstes definiert. Im Mittel dauerte die Vegetationsperiode im Zeitraum 1951 - 2021 211 Tage. Die Werte der Zeitreihe zeigen die für Klimagrößen typischen, starken Schwankungen von witterungsgeprägten Ereignissen (Abbildung 64). Dennoch kann über den Gesamtzeitraum eine deutliche Verlängerung der Vegetationszeit festgestellt werden, die sich statistisch signifikant nachweisen lässt. Vergleicht man den Anfang und das Ende der Trendgeraden für den

Zeitraum 1951 - 2020, so hat sich die Vegetationszeit um 19 Tage verlängert. Neben den letzten beiden Jahren wies bereits 1975 eine besonders lange Vegetationsperiode mit jeweils etwa 235 Tagen auf.

Die Verlängerung der Vegetationsperiode hat zwei Ursachen: auf der einen Seite die Verfrühung der Salweidenblüte, auf der anderen Seite hat sich auch der Blattfall der Stieleiche im Messzeitraum nach hinten verschoben. Die Beobachtung der Vegetationsperiode zeigt beispielhaft, wie Pflanzen und damit die Ökosysteme auf die veränderten Umweltbedingungen reagieren.

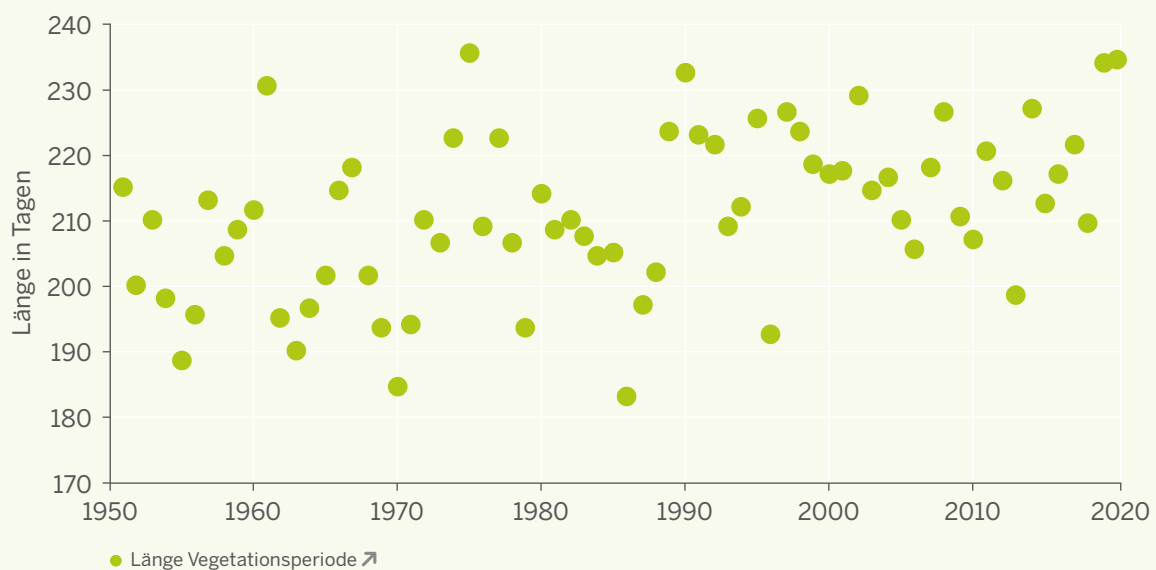


Abb. 64: Länge der Vegetationsperiode in NRW im Zeitraum 1951 - 2020 (Datengrundlage: DWD)



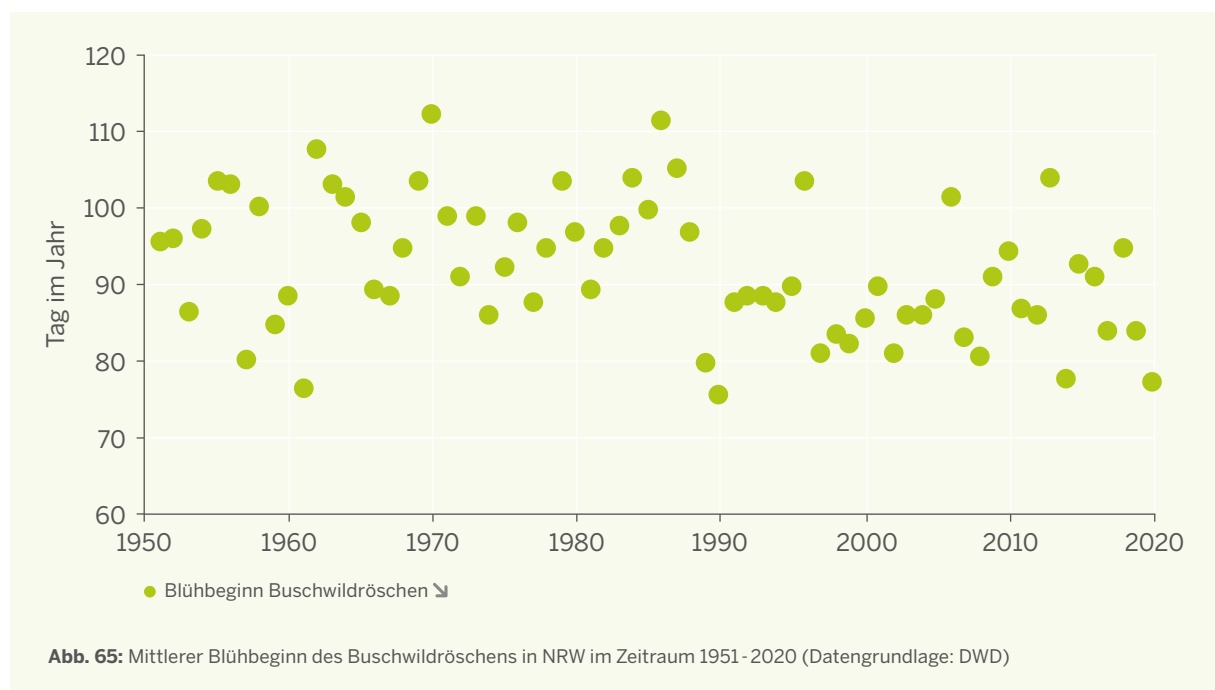
6.4 Blühbeginn Buschwindröschen I

Nahrungsangebot für Wildtiere
steht früher im Jahr zur Verfügung



Der Blühbeginn des Buschwindröschens ist ein wichtiger Marker in der Wildbiologie, da er das Ende der winterlichen Notzeit durch das Aufkommen eines ausreichenden Nahrungsangebots markiert.

Zwischen 1951 und 2020 hat sich der Blühbeginn des Buschwindröschens um elf Tage nach vorn verlagert (Abbildung 65). Diese Verschiebung ist statistisch signifikant.



Wildtiere durch warme Tage im Winter zu früh auf Nahrungssuche?

Der Stoffwechsel der Wildtiere wird maßgeblich über die Tageslänge und nachrangig über die Sonneneinstrahlung gesteuert und etwa ab Februar hochgefahren (Arnold et al. 2004, Hofmann 1985, Hofmann 1989, Petrak et al. 1985, Petrak 1993, Simon et al. 2008). Seit Aufzeichnungsbeginn 1951 hat sich die Sonnenscheindauer im Februar erhöht, auch wenn dieser Trend noch nicht statistisch signifikant nachgewiesen werden kann. Problematisch ist es für Wildtiere, wenn ein Winterrückschlag zum Ende des Winters auftritt.

Insbesondere ein später Schneefall und/oder kalte klare Tage, wie sie in den letzten Jahren häufig im Februar beobachtet wurden, stellen ein Problem dar: Sie kurbeln über die Sonneneinstrahlung den Stoffwechsel der Wildtiere an, gleichzeitig bleibt die

Vegetationsentwicklung und damit das Nahrungsangebot durch die niedrigen Temperaturen aber zurück.

Es bleibt abzuwarten, wie sich die Entwicklung und das Zusammenspiel der verschiedenen Einflussparameter im Rahmen des Klimawandels zukünftig auf die Schere zwischen Nahrungsbedarf und -angebot für die Wildtiere auswirken wird und ob die Tiere dadurch gegebenenfalls vor neue Herausforderungen gestellt werden.





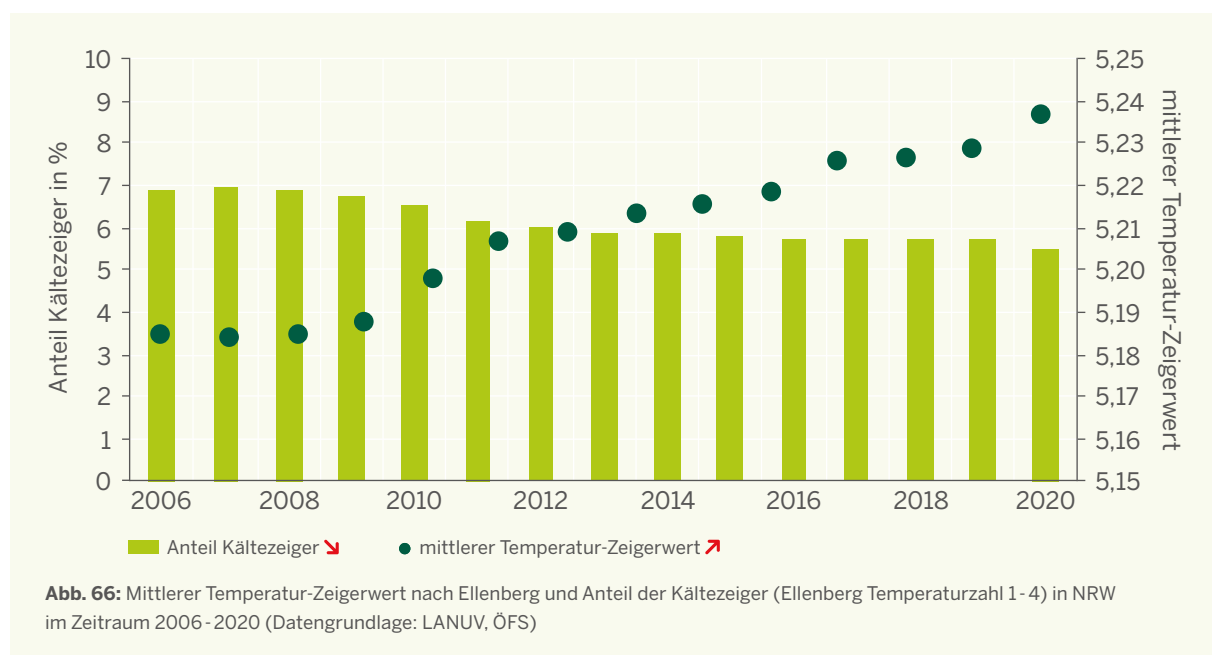
6.5 Klimasensitive Pflanzenarten

I

Kälteliebende Pflanzen nehmen ab

Die Pflanzenarten sind für ein optimales Wachstum auf bestimmte Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse angewiesen. Ändert sich das Temperatur- und Niederschlagsregime bedingt durch den Klimawandel, hat dies Auswirkungen auf die geografische Verbreitung von Pflanzen. Der Indikator „Klimasensitive Pflanzenarten“ stellt die spezifische Wirkung

des Klimawandels auf das Vorkommen von klimasensitiven Pflanzenarten in NRW anhand des Anteils der Kältezeiger und der Entwicklung des mittleren Ellenberg-Temperatur-Zeigerwertes dar. In NRW sind Kältezeiger insbesondere in Wäldern, montanen Wiesen und Heiden (Bergheiden) zu finden.



Die Ellenbergschen Zeigerwerte sind ein Klassifikationsverfahren, mit dessen Hilfe die Standortansprüche von Pflanzen wiedergegeben werden können und reicht von 1: schneegeprägten Hochlagen bis 9: wärmste Tieflagen Mitteleuropas. Der mittlere Temperatur-Zeigerwert wird auf Basis der Ökologischen Flächenstichprobe

(ÖFS, s. Exkurs) aus den mit den Deckungsgraden gewichteten Temperatur-Zeigerwerten der Pflanzen der Krautschicht berechnet. Der Indikator repräsentiert den Temperatur-Zeigerwert einer durchschnittlichen Pflanze in der Krautschicht in NRW.

Als Kältezeiger werden die Pflanzen mit einem Zeigerwert zwischen 1 und 4 definiert, zu diesen zählen beispielsweise Trollblume und Wiesenknöterich. Der Anteil der Kältezeiger ist der mit der Deckung gewichtete durchschnittliche Anteil von Arten mit einem Temperatur-Zeigerwert von 1 bis 4 am Gesamtanteil aller Arten der Krautschicht in der ÖFS. Eine Zu- oder Abnahme bedeutet demnach eine relative Verschiebung der gesamten Pflanzengemeinschaft in Bezug auf das Vorkommen und den Deckungsgrad der Kältezeiger.

Der Temperaturzeigerwert ist im Zeitraum 2006 bis 2020 um 0,06 signifikant angestiegen, der Anteil der Kältezeiger an den Pflanzen der Krautschicht hat signifikant, und zwar um 1,5 Prozentpunkte, abgenommen (Abbildung 66). Der sinkende Anteil der Kältezeiger ist der wesentliche Faktor für den Anstieg des mittleren Temperaturzeigerwertes, während sich der Anteil der Wärmezeiger (Temperatur-Zeigerwerte 7 - 9) bisher nur moderat erhöht hat (hier nicht dargestellt).

Ökologische Flächenstichprobe

Die Ökologische Flächenstichprobe (ÖFS) ist zentraler Baustein des Biodiversitätsmonitorings NRW. Sie liefert landesweit repräsentative Daten über Zustand, Veränderungen bzw. Entwicklungen der biologischen Vielfalt der Normallandschaft. Seit 1997 werden auf insgesamt 170 bzw. ab 2011 auf 191 jeweils 100 ha großen, zufallsverteilten Flächen in NRW alle Biotop- und Lebensraumtypen sowie alle Pflanzen- und Brutvogelarten quantitativ erfasst. Das entspricht einem Anteil von rund 0,5% der Landesfläche. Die Probeflächen sind in ein bundesweites Stichprobennetz von 1.000 Untersuchungsflächen eingebettet.



Die Erfassung der Parameter erfolgt jährlich auf einem Sechstel aller Untersuchungsflächen mit einem Wiederholungsrhythmus von sechs Jahren. Die Berechnung der aggregierten Jahreswerte erfolgt unter Anwendung des gleitenden Mittelwertes. Das bedeutet, dass die in diese Jahreswerte einfließenden Daten zu je einem Sechstel im betreffenden Jahr und den fünf davorliegenden Jahren erhoben werden (sechsjähriges gleitendes Mittel).



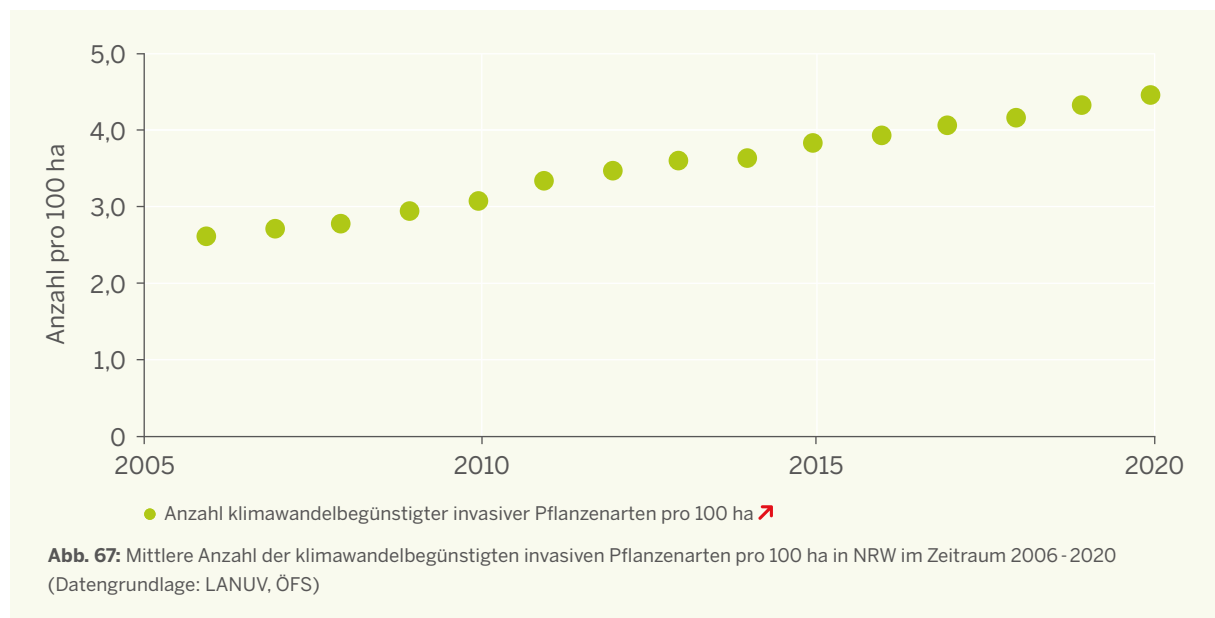
6.6 Klimawandelbegünstigte invasive Pflanzenarten

I

Klimawandelbegünstigte invasive Pflanzenarten verändern das Landschaftsbild

Pflanzen- und Tierarten sind für ein optimales Wachstum auf bestimmte Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse angewiesen. Eine Vielzahl neophytischer Pflanzenarten profitiert von der anthropogenen Klimaveränderung. Darunter die allermeisten der als invasiv geltenden Arten. Invasive Arten verändern oder verdrängen heimische Pflanzenarten.

Die Ausbreitung von klimawandelbegünstigten invasiven Pflanzenarten ist daher als Indikator für die Wirkung von Klimafolgen zu betrachten. In NRW sind Beispiele hierfür mehrere Strauch- und Baumarten, wie Götterbaum und Schmetterlingsstrauch, die sich vor allem in Städten auf Brachen oder an Böschungen ausbreiten.



Klimawandelbegünstigte invasive Arten sind gebietsfremde Arten, deren Ausbreitungspotenzial unter Klimawandelbedingungen erhöht ist und die unter allen prognostizierten Emissionsszenarien mehr Habitate besetzen als unter derzeitigen Umweltbedingungen

(Kleinbauer et al. 2010). Beispiele für bereits in NRW zu findende invasive neophytische Arten sind der Sommerflieder, der Götterbaum, die Mahonie, die Armenische Brombeere und der Japanische Staudenknöterich (Nehring et al. 2013).

Basis der Auswertung bildet die Ökologische Flächenstichprobe (ÖFS), bei der auch die Artenzusammensetzung der Flächen analysiert wird (vgl. Exkurs Indikator 6.5 „Klimasensitive Pflanzenarten“). Der Indikator

zeigt eine signifikante Zunahme der Anzahl von klimawandelbegünstigten invasiven Pflanzenarten pro 100 ha von 2006 bis 2020 um 1,9 (Abbildung 67). Dies bedeutet im Vergleich zu 2006 einen Anstieg um 71 %.

Die Späte Traubenkirsche – vom Hoffnungsträger zum Problemfall

Die Späte Traubenkirsche (wissenschaftlich *Prunus serotina*) ist eine überwiegend als Strauch, selten auch als mittelgroßer Baum, von 10 bis 20 m Höhe wachsende Art aus der Familie der Rosengewächse. Sie ähnelt aufgrund der traubigen Blütenstände am ehesten der heimischen Gewöhnlichen Trauben-Kirsche (*Prunus padus*), lässt sich aber gut durch die stark glänzenden Blätter unterscheiden.

Einst galt die ursprünglich in Nordamerika heimische und dort gute Wuchseleistungen zeigende Art als Hoffnungsträger für die Forstwirtschaft und sollte insbesondere auf armen Sandböden für gute Erträge sorgen. In Feldversuchen Ende des 19. Jahrhunderts stellte sich jedoch schnell heraus, dass die Art bei uns in aller Regel strauchförmig bleibt und nur selten als Baum heranwächst. Dennoch wurde sie in der Folge weiterhin eingesetzt, beispielsweise zur Befestigung von Freiflächen oder als Brandschutzstreifen in den Nadelwäldern der Truppenübungsplätze.

Schnell wurde in der Folge klar, dass diese gezielte Ausbringung zu Problemen führt, denn die Späte Traubenkirsche breitet sich mehr oder weniger unkontrolliert aus, verdrängt dabei heimische Arten und behindert den Aufwuchs von wichtigen Forstbaumarten. Mittlerweile kommt die Späte Traubenkirsche nahezu in ganz NRW vor (Abbildung 68), vor allem in den sandgeprägten Wäldern des Tieflands. Sie dringt aber auch in wertvolle Offenland-Lebensräume wie Heide- und Mooregebiete ein. Der Klimawandel wird diese Entwicklung wahrscheinlich noch beschleunigen, denn die Art zeigt eine hohe Anpassungsfähigkeit, kann länger anhaltende Trockenphasen gut überstehen und wird durch Vögel rasch verbreitet. Weitergehende Informationen zur Späten Traubenkirsche und zu vielen weiteren gebietsfremden Tier- und Pflanzenarten bietet das Neobiota-Portal NRW (www.neobiota.naturschutz-informationen-nrw.de).



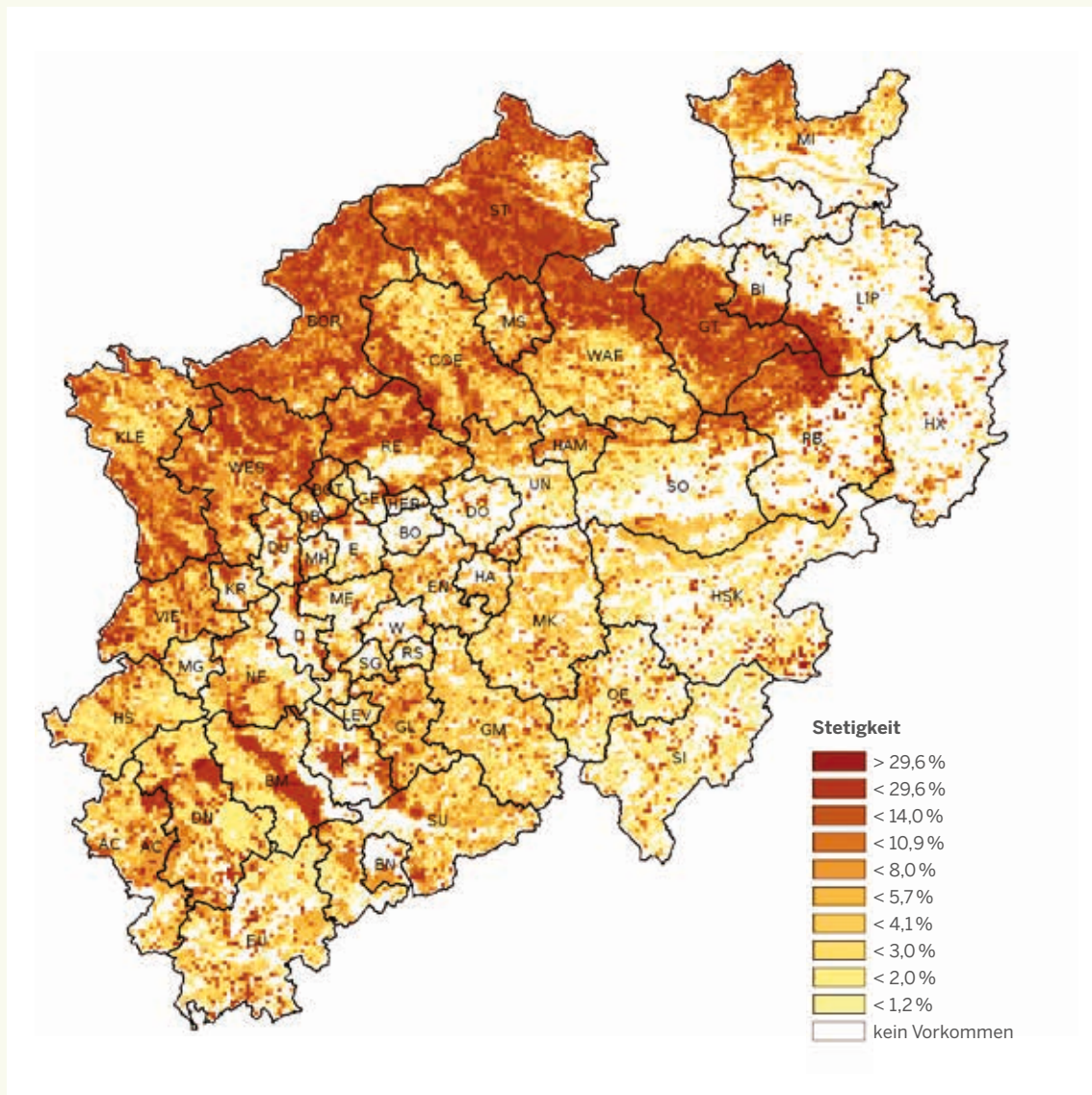


Abb. 68: Karte der Vorkommenswahrscheinlichkeit der Späten Traubenkirsche in NRW. Die Stetigkeit gibt an, in wie viel Prozent aller Biotoptypen pro Quadratkilometer die Art vorkommt. Die Darstellung beruht auf einer Hochrechnung auf Basis der Ökologischen Flächenstichprobe (ÖFS, LANUV, vgl. Indikator 6.5 „Klimasensitive Pflanzenarten“).



6.7 Temperaturindex der Vogelartengemeinschaften

I

Wärmeliebende Vogelarten breiten sich aus

Der anthropogene Klimawandel verändert durch die ansteigenden Jahrestemperaturen und -niederschläge nicht nur die Lebensbedingungen, sondern wirkt auch indirekt dadurch, dass sich Lebensräume und Artengefüge verändern. Vögel können in gewissem Maße darauf reagieren, indem sie ihren Jahreszyklus anpassen, beispielsweise durch einen früheren Brutbeginn oder mehrere Bruten pro Jahr. Bei sehr starken Veränderungen sind Vögel als mobile Artengruppe aber auch in der Lage, neue Regionen zu besiedeln oder sich aus ungeeigneten zurück-

zuziehen und somit ihr Verbreitungsgebiet zu verlagern. Nach derzeitigem Kenntnisstand hat der Klimawandel auf die Verbreitung (Areal) und Populationsgrößen der Brutvogelarten in Nordrhein-Westfalen einen unterschiedlich großen Einfluss. Bei vielen Arten wird dieser Einfluss durch die Art und Intensität der Landnutzung überlagert. Beide Faktoren sind nur schwer voneinander zu trennen, was die Analyse der Effekte von Klimaveränderungen auf die Biodiversität zu einer anspruchsvollen Aufgabe macht.

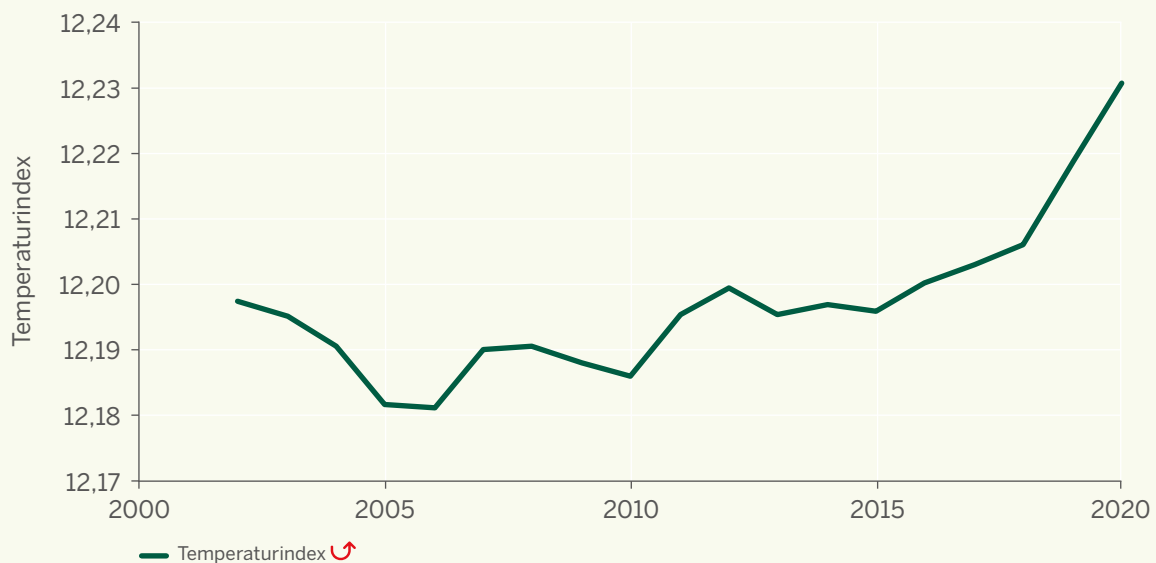


Abb. 69: Entwicklung des Temperaturindex der Vogelartengemeinschaften in NRW im Zeitraum 2002 - 2020
(Datengrundlage: LANUV, ÖFS)

Um den Einfluss von Klimaveränderungen auf Vögel zu untersuchen, wird der Temperaturindex der Vogelartengemeinschaften betrachtet (Community Temperature Index). Der Index basiert auf sogenannten Species Temperature Index-Werten, die jeweils die mittlere Temperatur eines Verbreitungsgebietes einer Art in Europa wiedergeben. Der Indikator betrachtet zusammenfassend die Temperaturnischen und Bestandsentwicklungen von 65 in NRW vorkommenden häufigen Brutvogelarten (Quelle: Ökologische Flächenstichprobe NRW).

Im Betrachtungszeitraum 2002-2020 zeigt der Temperaturindex der Vogelartengemeinschaften einen quadratischen Trend, der zunächst leicht abfällt und dann stark ansteigt (Abbildung 69). Dieser Anstieg deutet darauf hin, dass sich auch in NRW im Mittel die Bru-

tareale bzw. Verbreitungsbilder ausgewählter, wärme-liebender Brutvogelarten nach Norden bzw. Nordosten verschieben.

Zu den von steigenden Mitteltemperaturen profitierenden Vogelarten zählen viele Standvögel, also Vögel, deren Brut- und Überwinterungsgebiet örtlich zusammenfallen. Ein Grund für deren positive Bestandsentwicklung ist das vermehrte Ausbleiben strenger Winter, in denen üblicherweise die größten Verluste heimischer Arten zu verzeichnen sind. Für einige Spätbrüter wie zum Beispiel die Mehlschwalbe führen wärmere, trockenere und länger andauernde Sommer möglicherweise zu höherem Bruterfolg und damit zu positiven Brutbestandsentwicklungen.

Der Grünspecht – von einem, der auszog, das Land zu erobern

Einer der Klimagewinner unter den Brutvögeln Nordrhein-Westfalens ist der Grünspecht. Die Art besiedelt parkartige und mosaikartig zusammengesetzte Offenland-Wald-Komplexe, halboffene und lückige Laubwälder sowie Parkanlagen und baumreiche Gärten. Er ist eine unserer am stärksten auf Ameisen als Nahrung spezialisierten Vogelarten.

Bis in die 1960er Jahre galt der Grünspecht in der Münsterländischen Parklandschaft und in der Region Nordrhein als häufigste Spechtart. Doch der mit der Intensivierung der Grünlandnutzung und der Umwandlung von Grünland in Acker einhergehende Verlust von Ameisen sorgte in der Folge für einen starken Bestandsrückgang. Zu Beginn der 1990er Jahre war die Art nur noch lückig im Rheinland und westlichen Münsterland verbreitet. Erst durch die seit Ende der 1980er Jahre zunehmend milden Winter stieg der Bestand wieder an und die Art breitete sich in rasantem Tempo im Land aus. Dabei mögen auch andere Gründe eine Rolle gespielt haben, wie die Zunahme von Industriebrachen, denn die Art

nahm besonders im Ballungsraum Rhein-Ruhr zu, wo sie heute ihre höchsten Dichten erreicht. Neben dem inzwischen flächendeckend besiedelten Tiefland hat die Art in den letzten Jahrzehnten auch das Bergland Stück für Stück erschlossen. Hier sind nur die höchsten, stark bewaldeten Bereiche derzeit (noch) nicht besiedelt.





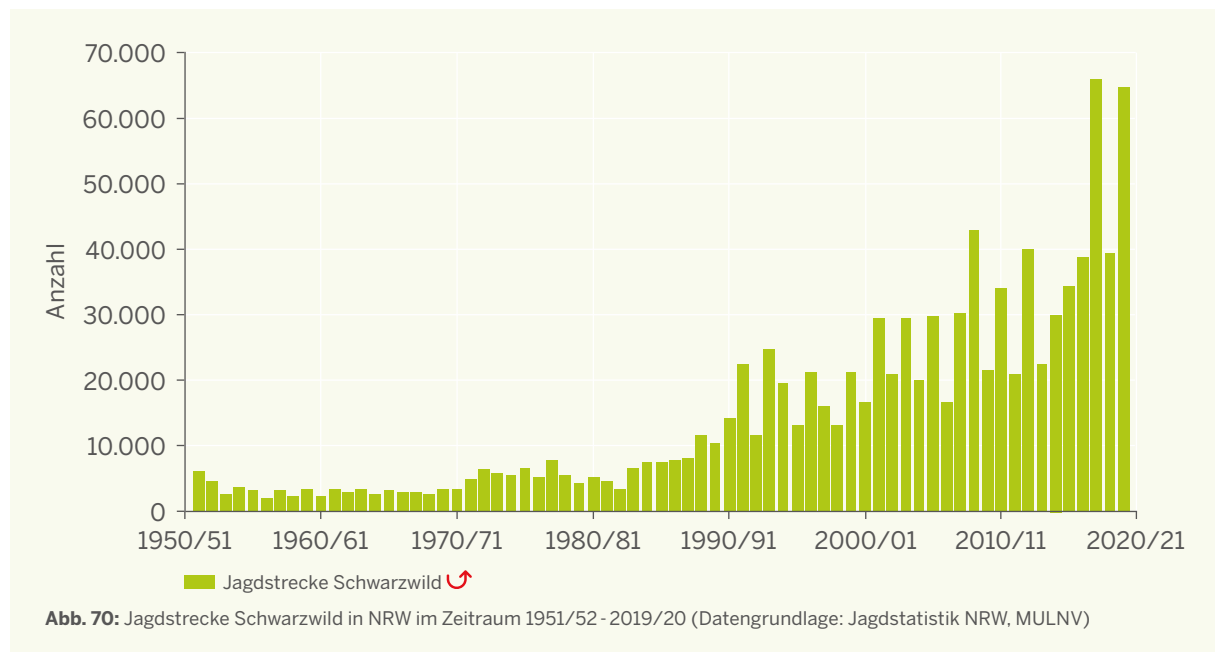
6.8 Jagdstrecke Schwarzwild

I

Mehr Schwarzwild – Herausforderung für Wildschadenabwehr und Seuchenprophylaxe

Eine Folge der globalen Erwärmung sind Veränderungen in der Verbreitung der Arten, wodurch sich Artengefüge in den bisherigen bzw. neuen Verbreitungsgebieten verändern. Mobile Arten können dabei ihr Verbreitungsgebiet verlagern.

Für das Schwarzwild (Wildschwein) gilt die 50 cm Schneehöhe-Isolinie als Grenze des Verbreitungsgebiets (typisches Verbreitungs-/Anbaugebiet von Hafer, Roggen und Eiche).



Schwarzwild wird bisher durch gefrorene Böden, die es bei der Nahrungssuche nicht aufbrechen kann und durch den Verlust des zweiten Wurfs durch strenge Winter klimatisch beeinträchtigt. Daher profitiert das Schwarzwild von klimawandelbedingt schneeärmeren und wärmeren Wintern. Die Erhöhung der Zuwachsrates erschwert die Regulierung der Bestände, erhöht

das Risiko von Wildschäden und begünstigt Konflikte im Siedlungsraum. Eine hohe Individuendichte bedingt auch, dass sich Krankheiten leichter unter den Tieren ausbreiten können und auch neue Krankheiten, wie die für das Schwarzwild relevante Afrikanische Schweinepest, im Falle einer Einschleppung nach NRW sich rasch verbreiten könnten.

Da sich der Wildbestand nur schwerlich zählen lässt, wird als Indikator zur Bestimmung der Anzahl des Schwarzwildes stellvertretend die Jagdstrecke pro Jagdjahr herangezogen. Die Jagdstrecke ist die Summe aus erlegtem Wild und Fallwild (durch andere Ursachen zum Beispiel Verkehrsunfall oder Krankheit eingegangenes Wild). Die Zahl der erlegten Tiere wird pro Jagdjahr bestimmt, das im Frühjahr am 01.04. beginnt und am 31.03. des Folgejahres endet.

In Abbildung 70 ist zu sehen, dass sich insbesondere ab Mitte der 1980er Jahre die Anzahl der Tiere

deutlich erhöht hat. Der Verlauf entspricht einem quadratischen Trend, der zunächst nahezu konstant bleibt und dann sehr stark ansteigt. Über den Zeitraum 1951/1952 bis 2019/2020 ergibt sich anhand der Trendlinie ein Zuwachs von 41.329 erlegten bzw. eingegangenen Stücken Schwarzwild im Jahr.

In den letzten Jahren muss allerdings berücksichtigt werden, dass ein hoher Abschuss als Prävention gegenüber der Afrikanischen Schweinepest durchaus gewünscht ist, daher gefördert wird und die Jagdstrecke positiv beeinflusst.

Afrikanische Schweinepest

Die Afrikanische Schweinepest (ASP) ist eine Tierseuche, die sich seit 2014 ausgehend von östlich an die EU grenzenden Ländern zusehends in Europa ausbreitet (BMEL 2021). Sie ist in Deutschland im September 2020 erstmals in Brandenburg an der Grenze zu Polen nachgewiesen worden. Seitdem sind weitere Fälle in Brandenburg und Sachsen aufgetreten.

Die Schweinepest ist für den Menschen – auch beim Verzehr von gegebenenfalls kontaminierten Fleisch – ungefährlich, ist aber für Haus- und Wildschweine in jedem Fall tödlich (BMEL 2021). Wichtig ist es, die Schweinepest einzudämmen, damit sie nicht die Hausschweinebestände erreicht. Um eine Ausbreitung über Wildschweine zu verhindern, ist es daher erforderlich, Wildschweine intensiv zu jagen. Das Land Nordrhein-Westfalen hat im Rahmen der Corona-Vorsorge Maßnahmen erlassen, um eine Jagd weiterhin zu ermöglichen. Die Strecke beim Schwarzwild erreichte im Jagdjahr 2019/2020 mit 64.736 Stück den bisher zweithöchsten Wert (Landesregierung NRW 2021a).

Da der Erreger nicht nur direkt über Tierkontakte übertragen wird, sondern auch zum Beispiel über Fleisch oder Wurst von infizierten Tieren, können unachtsam entsorgte Reste von virushaltigem Reiseproviant ausreichen, um die Seuche einzuschleppen (BMEL 2021). Solche Essensreste müssen daher vermieden oder für Wildschweine nicht zugänglich entsorgt werden. Da das Virus außerordentlich lange ansteckungsfähig bleibt, kann es auch durch Gegenstände wie Werkzeuge, Schuhwerk oder Kleidung sowie Transportfahrzeuge weiterverbreitet werden. Es ist daher sehr wichtig, dass sich Reisende – auch Jagdreisende – und Transporteure besonders vorsichtig und verantwortungsvoll verhalten und entsprechende Hygienemaßregeln beachten.

Im Falle eines Ausbruchsgeschehens reagieren die Behörden mit verschiedenen Maßnahmen zur Bekämpfung. Hierzu zählen eine drastische Reduzierung des Bestandes, eine gezielte Fallwildsuche und Einschränkungen im Personen- und Fahrzeugverkehr, um das Seuchengeschehen möglichst schnell einzudämmen und das Infektionsrisiko zu reduzieren.



7. Wald und Forstwirtschaft

Unsere Wälder und die Forstwirtschaft sind aufgrund der sehr langen Planungs- und Entwicklungszeiträume besonders von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen. Die Klimafolgen für Wälder ergeben sich hauptsächlich aus den zu erwartenden Temperatur- und Niederschlagsveränderungen. Hinzu kommen weitere klimatische Faktoren wie Stürme sowie indirekte Effekte, etwa die erhöhte Belastung durch Schadinsekten.

Indikatoren-Kernaussagen:

- Die Vegetationszeit von Buche und Eiche verlängert sich.
- Der Waldzustand verschlechtert sich zusehends.
- Der Klimawandel erfordert klimawandelangepasste Wälder.
- Die Waldbrandgefahr nimmt zu.
- Der Borkenkäfer führt zum großflächigen Absterben von Fichtenwäldern.
- Das Schadholzaufkommen durch Stürme und Insekten hat in den vergangenen Jahren stark zugenommen.

Auswirkungen des Klimawandels

Die höheren Temperaturen und saisonalen Niederschlagsänderungen bewirken Veränderungen in den Standort- und Wuchsbedingungen besonders auch für Waldökosysteme. So ist in erster Linie mit trockeneren und wärmeren Bedingungen im Sommer sowie feuchteren und wärmeren Bedingungen im Winter zu rechnen. Die Bandbreite der standörtlich und waldbaulich geeigneten Baumarten verändert sich dadurch. Dies wird sich auf die Artenzusammensetzung der Waldökosysteme auswirken (vgl. Handlungsfelder Biodiversität und Naturschutz). Außerdem können bestimmte Spezies unter Druck geraten und dazu gezwungen sein, in kühleren und feuchteren Areale abzuwandern. Falls dies nicht möglich ist, kann dies zu lokalen Artenverlusten führen.

Zukünftig muss zudem mit häufigeren Extremereignissen und damit verbundenen Schäden durch Trockenstress, Sturmschäden, Waldbrand, Frostschäden oder Überschwemmungen gerechnet werden. Darüber hinaus begünstigen die geänderten klimatischen Bedingungen einheimische und invasive Schadorganismen. So entstehen bereits heute vermehrte Schäden durch Insektenkalamitäten. Dieser Effekt wird dadurch verstärkt, dass Bäume, die bereits unter klimatischen Stressfaktoren wie Trockenheit leiden, besonders anfällig gegenüber Schadorganismen sind.

Die sich verändernden Wuchsbedingungen ziehen neben den bereits erwähnten Schäden weitere Beeinträchtigungen für die Forstwirtschaft nach sich. Insgesamt werden die erforderlichen Anpassungsmaßnahmen hin zu klimaplastischen Wäldern mehr Aufwand bei der Bewirtschaftung und Holzernte nach sich ziehen. Die Anzahl der Tage, an denen der Wald durch Bodenfrost gut für Maschinen zugänglich ist, schrumpft zusätzlich weiter. Die nötigen Anpassungen in der Waldbewirtschaftung werden für die Holzverarbeitende Industrie neue Herausforderungen mit sich bringen.

Der Wald dient zudem neben der forstlichen Nutzung als Naherholungs-, Freizeit- und Tourismusraum, der bei steigenden Temperaturen und Hitzeperioden als Ort mit einer temperaturregulierenden Funktion noch attraktiver werden könnte. Durch Schadereignisse (in Verbindung mit Sicherungsmaßnahmen/Absperungen, Bekämpfungsmaßnahmen) könnten diese gesellschaftlichen Funktionen jedoch eingeschränkt sein. Gleichzeitig könnte eine verstärkte Nutzung des Wal-



des als Erholungs- und Freizeitraum auch eine zunehmende Belastung zum Beispiel schützenswerter Flora oder ruhebedürftiger Fauna mit sich bringen.

Auch für den Wald in Schutzgebieten sind weitergehende Auswirkungen zu erwarten. So könnten die Veränderungen der Standort- und Wuchsbedingungen die Aufrechterhaltung von Schutzziele im Sinne einer bestimmten zu erhaltenden oder entwickelnden natürlichen Waldgesellschaft erschweren oder gegebenenfalls eine Anpassung erforderlich machen.

Ferner erfüllt der Wald weitere wichtige Funktionen, von denen die Gesellschaft profitiert. Neben den klassischen Waldfunktionen, wie zum Beispiel der Holzproduktion und Erholung, haben Wälder auch auf der psychologischen Ebene eine positive Wirkung auf den Menschen und somit auf die Gesellschaft (Kotera et al. 2020). Zudem spielt der Wald eine wichtige Rolle als außerschulischer Lernort und als Ort der Umweltbildung im Sinne einer Bildung für Nachhaltige Entwicklung (BNE). Diese Rolle könnte in Zukunft noch wichtiger werden, um über die Folgen des Klimawandels und die Klimaschutzfunktion des Waldes aufzuklären. Denn nicht zuletzt dienen Wälder als wichtige Kohlenstoffsenke, indem sie Kohlenstoff binden und damit der Atmosphäre CO₂ entziehen. Auch die Holznutzung bzw. das Bauen mit Holz anstatt mit energieintensiven Baumaterialien bieten ein entsprechend hohes Einsparungspotenzial an Treibhausgasemissionen.



Tab. 9: Übersicht der Indikatoren zum Handlungsfeld 7 „Wald- und Forstwirtschaft“

Indikator			Einheit	räumlicher Bezug	Zeitreihe	
7.1 Phänologie der Buche und Eiche	Buche	mittlerer Austrieb	Kalendertag	NRW	2001 - 2020	
		mittlere Verfärbung	Kalendertag	NRW	2001 - 2020	
		Vegetationszeit	Anzahl Tage	NRW	2001 - 2020	
	Eiche	mittlerer Austrieb	Kalendertag	NRW	2001 - 2020	
		mittlere Verfärbung	Kalendertag	NRW	2001 - 2020	
		Vegetationszeit	Anzahl Tage	NRW	2001 - 2020	
7.2 Laub- und Mischwälder	Waldfläche differenziert nach Bestockungstypen	Laub- und Mischwald	ha	NRW	2014	
		Nadelwald	ha	NRW	2014	
7.3 Waldzustand	Kronenverlichtung	ohne	%	NRW	1984 - 2020	
		schwache	%	NRW	1984 - 2020	
		deutliche	%	NRW	1984 - 2020	
7.4 Waldbrandgefahr und Waldbrände	Waldbrandindexstufe 1 + 2		Anzahl Tage	NRW	1961 - 2020	
	Waldbrandindexstufe 3 + 4		Anzahl Tage	NRW	1961 - 2020	
	Anzahl der Brände		Anzahl Brände	NRW	1991 - 2020	
	betroffene Fläche		ha	NRW	1991 - 2020	
7.5 Buchdruckerpopulation	Solling, 190 m ü. NN		Anzahl pro 100 ha	Station	2014 - 2020	
	Arnsberg, 240 m ü. NN			Station	2014 - 2020	
	Gummersbach, 250 m ü. NN			Station	2014 - 2020	
	Altenbeken, 350 m ü. NN			Station	2014 - 2020	
	Hagen, 350 m ü. NN			Station	2014 - 2020	
	Rüthen, 350 m ü. NN			Station	2014 - 2020	
	Kirchhundem, 600 m ü. NN			Station	2014 - 2020	
	Medelon, 700 - 800 m ü. NN			Station	2014 - 2020	
7.6 Durch Schäden verursachter Holzeinschlag	Schadholzaufkommen insgesamt		in 1.000 m³	NRW	2002 - 2020	
	Wind/Sturm		in 1.000 m³	NRW	2002 - 2020	
	Schnee/Duft		in 1.000 m³	NRW	2002 - 2020	
	Insekten		in 1.000 m³	NRW	2002 - 2020	
	Trockenheit		in 1.000 m³	NRW	2020	
	Sonstige		in 1.000 m³	NRW	2002 - 2020	

- steigender Trend
 fallender Trend
 Trend mit Trendumkehr: zuerst fallend, dann steigend
 Trend mit Trendumkehr: zuerst steigend, dann fallend
 fallender quadratischer Trend
 kein Trend



- günstige Entwicklung
 ungünstige Entwicklung
 keine Bewertung der Entwicklung möglich oder gleichzeitig günstige und ungünstige Entwicklungsaspekte vorhanden

	Mittelwert Zeitreihe	Trend Zeitreihe	Änderung Zeitreihe	Mittelwert der Klimanormalperioden				Querbezüge zu anderen Handlungsfeldern
				1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2020	
	120	↗	-	-	-	-	-	6 (S. 130)
	289	↗	-	-	-	-	-	
	169	↗	+11	-	-	-	-	
	120	↗	-	-	-	-	-	
	300	↗	-	-	-	-	-	
	181	↗	+15	-	-	-	-	5 (S. 114), 6 (S. 130)
	677.360	-	-	-	-	-	-	
	187.268	-	-	-	-	-	-	6 (S. 130), 19 (S. 288)
	38,9	↘	-42	-	-	-	33,8	
	38,3	↘	+14	-	-	-	40,5	
	22,9	↗	+28	-	-	-	25,8	6 (S. 130), 9 (S. 184), 10 (S. 206), 19 (S. 288)
	183	↗	-40	192	188	184	174	
	16	↗	+24	10	13	15	21	
	55	↗	+6	-	-	-	55	
	16	↗	-8	-	-	-	16	6 (S. 130)
	14.459	↗	-	-	-	-	-	
	34.386	↗	-	-	-	-	-	
	55.162	↗	-	-	-	-	-	
	44.704	↗	-	-	-	-	-	
	9.922	-	-	-	-	-	-	
	70.272	↗	-	-	-	-	-	
	42.045	↗	-	-	-	-	-	6 (S. 130), 16 (S. 262), 19 (S. 288)
	28.594	↗	-	-	-	-	-	
	2.443	↗	-	-	-	-	-	
	1.123	↗	-	-	-	-	-	
	40	↘	-99	-	-	-	-	
	1.168	↗	+10.234	-	-	-	-	
	128	-	-	-	-	-	-	
	108	↗	-	-	-	-	-	



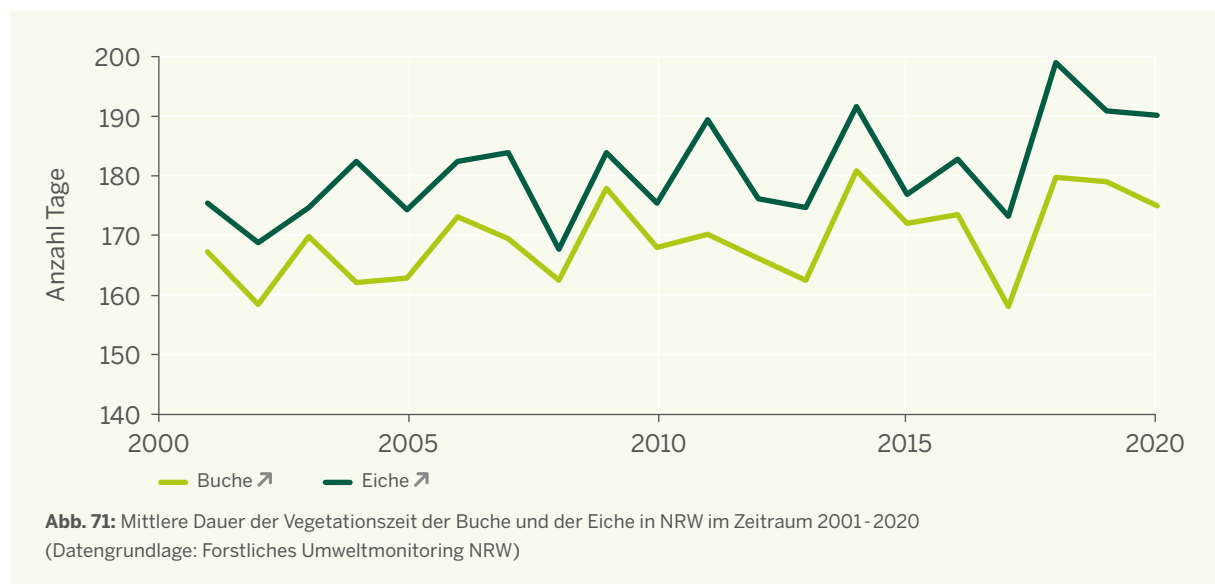
7.1 Phänologie der Buche und Eiche

I

Die Vegetationszeit von Buche und Eiche wird immer länger

In der Phänologie werden jahreszeitlich wiederkehrende Erscheinungen in der Pflanzen- und Tierwelt beobachtet, wie der Blattaustrieb und die Blattverfärbung bei Bäumen. Temperaturveränderungen wirken sich unmittelbar auf die phänologischen Stadien aus, daher gehören diese zu den besten entsprechenden Bioindikatoren. Vor allem im Frühling, aber auch in den anderen Jahreszeiten bestimmt die Temperaturentwicklung der vorausgehenden zwei bis drei

Monate die jeweiligen Entwicklungsphasen. So bedingen die immer milderen Winter und wärmeren Frühjahre, dass unsere Waldbäume immer früher austreiben. Die Herbstphasen werden hingegen von zahlreichen anderen Faktoren, wie beispielsweise der sommerlichen Niederschlagsmenge und der Sonneneinstrahlung mitbestimmt. Eine Veränderung der phänologischen Stadien kann weitreichende Konsequenzen für den Wald mit sich bringen.



Die Dauer der Vegetationszeiten der Buche und Eiche werden anhand ihres Blattaustriebes im Frühling und ihrer Blattverfärbung im Herbst bestimmt: Beim Laubaustrieb ist für den Vegetationszeitbeginn ein bestimmtes Stadium der Blattentfaltung definiert, das erreicht

oder überschritten sein muss. Bei der Herbstaufnahme wird der Anteil des verfärbten Laubes in der Baumkrone eingeschätzt. Die Daten werden auf Flächen des forstlichen Umweltmonitorings in Nordrhein-Westfalen durch das LANUV seit 2001 erhoben.

Im Zeitraum 2001 - 2020 fand der Blattaustrieb der Buche im Mittel am 120. Tag im Jahr (30.04.) und die Blattverfärbung am 289. Tag im Jahr (16.10.) statt. Die Vegetationsphase der Buche dauerte im Mittel über den gesamten Messzeitraum 169 Tage (Abbildung 71). Die Vegetationsphase hat sich im Zeitraum 2001 - 2020 um elf Tage verlängert und ist statistisch signifikant. Die Verlängerung der Vegetationszeit lässt sich primär auf einen früheren Austrieb der Buche, aber auch auf eine spätere Blattverfärbung zurückführen.

Der Blattaustrieb der Eiche fand im Mittel über den Zeitraum 2001 - 2020 am 120. Tag im Jahr (30.04.) und die Blattverfärbung am 300. Tag im Jahr (27.10.) statt. Die Vegetationsphase der Eiche dauerte im Mittel rund 180 Tage. Somit sind Buche und Eiche über den gesamten Messzeitraum im Mittel am selben Tag ausgetrieben, die Vegetationszeit der Eiche ist jedoch aufgrund der späteren Blattverfärbung etwas länger. Die Vegetationsphase der Eiche hat sich im Zeitraum 2001 - 2020 um 15 Tage verlängert. Dieser Trend ist statistisch signifikant.

Welche Folgen hat eine längere Vegetationszeit von Buche und Eiche?

Die verlängerte Vegetationsperiode bei gleichzeitig höheren Temperaturen bringt vielfältige Konsequenzen für Buchen und Eichen mit sich. Allen voran bedeuten diese veränderten Bedingungen über das Jahr gesehen einen höheren Wasserbedarf. Jedoch zeigt die Entwicklung der Niederschlagsmengen in der Vegetationsperiode (Indikator 2.2 „Durchschnittliche Jahreszeitenniederschlagssumme“), insbesondere für die vergangenen 30 Jahre, abnehmende Werte. Die nun im dritten Jahr in Folge vorliegenden extremen Witterungsbedingungen haben dazu geführt, dass sich die Situation für die Waldbäume weiter verschlechtert hat (MULNV 2019b). Sie litten auch im Jahr 2020 an Wasser- und Hitzestress. Erkennbar wird diese Stresssituation beispielsweise an einer zunehmenden Kronenverlichtung (vgl. Exkurs Indikator 7.3 „Waldzustand“).

Weiter kann sich die Anfälligkeit der Bäume gegenüber Schadinsekten, je nach Populationsentwicklung und Synchronisation der Schadinsekten, verändern. Ein früherer Austrieb der Bäume kann zu einem verstärkten Insektenfraß, zum Beispiel der Eichenfraß-Gesellschaft an Eichen, führen. Überdies tritt beispielsweise der Kleine Buchenborkenkäfer

(*Taphrorychus bicolor*) neuerdings stärker in den Vordergrund. Die Käfer profitieren von Dürrejahre, indem sie die durch Wasserstress geschwächten Buchen befallen und durch Fraß in der Kambialschicht unter der Rinde weiter schädigen. Auch wenn der momentane Befallsdruck noch eher gering ist, so lässt sich doch eine Zunahme feststellen. Für die Zukunft ist, sollte sich der Trend zu größerer Trockenheit und höheren Temperaturen fortsetzen, mit einer Ausweitung dieser Problematik zu rechnen (MULNV 2019b).

Insgesamt hat die Eiche die mittlerweile im dritten Jahr anhaltende Trockenheit bisher besser verkraftet als Buche und Fichte, was auf ihr tief reichendes Wurzelsystem zurückzuführen ist. Sie kann sich damit in tieferen Schichten noch vorhandenes Bodenwasser erschließen, das für andere Baumarten nicht mehr zu erreichen ist. Welche Auswirkungen die vergangenen trockenen Jahre auf die Buchen und Eichen haben, wird sich frühestens im kommenden Jahr zeigen. Die Belastungssituation hat sich weiter verschärft und die Folgen für die Waldbäume sind bisher nicht im vollen Umfang absehbar (MULNV 2019b).



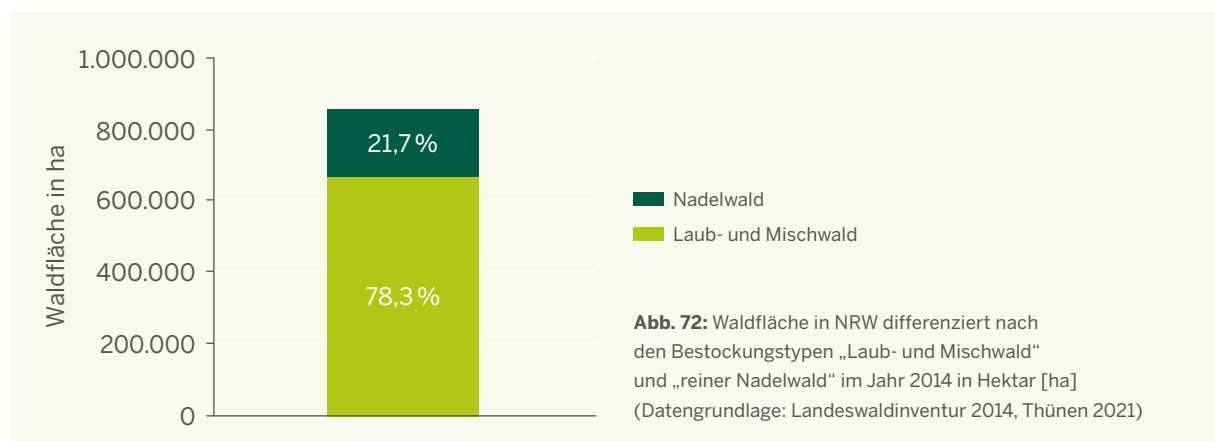
7.2 Laub- und Mischwälder



Der Klimawandel setzt der Fichte zu

Die klimatischen Veränderungen, wie etwa vermehrte Trockenheit und Hitze, verschlechtern in NRW insbesondere die Wuchsbedingungen für die Fichte. Diese zählt in NRW zu den Hauptbaumarten und wird meist in Reinbeständen angebaut. Entsprechend dem forstlichen Leitbild vielfältiger standortgerechter Mischwälder, sowie dem naturschutzfachlichen Ziel zur Ausweitung gebietsheimischer Wald-Lebensraumtypen (MKULNV 2015b, MULNV

2019a), sollen Wälder zu standortgerechten Mischbeständen aus überwiegend heimischen Baumarten umgebaut werden, um die Stabilität und die Anpassungsfähigkeit der heimischen Wälder auch gegenüber Klimaveränderungen weiter zu erhöhen. Somit kann der Umbau zu klimastabilen Mischwäldern einen wichtigen Beitrag zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels leisten.



Der Indikator misst die Anteile der reinen Nadelwaldbestockung gegenüber der kumulierten Anteile an reiner Laubwald- und Mischwaldbestockung. Somit kann nachvollzogen werden, ob ein Waldumbau hin zu klimastabilen Mischwäldern als Reaktion auf den Klimawandel vollzogen wird. Die Daten basieren auf der Landeswaldinventur NRW 2014.

Im Jahr 2014 betrug in NRW die Gesamtwaldfläche 935.000 ha, davon waren 865.000 ha (92 %, Abbildung 72) mit Bäumen bestockt. Basierend auf dieser Bestockungsfläche waren 78,3 % Laub- oder Laubmischwälder und 21,7 % reine Nadelwälder. Erst mit der Landeswaldinventur 2022 wird ein weiterer Datensatz verfügbar sein, mit dessen Hilfe Aussagen zur Entwicklung der Waldanteile möglich werden.

Wie sieht ein klimaresilienter Wald aus?

Im Rahmen der Klimaanpassungsstrategie Wald NRW (MKULNV 2015b) hat das Land Nordrhein-Westfalen unter anderem das Waldbaukonzept NRW (MULNV 2019a), das Wiederbewaldungskonzept NRW (MULNV 2020c) und das Internetportal Waldinfo.NRW (www.waldinfo.nrw.de) mit vielfältigen fachlichen Empfehlungen zur Entwicklung klimastabiler Wälder erstellt.

Kern der Empfehlungen ist die Begründung und Entwicklung standortgerechter und strukturierter Mischbestände aus überwiegend heimischen Baumarten. Bei der Baumartenwahl ist die zu erwartende Veränderung der Standort- und Wuchsbedingungen (Standortdrift) zu berücksichtigen (Schulte-Kellinghaus et al. 2020). Die Bestände sollen aus mindestens vier Baumarten bestehen. Ausgewählte und wissenschaftlich besonders abgesicherte eingeführte Baumarten werden – außerhalb von

Schutzgebieten – überwiegend als Beimischungen empfohlen. Bei der Begründung neuer Waldbestände – insbesondere bei der Wiederbewaldung von Kalamitätsflächen – soll geeignete vorhandene Naturverjüngung sinnvoll mit ergänzender Pflanzung weiterer gewünschter Baumarten kombiniert werden. Als stabilisierendes Element wird auch die Anlage und Pflege geeigneter Waldränder aufgeführt. Das Internetportal Waldinfo.NRW beinhaltet auch digitale Karten zur Eignung von Baumarten und Mischbeständen im Klimawandel.





7.3 Waldzustand

I

Die Kronenverlichtung nimmt zu

Der Waldzustand wird durch eine Vielzahl an Faktoren beeinflusst. Das Klima und die Witterung spielen dabei eine wesentliche Rolle. Veränderte Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse sowie Witterungsextreme fordern unsere Wälder heraus. Der Waldzustand wird unter anderem durch das Ausmaß von Kronenschäden bestimmt. Als Kronenschäden gelten beispielsweise der Verlust von Nadel- bzw.

Blattmasse (Kronenverlichtung) oder vergilbte Kronen. Die Kronenverlichtung der Waldbäume zeigt hierbei unspezifisch die Waldvitalität an. Sie wird neben dem Klima bzw. der Witterung durch verschiedene weitere Faktoren wie beispielsweise Schaderreger, Schadstoffe, aber auch baumeigene Entwicklungsprozesse, wie die Fruchtbildung und das Baumalter, beeinflusst.

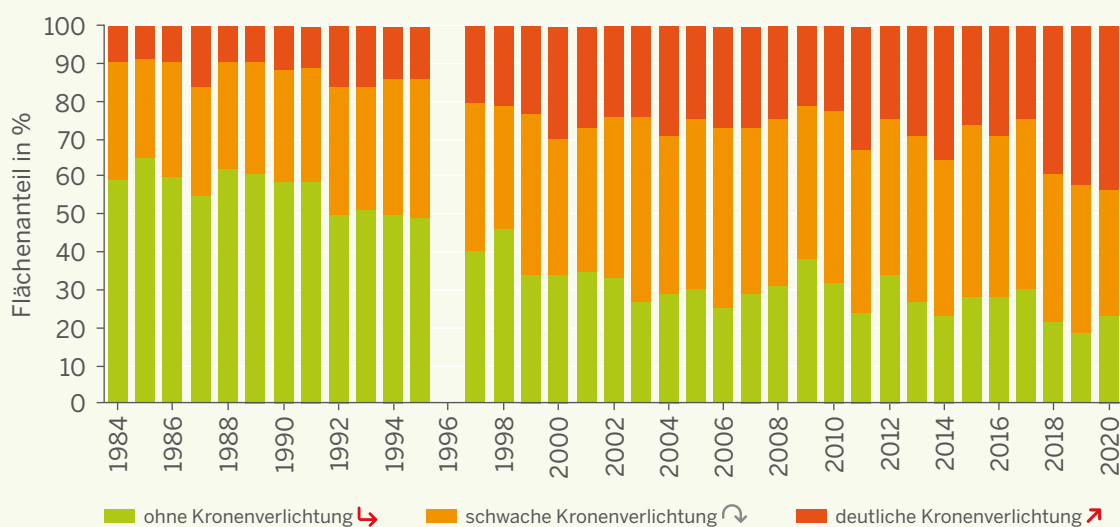


Abb. 73: Entwicklung des Kronenzustandes aller Baumarten an der Waldfläche NRW im Zeitraum 1984 - 2020: Prozentuale Verteilung nach Stufe der Kronenverlichtung. Für das Jahr 1996 liegt kein Landesergebnis vor (Datengrundlage: Waldzustandserhebung, MULNV 2020b)

Im Rahmen jährlicher Waldzustandserhebungen wird in Nordrhein-Westfalen seit 1984 regelmäßig durch den Landesbetrieb Wald und Holz die Kronenverlichtung der Bäume erfasst, ausgewertet und in Waldzustandsberichten dokumentiert. Der Kronenzustand wird nach drei

Stufen bewertet: ohne Kronenverlichtung (bis zu einer Verlichtung von 10 %), schwache Kronenverlichtung (11 - 25 %) und deutliche Kronenverlichtung (> 25 %) (MULNV 2020b).

Die Abbildung 73 zeigt eine kontinuierliche Verschlechterung des Kronenzustandes seit 1984. Der Rückgang der Flächenanteile von Bäumen ohne Kronenverlichtung ist signifikant mit einem quadratisch fallenden Trend, der sich immer weiter asymptotisch einem Wert von ca. 20 % annähert. Während im Jahr 1984 noch an rund 60 % der Fläche bei den Bäumen keine Kronenverlichtung

registriert wurde, so waren dies im Jahr 2020 nur noch etwa 20 %. Gleichzeitig hat der Anteil der Fläche mit Bäumen mit deutlicher Kronenverlichtung signifikant zugenommen. Während dies im Jahr 1984 noch 10 % der Kronen deutlich verlichtet waren, so waren im Jahr 2020 über 60 % davon betroffen, dem dritten neuen Höchstwert in drei Jahren.

Warum verlichten sich die Kronen?

Wesentliche Weiser für die Vitalität der Bäume sind Quantität und Qualität von Nadeln und Blättern, da diese für die Fotosynthese verantwortlich sind und somit für die Bildung von energiereichen organischen Stoffen (MULNV 2020b). Die Kronenverlichtung stellt hierbei einen wichtigen Parameter zur Beurteilung des Kronenzustandes dar. Nur selten wird sie durch einen einzelnen Faktor verursacht, sondern meist durch ein Zusammenspiel von mehreren Faktoren bestimmt. Zudem sind die Ursachen der Kronenverlichtung auch von der Baumart abhängig. Zu den Ursachen zählen das Klima bzw. die Witterung (zum Beispiel Wasser- oder Hitze-stress) sowie Folgen von Bodenversauerung und Eutrophierung durch die chronisch hohen Einträge von Stickstoff- und Schwefelverbindungen (zum Beispiel Nährstoffungleichgewichte, Feinwurzelschäden) in die Waldökosysteme. Weiter beeinflussen Insektenbefall sowie weitere biotische und abiotische Schäden und baumeigene Entwicklungsprozesse, wie zum Beispiel die Intensität der Fruchtbildung und das Alter der Bäume, die Kronenverlichtung (MULNV 2020b, MULNV 2020c).

Der Anteil der Waldfläche mit deutlicher Kronenverlichtung ist 2020 auf 44 % gestiegen. Überdurchschnittlich hohe Temperaturen und der immer früher einsetzende Vegetationsbeginn führen zu einem erhöhten Wasserverbrauch der Bäume, gleichzeitig steht nur wenig Niederschlagswasser zur Verfügung. Dies führt zu einem Wasserstress der Bäume.



Im Jahr 2020 wurde der Schwellenwert für den Wasserstress der Bäume in NRW zum Teil bereits im Mai erreicht, etwa eineinhalb Monate früher als in den Vorjahren (MULNV 2020b). Weiter begünstigen warme Temperaturen, insbesondere milde Winter, die Ausbreitung von Insekten, wie dem Borkenkäfer, welcher insbesondere die Fichten weiter schwächte. Überdies spielt das Alter für den Grad der Kronenverlichtung eine Rolle. Alte Bäume weisen im Mittel höhere Kronenverlichtungen auf als jüngere Bäume. 2020 kam es zum Beispiel bei der Buche auch zum vermehrten Absterben mittelalter und alter Bäume aufgrund von Trockenheit.

Die Ausbildung von Früchten ist für den Baum eine zusätzliche Belastung in Zeiten von Wasserstress. Je nach Zustand des Baumes, kann die Fruktifikation vollkommen zum Erliegen kommen oder Früchte werden frühzeitig abgeworfen. Dies konnte 2020 bei der Eiche beobachten werden, die im Vergleich zum Vorjahr zwar mehr Früchte ausgebildet hat, diese aber früher abwarf (MULNV 2020b).



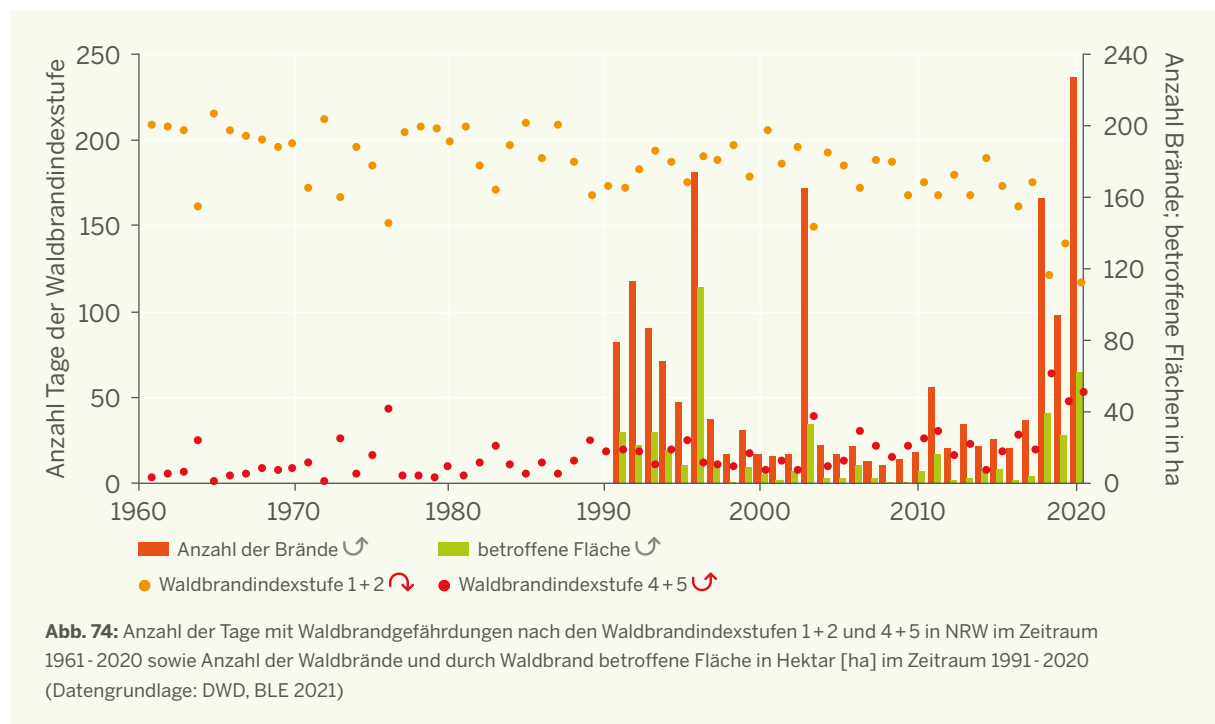
7.4 Waldbrandgefahr und Waldbrände

I

Die Trockenheit verstärkt die Waldbrandgefahr in NRW

Klimatische Veränderungen wie erhöhte Temperaturen und rückläufige Niederschläge in den Frühjahr-, Sommer- und Herbstmonaten und die dadurch verstärkte Verdunstung und Trockenheit können die Waldbrandgefahr in NRW erhöhen. Die Kombination von steigenden Lufttemperaturen mit der deutlich verlängerten Vegetationsperiode dürfte zu einem wesentlich höheren Wasserbedarf führen, der ausgerechnet in voraussichtlich häufiger vorkommenden Extremjahren nicht mehr gedeckt werden kann. Die dadurch entstehenden Vitalitätsausfälle sorgen

zusätzlich für mehr Totholz, welches im Falle eines Brandes dem Feuer mehr Nahrung bietet. Durch Gewitter ausgelöste Waldbrände spielen dabei eine nur untergeordnete Rolle, da diese in Mitteleuropa in der Regel mit Niederschlägen einhergehen. Jedoch ist anzunehmen, dass der voraussichtlich zunehmende Nutzungsdruck durch Erholung suchende Menschen bei den sich ändernden Witterungsbedingungen auch das Risiko von durch Fahrlässigkeit verursachte Waldbrände ansteigen lässt.



Die in der Waldbrandsaison (Anfang März bis Mitte Oktober) tagesaktuellen Information über Waldbrandgefährdungen werden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) nach verschiedenen Modellen, in die unter anderem Klimaparameter wie relative Luftfeuchte, Niederschlagssummen und Windgeschwindigkeiten eingehen, berechnet. Für die Darstellung werden jeweils die beiden untersten Stufen 1+2 (sehr geringe und geringe Gefährdung) und die höchsten Stufen 4+5 (hohe und sehr hohe Gefährdung) zusammengefasst. Statistiken zu den tatsächlich aufgetretenen Waldbränden, den Ursachen und der betroffenen Fläche durch Waldbrände, sammelt bundesweit die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) in der sogenannten Waldbrandstatistik und greift dabei auf die Daten der Länder zurück.

Am Anfang des Zeitraumes 1961 bis 2020 lag die Anzahl der Tage mit den Gefahrenstufen 1 und 2 bei rund 200 Tagen im Jahr (Abbildung 74), die der Gefahrenstufen 4 und 5 bei wenigen Tagen im Jahr. Während in NRW die Tage mit Waldbrandwarnstufen 1 und 2 über den

Gesamtzeitraum um etwa 40 Tage abgenommen haben, ist die Anzahl von Tagen mit den Warnstufen 4 und 5 im selben Zeitraum um etwa 24 Tage gestiegen. Beide Trends sind statistisch signifikant mit quadratischen Trends, die zeigen, dass die Waldbrandgefahr in Nordrhein-Westfalen seit den 60er Jahren insgesamt deutlich zugenommen hat.

Die Aufzeichnungen der Waldbrandereignisse zeigen, dass im Zeitraum 1991 - 2020 durchschnittlich 55 Waldbrände in NRW auftraten, bei einer mittleren betroffenen Fläche von 16 ha im Jahr. Bei diesen beiden Parametern lassen sich ebenso quadratische Trends mit zunächst fallenden und dann ansteigenden Verläufen feststellen. Diese Verläufe ergeben sich durch die hohen Werte in den 90er sowie in den vergangenen Jahren (wie 2018, 2019 und 2020), sodass der Trend auf Basis dieser kürzeren Zeitreihe schwer zu bewerten ist. Einzelne Jahre fallen jedoch mit einer trockenen warmen Witterung, wie 2003, 2018 und 2019 durch eine hohe Anzahl an Waldbränden auf.

Wie werden Waldbrände in NRW erkannt?

In NRW wurden 2020 227 Waldbrände registriert und rund 62 ha Waldfläche durch Brände zerstört, dabei wurde ein Großteil der Waldbrände durch Menschen verursacht (Landesregierung NRW 2021c).

Zur Überwachung der Wälder und der Früherkennung von Waldbränden gibt es in NRW unterschiedliche Ansätze. Die Försterinnen und Förster des Landesbetriebes Wald und Holz NRW achten in den Wäldern während der Waldbrandsaison besonders auf mögliche Waldbrände. Der Regionalverband Ruhr unterhält im Ruhrgebiet drei Feuerwachtürme, zum Beispiel den Feuerwachturm Rennberg in der Haard. Die 40 Meter hohen Türme sind beliebte Aussichtstürme und sind ab April bei trockener Witterung von Beobachtern besetzt (RVR 2021).

Des Weiteren können die zuständigen Bezirksregierungen, zum Beispiel durch die Unterstützung der Polizeifliegerstaffel, Überwachungsflüge anordnen. Dabei werden die betroffenen Waldgebiete überflogen und mithilfe von Infrarotkameras nach Brandherden abgesucht. Mithilfe von Waldbrandabwehrkarten, können die zu überfliegenden Gebiete ermittelt und die Orientierung bei bereits ausgebrochenen Bränden verbessert werden. Die Karten zeigen die Waldbrandgefahr anhand der Vitalität der Bäume, welche über Satellitenbilder ermittelt wird (LB Wald und Holz 2020). Bürgerinnen und Bürger, sowie Hobbypilotinnen und Hobbypiloten, werden ebenfalls in die Meldung von Waldbränden mit einbezogen und gebeten Brände sofort der Feuerwehr zu melden (LB Wald und Holz 2021).





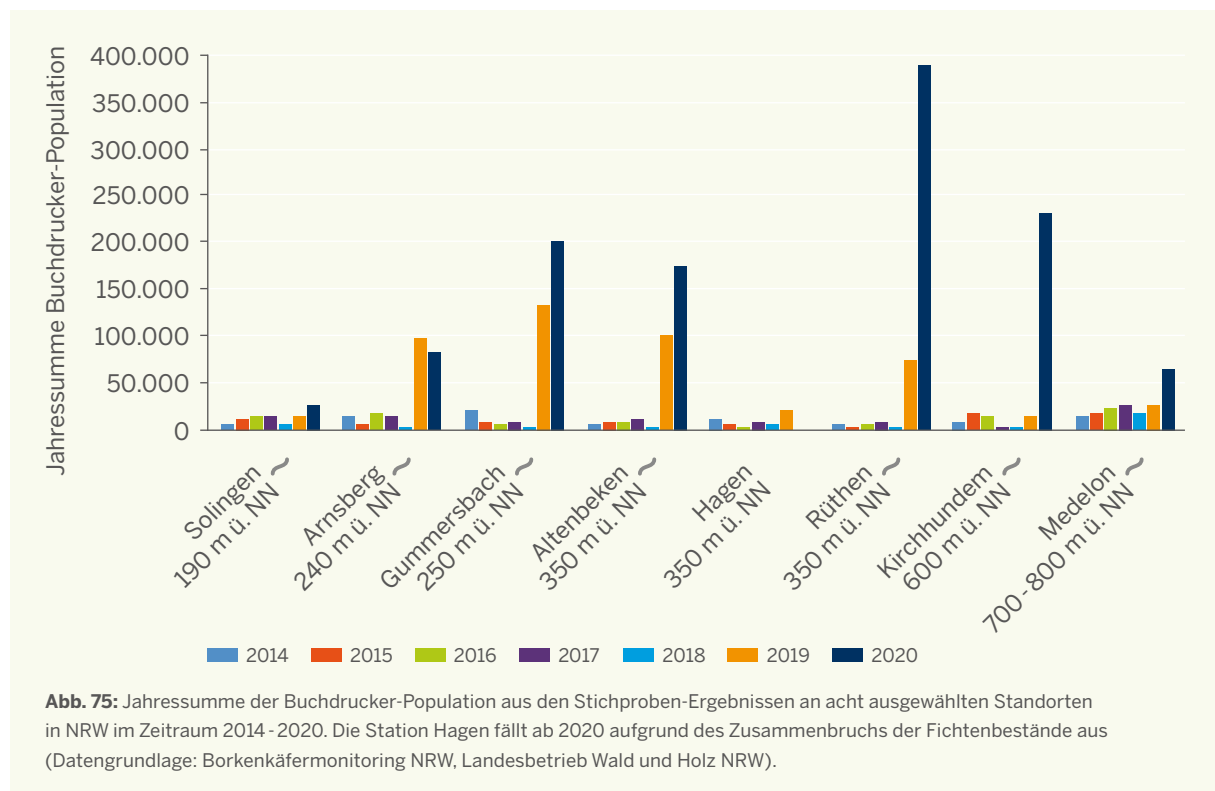
7.5 Buchdruckerpopulation

I

Der Borkenkäfer vernichtet großflächig Fichtenbestände

Schaderreger profitieren durch die sich ändernden Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse im Klimawandel. Wärme und Trockenperioden sind besonders günstig für die Entwicklung von Buchdruckern, auch (Fichten-) Borkenkäfer genannt. Je wärmer und trockener es ist, desto besser können sich die

Buchdrucker vermehren, weil Fichten dann nicht mehr genügend Harz zur Abwehr bilden können. Außerdem bleiben die bei Buchdruckern infolge kühl-feuchter Witterung auftretenden Pilzerkrankungen häufiger aus.



In NRW werden an verschiedenen Standorten mit Fallen Stichprobenergebnisse zur Buchdrucker-Population erhoben. Als Indikator werden die Ergebnisse an acht

Standorten verwendet. Hierbei wurde sich auf die Bereiche des Sauerlands und Weserberglands konzentriert, die einen hohen Fichtenbestand aufweisen.

Die Zeitreihe zur Entwicklung der Buchdrucker-Population umfasst an sieben Stationen mit sieben Jahren (2014 - 2020, Abbildung 75) noch einen recht kurzen Zeitraum (Hagen kürzer, daher keine Trendberechnung möglich). Die Trendberechnungen zeigen noch keine signifikanten Trends. Besonders markant tritt das Jahr 2020 hervor: an vier Standorten werden um ein Vielfaches höhere Jahressummen verzeichnet als in den vorangegangenen Jahren. Hier spiegelt sich der Einfluss des vorangegangenen trocken-warmen Jahres 2018 wider, das dazu geführt hat, dass sich die Buchdrucker stark vermehren konnten (MULNV 2020b).

Die Station Hagen musste 2020 aufgegeben werden, weil es keine Fichtenvorkommen mehr gibt. Mit fortschreitendem Buchdruckerbefall werden nach und nach die tieferliegenden Stationen aus dem Borkenkäfermonitoring herausfallen, weil dort schlicht keine Fichten mehr vorhanden sein werden. Die höhergelegenen Stationen bieten durch die kühleren Bedingungen und die lokale Forstwirtschaft, die aktiv auf den Erhalt der Fichte setzt, dauerhaftere Perspektiven für das Borkenkäfermonitoring.

Buchdrucker



Unter den Borkenkäfern stellt der Buchdrucker einer der wichtigsten und forstlich bedeutsamen Arten dar, da sie umfangreiche Massenvermehrungen durchlaufen kann und vitale Bäume erfolgreich besiedeln kann. Der Buchdrucker befällt typischerweise alte und mittelalte Fichten. Der Befall eines Baumes beginnt mit Pionierkäfern, welche sich in die Rinde einbohren. Das Baumharz verhindert unter normalen Umständen den Befall durch die Käfer, jedoch können durch Trockenheit geschwächte Fichten nicht genug Harz zur Abwehr bilden. Je mehr Käfer einen Baum gleichzeitig befallen, desto weniger Harz steht zur Abwehr zur Verfügung. Durch das Ausstoßen von Pheromonen locken die Pionierkäfer weitere Artgenossen zu dem neuen Wirtsbaum. Die Weibchen legen in sogenannte Muttergänge die Eier. Pro Jahr entstehen bei den aktuellen Klimabe-

dingungen so bis zu drei Borkenkäfer-Generationen (LB Wald und Holz NRW 2019). Während in den Vorjahren vor allem Fichten im Flachland vom Befall durch Borkenkäfer betroffen waren, traten 2020 auch vermehrt Fälle im Bergland auf.

Die Käfer verursachen Schäden an den Bäumen, indem sie sich durch die Schicht zwischen der Rinde und dem Splintholz, dem sogenannten „Bast“ fressen. Somit werden die Leitungen durchtrennt, welche die Nährstoffe von den Nadeln in die Baumwurzeln leiten. Bei stärkerem Befall wird so auch die Wasserzufuhr unterbrochen.

Die Hochsaison der Borkenkäfer ist von April bis September, bei Temperaturen über 16,5 °C. Es reicht allerdings nicht, die Borkenkäfer nur in diesen Monaten zu bekämpfen. Während der Vegetationsperiode müssen die Bestände regelmäßig kontrolliert werden. Bei Befall werden betroffene Bäume sofort eingeschlagen und müssen abtransportiert oder entrindet werden. Pestizide kommen erst zum Einsatz, wenn keine pestizidfreien Bekämpfungsmaßnahmen die Ausbreitung und den Befall weiterer Bäume verhindern können (LB Wald und Holz NRW 2019). Im Winterhalbjahr müssen alle Bäume, in denen sich überwinterte Käfer befinden, aus den Beständen entfernt werden, um die Populationsdichte und den ersten Schwärmflug zu vermindern.



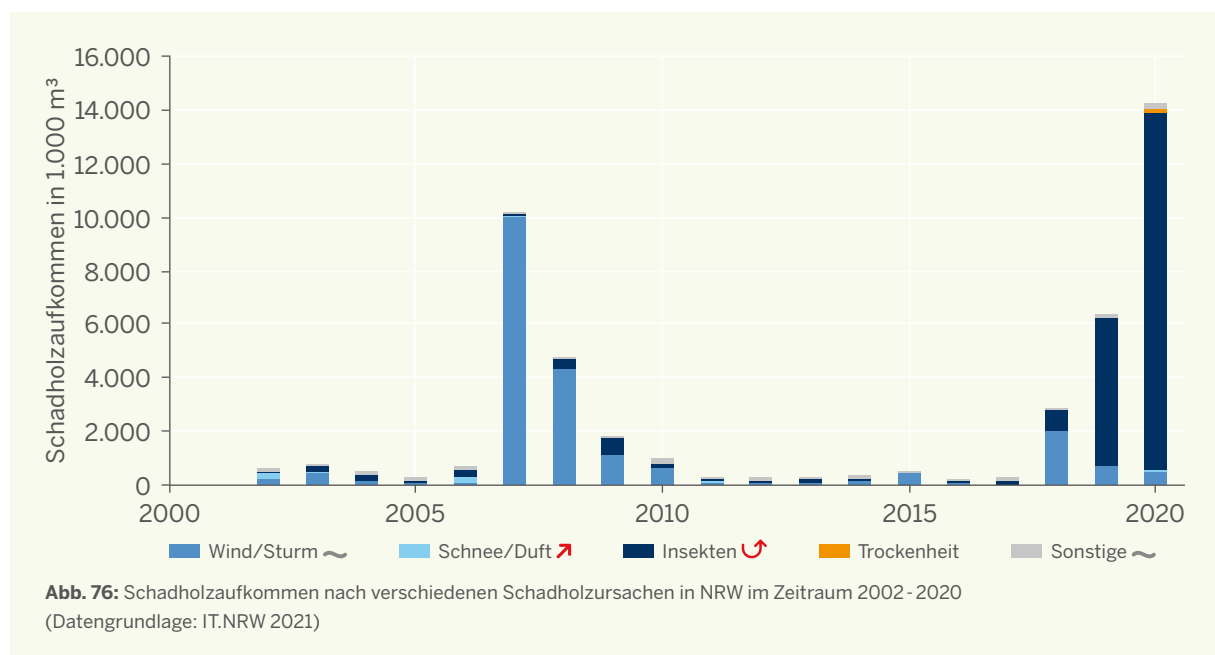
7.6 Durch Schäden verursachter Holzeinschlag

I

Extremereignisse erhöhen das Schadholzaufkommen

Durch den Klimawandel können sich nicht nur die Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse ändern, sondern auch häufiger Extremereignisse wie Dürren,

Starkregen und Stürme oder gehäuft Schaderreger auftreten. Diese Faktoren beeinflussen das Schadholzaufkommen.



Als Indikator wird die angefallene Holzmenge insgesamt und nach Schadensart erfasst. Die Schadensarten sind nach den Kategorien Wind/Sturm, Schnee/Duft, Insekten und Sonstige (herkömmliche Ursachen und neuartige Waldschäden) unterteilt. Seit dem Jahr 2020

wird zum ersten Mal auch die Ursache „Trockenheit“ als eigene Kategorie aufgeführt, da die Schadholzaufkommen durch Trockenheit, vor allem aufgrund des Dürrejahres 2018, erstmals sehr deutlich waren. Zuvor waren diese den sonstigen Ursachen zugeordnet.

Im Mittel über den Gesamtzeitraum 2002 - 2020 beträgt das Schadholzaufkommen insgesamt 2,4 Mio. Kubikmeter pro Jahr (Abbildung 76). Die Zeitreihe ist stark beeinflusst durch Jahre einzelner Ereignisse, wie dem Orkan Kyrill 2007 und den Borkenkäferschäden in den Jahren 2018 bis 2020, in denen die Schadholzmenge bei Höchstwerten von 10 Mio. Kubikmeter in 2007 und 14 Mio. Kubikmeter im Jahr 2020 lag. Statis-

tisch signifikante Änderungstrends sind bisher nur bei den Ursachen „Schnee/Duft“ und Insekten ablesbar. Das schneebedingte Schadholzaufkommen ist über die Gesamtzeitreihe signifikant zurückgegangen. Das Schadholz durch Insekten wird durch einen quadratischen Trend am besten beschrieben, mit einem leichten Absinken am Anfang der Zeitreihe und einem steilen Anstieg ab dem Jahr 2018.

Schadholz, was passiert mit den Mengen?

Im Jahr 2020 wurden nach der amtlichen Statistik 14,5 Millionen Kubikmeter Nadelholz in NRW eingeschlagen. Davon waren über 96 % Schadholz, besonders durch den Borkenkäferbefall (IT.NRW 2021). Die durch Borkenkäfer befallenen Bäume müssen zügig aus den Wäldern abtransportiert werden, um eine weitere Ausbreitung der Käfer einzudämmen (Landesbetrieb Wald und Holz NRW 2019a).

Auch eingeschlagenes Holz aus Borkenkäferkalamitätsflächen kann vielfältig verwendet werden. So kann das von Borkenkäfer befallene Nadelholz in verschiedener Form für konstruktive Verwendung im Holzbau eingesetzt werden. Die technischen Eigenschaften des Holzes sind durch den Borkenkäferbefall unter der Rinde nicht beeinträchtigt. Eventuell vorhandene restliche Käfer werden bei der technischen Trocknung abgetötet. Gelegentlich verfärbt sich das Holz, welches von einem Käfer-

befall betroffen ist blau, dieses Holz kann im nicht sichtbaren Bereichen verbaut werden (Holzbau Deutschland 2021).

Eine weitere Verwendung des Schadholzes liegt in der Energiewirtschaft. Hierbei wird der Rohstoff Holz in Form von Pellets als Alternative von zum Beispiel Öl oder Gas verwendet. Solange ein Holzüberschuss durch Schadholz besteht, ist dies eine alternative Möglichkeit, das Holz zu nutzen (Energieagentur NRW 2021).

Zudem wird das Kalamitätsholz auch exportiert. Im ersten Halbjahr 2020 wurden 33 % mehr Holz als im ersten Halbjahr 2019 exportiert. Insgesamt waren 94,3 % der gesamten Rohholzexporte Fichten und Tannen. Von Januar bis Juni 2020 waren China mit 50 % und die Beneluxstaaten mit 32 % Hauptabnehmer (IT.NRW 2020).





8. Landwirtschaft

Die Landwirtschaft ist ein besonders vom Klimawandel beeinflusster Wirtschaftsbereich. Änderungen bei Temperatur, Niederschlag oder CO₂-Konzentration in der Atmosphäre haben einen direkten Einfluss auf Pflanzenwachstum, die Aufzucht und Haltung von Nutztieren und damit den landwirtschaftlichen Ertrag. Zudem führen steigende Temperaturen und eine höhere Luftfeuchtigkeit voraussichtlich zu einem verstärkten Befall durch Schaderreger.

Es ist daher wichtig, die Klimarisiken in verschiedenen Anbaukulturen stärker zu untersuchen, Anpassungen im Pflanzenbau – insbesondere bei der Bodenbearbeitung und Bewässerung – vorzunehmen sowie die Tierhaltung an die neuen klimatischen Bedingungen anzupassen.



Auswirkungen des Klimawandels

Durch die steigenden Durchschnittstemperaturen in Verbindung mit einer saisonalen Verschiebung der Niederschläge kann es zu Trockenstress bei Pflanzen und damit zu Ertragseinbußen kommen. Für die nähere Zukunft wird zwar davon ausgegangen, dass sich die höhere Temperatur und höhere CO_2 -Konzentration – bei ausreichender Wasserversorgung – zunächst positiv auf die landwirtschaftliche Produktivität auswirken. Langfristig kann der erhöhte CO_2 -Gehalt sowie eine erschwerte Wasserversorgung aber problematisch für die Nährstoffversorgung und das Wachstum der Pflanzen sein (Smith und Myers 2018). Durch die Verschiebung phänologischer Phasen, wie zum Beispiel dem früheren Blühbeginn der Apfelblüte, werden zudem Frostschäden wahrscheinlicher (Indikator 6.1 „Beginn der phänologischen Jahreszeiten“).



Durch die klimatischen Veränderungen kann es zu einem häufigeren Auftreten von Extremwetterereignissen wie Hitzeperioden, Sturm, Hagel oder Starkregen kommen. Dabei können die landwirtschaftlichen Erträge und die Qualität der Produkte durch Trockenschäden, Überschwemmung, Bodenerosion oder Hagelschäden deutlich negativ beeinträchtigt werden. Auch eine eingeschränkte Produktivität (zum Beispiel bei der Milchproduktion) von Nutztieren oder gar deren Verlust können die Folge sein. Extremereignisse können ebenso zu einer Beeinträchtigung oder Schädigung der landwirtschaftlichen Infrastruktur, wie Ställe, Gewächshäuser, Maschinen oder Fahrwege führen.

Durch die klimatischen Veränderungen kann es zum mehrmaligen Auftreten von Schadorganismen im Jahresverlauf und der gehäuften Ausbreitung (neuer) Krankheitserreger kommen. Durch Schaderreger und Krankheiten werden die landwirtschaftliche Produktion und der Viehbestand beeinträchtigt. Höhere Temperaturen bewirken auch eine weitere Ausbreitung von potenziell negativ wirkenden Neobiota (invasive Pflanzen- und Tierarten) oder Schädlingen. Gleichzeitig steigt in Hitze- oder Trockenstresssituationen die Anfälligkeit von Vieh- und Pflanzenbestand für (neue) Krankheitserreger.

Indikatoren-Kernaussagen:

- Phänologische Ereignisse wie die Apfelblüte oder die Aussaat und das Auflaufen wichtiger landwirtschaftlicher Kulturen verfrühen sich.
- Die Erträge von Weizen stagnieren in den letzten 20 Jahren, wobei mit hoher Wahrscheinlichkeit Witterungsgründe einen maßgeblichen Anteil haben.
- Es zeigt sich bisher kein Trend bei der Höhe der Versicherungsleistungen aus Hagel- und Elementarschadensversicherungen an die Landwirtschaft.
- Die Wärmebelastung für landwirtschaftliche Nutztiere nimmt zu.



Tab. 10: Übersicht der Indikatoren zum Handlungsfeld 8 „Landwirtschaft“

Indikator		Einheit	räumlicher Bezug	Zeitreihe	Mittelwert Zeitreihe
8.1 Beginn der Apfelblüte		Tag im Jahr	NRW	1951 - 2020	119
8.2 Aussaat und Auflaufen von Mais und Winterweizen	NRW, Aussaat Mais	Tag im Jahr	NRW	1968 - 2020	118
	NRW, Auflaufen Mais	Tag im Jahr	NRW	1968 - 2020	133
	NRW, Abstand Ereignisse Mais	Tage	NRW	1968 - 2020	15
	NRW, Aussaat Winterweizen	Tag im Jahr	NRW	1951 - 2020	289
	NRW, Auflaufen Winterweizen	Tag im Jahr	NRW	1951 - 2020	302
	NRW, Abstand Ereignisse Winterweizen	Tage	NRW	1951 - 2020	14
8.3 Ertragsschwankungen	Weizenerträge	t/ha	NRW	1980 - 2020	77,4
8.4 Versicherungsleistungen bei Ertragsausfällen	Index Hagel	%	NRW	2010 - 2020	0,7
	Index Elementarschäden	%	NRW	2010 - 2020	1,7
8.5 Wärmebelastung in der Tierhaltung	THI		Weilerswist-Lommersum (147 m)	1947 - 2020	28
	THI		Essen-Bredeney (150 m)	1948 - 2020	18
	THI		Kleve (46 m)	1948 - 2020	25
	THI		Bad-Salzuflen (134 m)	1950 - 2020	21
	THI		Raden-Kleinendorf (41 m)	1951 - 2020	26
	THI		Wuppertal-Buchenhofen (134 m)	1959 - 2020	27
	THI		Lennestadt-Theten (286 m)	1962 - 2020	24

- steigender Trend
 fallender Trend
 Trend mit Trendumkehr: zuerst fallend, dann steigend
 Trend mit Trendumkehr: zuerst steigend, dann fallend
 kein Trend

- günstige Entwicklung
 ungünstige Entwicklung
 keine Bewertung der Entwicklung möglich oder gleichzeitig günstige und ungünstige Entwicklungsaspekte vorhanden

		Mittelwert der Klimanormalperioden						Querbezüge zu anderen Handlungsfeldern
	Trend Zeitreihe	Änderung Zeitreihe	1951-1980	1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2020	
		-17	124	124	121	117	113	4 (S. 82), 5 (S. 114), 6 (S. 130)
		-8	-	-	119	118	116	4 (S. 82), 5 (S. 114), 6 (S. 130)
		-11	-	-	135	133	131	
		-3	-	-	16	15	15	
		-9	292	291	289	286	285	
		-9	305	305	304	301	285	
		0	13	14	15	15	14	
		+27	-	-	-	75,8	82,8	4 (S. 82), 5 (S. 114)
		-	-	-	-	-	-	17 (S. 266)
		-	-	-	-	-	-	
		+18	21	22	26	30	36	4 (S. 82), 16 (S. 262)
		+14	13	14	17	20	23	
		+22	18	19	20	26	33	
		+11	17	19	20	22	24	
		+26	19	20	23	29	34	
		+18	-	22	25	30	33	
		+19	-	19	24	27	29	

THI = luftfeuchtekorrigerter Hitzestressindex (temperature-humidity index)



8.1 Beginn der Apfelblüte

I

Der Frühling beginnt immer früher – die Apfelblüte zeigt es an

Durch die im Frühjahr immer früher und immer stärker ansteigenden Temperaturen (Indikator 1.2 „Durchschnittliche Jahreszeitenlufttemperatur“) verändern sich auch die jahreszeitlichen Entwicklungen in der Pflanzenwelt. Das Beobachten der jahreszeitlichen Entwicklungsphasen verschiedener Schlüsselpflanzen wird unter dem Begriff der Phänologie zusammengefasst. Mithilfe von systematischen phänologischen Beobachtungen – hier das Eintreten der Apfelblüte als Zeiger für den Beginn des Vollfrühlings – können klimatische Veränderungen und ihr Einfluss auf die Entwicklung von Pflanzen und Ökosystemen ermittelt werden. Anders als direkte Temperaturmessungen spiegelt die Phänologie also eine Reaktion der Natur auf ihre Umwelt

wieder. Daher ist sie ein wichtiger und besonders sensibler Bioindikator für den Klimawandel.

Phänologische Beobachtungen an Pflanzen mit Aussagekraft für Temperaturveränderungen sind vor allem in gemäßigten Klimazonen möglich, da hier die Temperatur ausschlaggebend für den Eintritt der verschiedenen Entwicklungsphasen ist. Vor allem die Frühlingsphasen zeichnen sich durch eine starke Korrelation mit der Temperatur aus (maßgeblich ist die Temperatur der einer Entwicklungsphase vorausgehenden zwei bis drei Monate). Der Eintritt der Herbstphasen dagegen wird von zahlreichen anderen Faktoren (zum Beispiel Niederschlagsmenge im Sommer, Einstrahlung etc.) mitbestimmt.

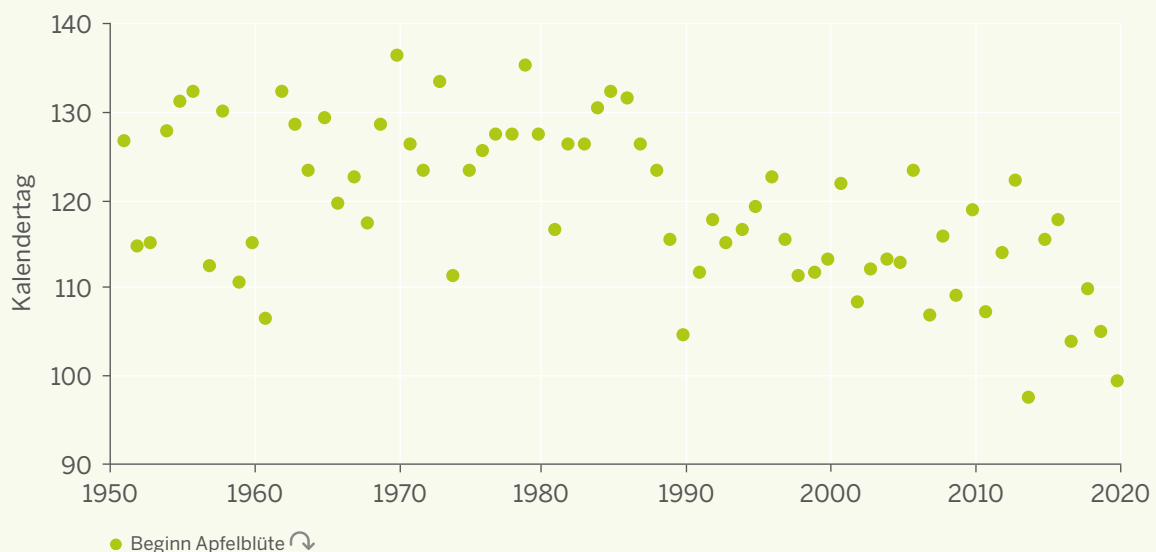


Abb. 77: Mittlerer Beginn der Apfelblüte in NRW im Zeitraum 1951 - 2020 (Datengrundlage: DWD)

Die Apfelblüte zeigt den Eintritt des sogenannten Vollfrühlings an. Als Indikator wird der Blühbeginn der Apfelblüte (Kalendertag) als Gebietsmittel für NRW verwendet. Das Gebietsmittel für NRW wird als Mittelwert aus den Daten der Jahresmelder der phänologischen Beobachtungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für NRW berechnet.

Abbildung 77 stellt die Ergebnisse der systematischen phänologischen Datenerhebung der Apfelblüte des Deutschen Wetterdienstes dar, die auf etwa 80 Stationsmeldungen in NRW beruhen. Über den Zeitraum der gesamten Messungen 1951 - 2020 begann die Apfelblüte in Nordrhein-Westfalen im Mittel am 119. Tag im Jahr, dem 29. April.

Die Betrachtung der gesamten Zeitreihe zeigt für das Auftreten dieser phänologischen Phase den für Klimagrößen typischen, stark variierenden Verlauf von witterungsgeprägten Ereignissen. Die Trendanalyse

des Zeitraums von 1951 bis 2020 ergibt, dass sich die Apfelblüte in Nordrhein-Westfalen um 17 Tage verfrüht hat. Der Trend ist statistisch signifikant mit einem quadratischen Trend, der zunächst leicht bis in die 70er Jahre ansteigt und danach stark abfällt. Trat der Beginn der Apfelblüte am Anfang der Zeitreihe noch um den 121. Tag im Jahr (1. Mai) auf, so setzt sie in den vergangenen Jahren schon um den 104. Tag im Jahr (14. April) ein. Selbst in „kühleren“ Jahren der letzten 30 Jahre, wie 1996, 2001 und 2005 hat die Apfelblüte in Nordrhein-Westfalen noch vor dem 4. Mai (124. Tag im Jahr) begonnen – also dem Mittelwert der als Referenzperiode bezeichneten Klimanormalperiode 1961 bis 1990. Darüber hinaus war 2014 das erste Jahr der Messreihe, in dem die Apfelblüte in Nordrhein-Westfalen bereits vor dem 100. Tag im Jahr, dem 10. April, begann. 2020 begann der Apfel in Nordrhein-Westfalen ebenfalls vor diesem Tag mit seiner Blüte (Abbildung 77).

Die Apfelblütenaktion – mitmachen und den Frühling dokumentieren!

Die Apfelblüte signalisiert den phänologischen Vollfrühling. Dieser beginnt nicht jedes Jahr zum gleichen Datum. Und die Äpfel blühen vor allem auch nicht überall gleichzeitig. Genau diese natürlichen Schwankungen machen die Sache aber für die Wissenschaft besonders spannend. Klimaänderungen etwa lassen sich so über Jahre und Jahrzehnte besonders gut und ohne komplizierte Messinstrumente festhalten. Darum ruft der SWR jedes Jahr – 2021 bereits zum 16. Mal – in seiner Aktion „Apfelblütenland“ dazu auf, den Beginn der Apfelblüte zu melden.

An dieser Aktion kann sich jede und jeder beteiligen: einfach die beginnende Blüte, die Vollblüte und das Verblühen des eigenen Apfelbaums oder eines Apfelbaums in der Nähe mit Angaben zum Standort auf der Seite www.swr.de/wissen/apfelbluete/index.html melden. Ein Foto kann das Ereignis dokumentieren und damit hat man auch die Chance, mit dem eigenen Apfelbaum in der Bildergalerie zu landen.



Die Daten werden anschließend wissenschaftlich genutzt. Die Uni Heidelberg sowie die Pädagogische Hochschule Heidelberg werten die Daten aus, stellen sie in Karten dar und berechnen, wie schnell der Frühling in Deutschland voranschreitet: 2020 beispielsweise mit einer Geschwindigkeit von 37 Kilometern pro Tag. Durch den Vergleich mit zurückliegenden Jahren können Aussagen zum Klimawandel getroffen werden – sofern diese Aktion möglichst viele weitere Jahre weiterläuft: denn der Klimawandel zeigt sich erst in langen Zeitreihen.



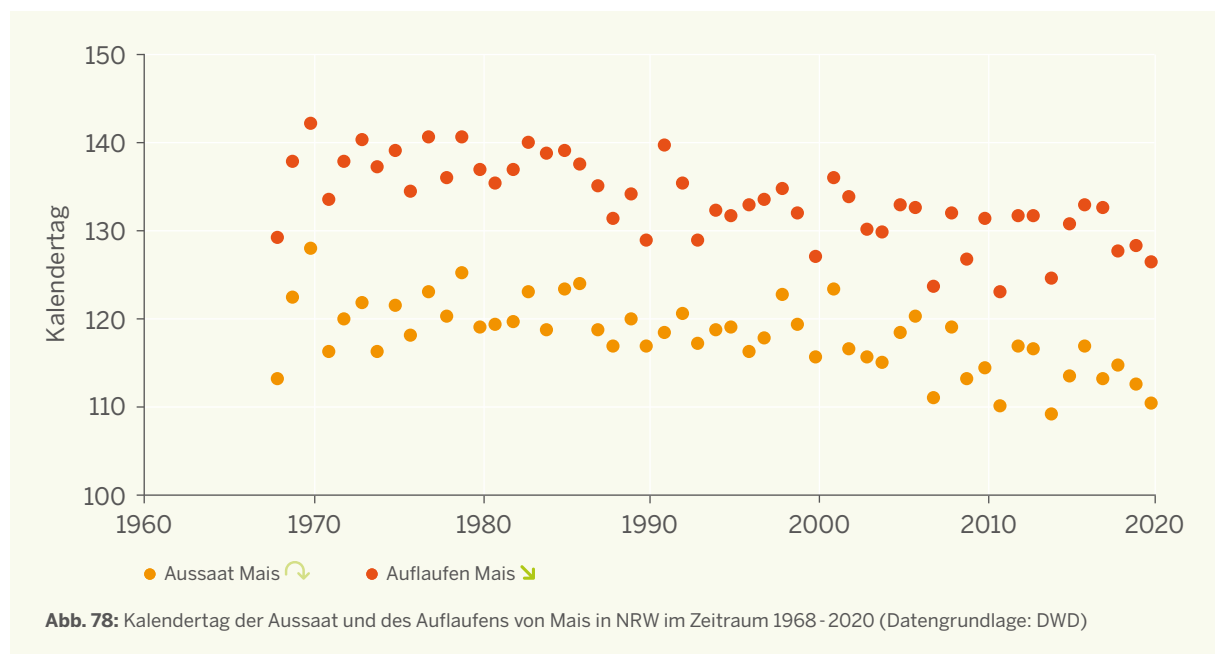
8.2 Aussaat und Auflaufen von Mais und Winterweizen

I

Aussaat und Auflaufen von Mais und Winterweizen verfrühen sich

Analog zur Apfelblüte wirken sich die starken Temperaturzunahmen im Frühling und immer noch sehr markanten Temperaturzunahmen im Herbst (Indikator 1.2 „Durchschnittliche Jahreszeitenlufttemperatur“) auch auf die Aussaat und das Auflaufen

(der Zeitpunkt, wenn der Keimling die Ackerkrume durchbricht) von Mais und Winterweizen aus. Die phänologischen Daten zeigen auch hier deutliche Verschiebungen an.

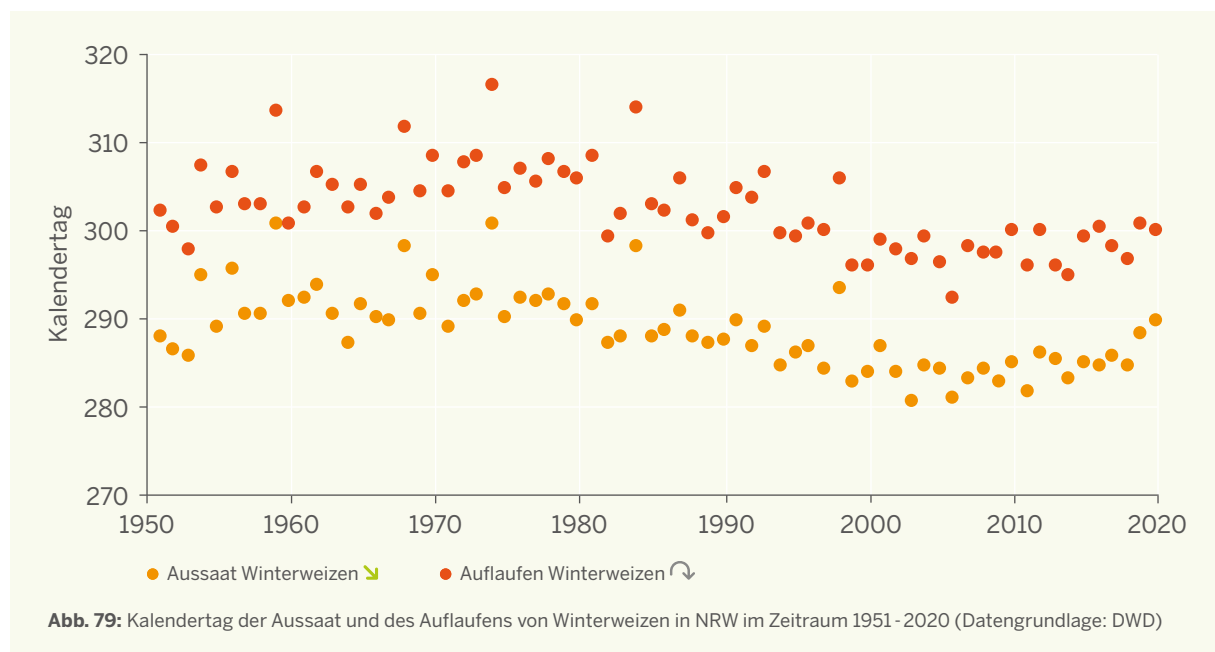


Die für die nordrheinwestfälische Landwirtschaft relevantesten Feldfrüchte sind nach Auskunft der Landwirtschaftskammer NRW für das Sommerhalbjahr Zuckerrübe und Mais, für das Winterhalbjahr Winterweizen und Winterraps. Als Indikator wird hier der Termin des Bestellens und Auflaufens (Tag im Jahr) für Mais und Winterweizen als Gebietsmittel für NRW verwendet. Das Gebietsmittel wird als Mittelwert aus den Daten der Sofort- und Jahresmelder des phänologischen Beobachtungsnetzes des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für NRW berechnet, aus dem im Jahr 2020 etwa 144 Stationen in NRW Daten geliefert haben.

Die Abbildungen 78 und 79 stellen die jeweiligen Tage im Jahr dar, an denen Mais und Winterweizen ausgesät werden und auflaufen. Beim Mais wurde im Mittel über den Gesamtzeitraum 1968 bis 2020 am 118. Tag im Jahr (28.4.) ausgesät und das Auflaufen erfolgte am 133. Tag im Jahr (15.5.) (Abbildung 78). Die Aussaat von Mais verfrühte sich zwischen 1951 und 2020 um knapp acht Tage. Der Beginn des Auflaufens fand im selben Zeitraum elf Tage früher statt. Beide Trends sind statistisch signifikant. Insgesamt verringerte sich der Abstand zwischen den beiden Ereignissen im Zeitraum 1986 - 2020 um etwa drei Tage. Winterweizen wurde über den Gesamtzeitraum 1951 - 2020 im Mittel am

289. Tag im Jahr (16.10.) ausgesät und durchstieß am 302. Tag im Jahr (29.10.) die Bodenoberfläche (Abbildung 79). Die Aussaat fand zwischen 1951 und 2020 im Mittel neun Tage früher statt. Der Beginn des Auflaufens verfrühte sich im selben Zeitraum ebenfalls um neun Tage. Die beiden Trends sind ebenfalls statistisch signifikant fallend.

Bei der Phänologie landwirtschaftlicher Kulturen kann der menschliche Einfluss einen gewissen Einfluss auf die Ereignisse haben. Diese sind beispielsweise verändertes Saatgut durch Züchtung, eine verbesserte Anbaupraxis oder die Art der Bodenbearbeitung. Insbesondere beim Mais kann die Veränderung von Aussaat- und Auflaufterminen aber überwiegend auf die früher einsetzende Vegetationsperiode und somit den Klimawandeleinfluss zurückgeführt werden. Beim Winterweizen muss mitberücksichtigt werden, dass die Aussaat aufgrund der verlängerten Vegetationsperiode eher später erfolgt, um ein „Überwachsen“, also ein zu starkes Wachstum vor dem Wintereinbruch, oder auch die Gefahr des Befalls durch Schaderreger zu vermeiden. Somit wird bei der Aussaat des Winterweizens bereits die Anpassung der Landwirte an die Klimawandelbedingungen miteingefasst.



Bauernregeln im Klimawandel

Seit jeher haben Menschen versucht, dem Phänomen Wetter auf die Spur zu kommen. Gerade die Landwirtschaft war und ist auf genaue Naturbeobachtungen angewiesen, denn ihr Ernteerfolg hängt sehr stark vom Wetter ab. Traditionelle Bauernregeln galten deshalb als zuverlässige Wetterorakel. Sie spiegeln meteorologische Wahrscheinlichkeiten wieder und beruhen auf zum Teil jahrhundertealten Erfahrungswerten. Dabei muss beachtet werden, wo eine Bauernregel entstanden ist: denn sie spiegelt immer eine lokale Erfahrung wieder.

Bekannte Bauernregeln für den Frühling sind etwa: „War bis zu Dreikönig (6. Januar) kein rechter Winter, dann kommt auch keiner mehr dahinter.“ „Agatha und Dorothee (5. und 6. Februar) sind reich an Schnee.“ „Viel Nebel im Frühjahr, viel Gewitter im Sommer.“ „Wenn der Frühling Wärme bringt, bis weit in den Herbst die Grille singt.“ „Lässt der März sich trocken an, bringt er Brot für jedermann.“

Durch die kontinuierlich steigenden Temperaturen hat sich die Häufigkeit bestimmter Großwetterlagen verändert. Beobachtungen zeigen, dass der phänologische Frühling früher anfängt und sich die Vegetationsperiode verlängert hat. Der Austrieb von Laubgehölzen, Reben sowie die Obstbaumblüte haben sich nach vorne verlagert. Immer mal wieder hat dies zur Folge, dass plötzlich auftretende Kaltluftströmungen oder Spätfröste, die manchmal bis in den Mai auftreten, die jungen Triebe und Blüten

zerstören. Dies geschah beispielsweise im April 2017. Die Apfelbäume standen bereits relativ früh in voller Blüte, als einige Frostnächte hintereinander mancherorts für einen fast kompletten Ausfall der Apfelernte sorgten (Indikator 8.1 „Beginn der Apfelblüte“). Ebenfalls eine Folge der Klimaerwärmung ist, dass sich die Erntezeiten von Getreide, Wein und Gartenfrüchten verfrühen. Die Zwetschgenernte fällt mittlerweile häufig in die Urlaubszeit im Sommer und die Weinlese beginnt statt im September bereits Mitte August.

In den letzten Jahren ist zu beobachten, dass es immer häufiger zu blockierenden Wetterlagen kommt: Hoch- und Tiefdruckgebiete werden stationär, sodass sich das mit ihnen verbundene Wetter wochenlang nicht ändert. Treten in solchen Fällen Extremwetterlagen wie Hitze- oder Kältewellen, anhaltende Stürme oder besonders niederschlagsreiche oder trockene Phasen auf, kann das „schlechte“ Wetter wochenlang anhalten.

Als Fazit lässt sich festhalten, dass man kurzfristigen Naturbeobachtungen und entsprechenden Ableitungen wie „Abendrot – Schönwetterbot“ oder „Wenn die Schwalben niedrig fliegen, werden wir bald Regen kriegen“ nach wie vor Glauben schenken darf. Jahresvorhersagen, wie sie in vielen Bauernregeln vorkommen, werden durch den Klimawandel und den Temperaturanstieg jedoch immer ungenauer und weniger verlässlich.





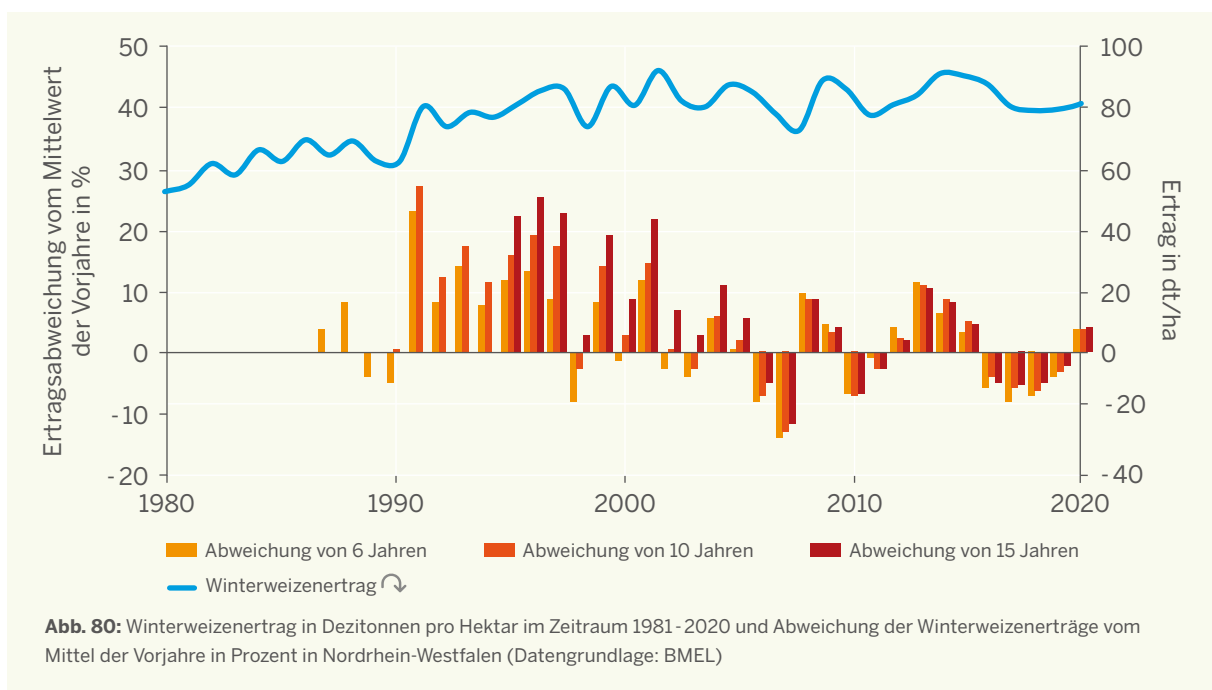
8.3 Ertragsschwankungen

I

Witterungsextreme gefährden Ertragssicherheit

Die Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse sind für die landwirtschaftliche Produktion entscheidende Einflussfaktoren. Manche Kulturen brauchen einen Frostreiz zum Auskeimen, andere brauchen

bestimmte Temperatur- und Niederschlagssummen, um optimal zu wachsen. Ändern sich die Verhältnisse durch den Klimawandel, wirkt sich dies auf die landwirtschaftlichen Erträge aus.



Als eine der Hauptanbauarten in NRW wird die Ertragsentwicklung des Winterweizens in NRW betrachtet. Abbildung 80 stellt die verfügbaren Auswertungen der Winterweizenerträge von Nordrhein-Westfalen dar, die vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) erhoben werden. Über den Gesamtzeitraum 1980-2020 liegt der Ertrag des Winterweizens in NRW im Mittel bei 77,6 Dezitonnen pro Hektar (dt/ha). In dieser Zeitreihe fand eine statistisch signifikante Zunahme des Ertrags um 26,6 dt/ha statt, jedoch stagnie-

ren die Erträge seit der Jahrtausendwende. Insbesondere in den 80er und 90er Jahren beruhte der Anstieg zu erheblichen Teilen auf Fortschritten im Pflanzenschutz, wie neue und mehr Wirkstoffe, sowie der Düngung (vor allem zunehmende N-Düngung). Letztere Punkte sind seit etwa 2000 nicht mehr relevant und der nach wie vor erfolgende Zuchtfortschritt kann – vermutlich aus klimatischen Gründen, aber auch wegen rückläufiger Verfügbarkeit wirksamer Pflanzenschutzmittel – in der Praxis nicht mehr realisiert werden.

Zusätzlich wird die Abweichung des Ertrags vom Mittelwert der 6, 10 und 15 Vorjahre dargestellt (Abbildung 80). Hieran erkennt man beispielsweise den Einfluss der Witterung in einzelnen Jahren. Besonders auffällig ist der Zeitraum der drei Jahre 2017 bis 2019: hier wurde ein Ertragsrückgang zu den Vorjahren festgestellt, der im Zusammenhang mit deutlichen Abweichungen bei den jahreszeitlichen Niederschlägen in diesen Jahren steht (Indikator 2.2 „Durchschnittliche Jahreszeitenniederschlagssumme“). 2017 hatte einen zu trockenen Frühling und einen zu nassen Sommer

und Herbst. 2018 war im Sommer und Herbst extrem trocken und heiß, 2019 war der Sommer ebenfalls zu trocken. Im Jahr 2020 stiegen die Erträge wieder und es kam zu positiven Abweichungen. Dies mag an den Sommerniederschlägen 2020 liegen, die zwar unterdurchschnittlich im Vergleich zu den vorhergehenden Klimanormalperioden waren. Aber sie waren deutlich ergiebiger als in den Jahren 2018 und 2019. Es bleibt abzuwarten, wie sich die Niederschlagsverhältnisse in den nächsten Jahren entwickeln und wie sie die Erträge beeinflussen werden.

Dürrephasen und ihre Folgen für Land- und Forstwirtschaft

Durch den vom Menschen verursachten Klimawandel werden sowohl steigende Jahresmitteltemperaturen als auch eine Verschiebung der saisonalen Niederschlagsmengen beobachtet. Dabei kommt es immer häufiger vor, dass der Sommer nicht mehr – wie zu Beginn der Wetteraufzeichnungen – die niederschlagsreichste Zeit im Jahr ist. In den letzten zehn Jahren zeigt sich zusätzlich, dass die Frühjahre weniger Niederschlag mit sich bringen, was gerade zu Beginn der immer früher beginnenden Vegetationszeit problematisch werden kann. Immer deutlicher zeigen sich die Auswirkungen durch unterdurchschnittliche Niederschläge über längere Perioden, was als meteorologische Dürre bezeichnet wird.

Die gestiegenen Jahresmitteltemperaturen führen zu erhöhten Verdunstungsraten der Böden und der Vegetation, was einen Wassermangel für das Pflanzenwachstum im durchwurzelten Boden und damit Bodentrockenheit zur Folge haben kann. Weiterhin bewirkt die Erhöhung der Jahresmitteltemperatur eine Verlängerung und einen früheren Beginn der Vegetationszeit. Dadurch wird sich die Situation tendenziell weiter verschärfen, denn je eher das Pflanzenwachstum beginnt, desto eher setzt der Wasserbedarf der Vegetation ein und zehrt am gespeicherten Bodenwasser. Eine zunehmende Trockenheit der Böden in Nordrhein-Westfalen war in den letzten beiden Dürre Jahren 2018 und 2019

zu beobachten und hatte beispielsweise Auswirkungen auf die Landwirtschaft mit Ernteaussfällen und die Forstwirtschaft mit Baumschäden.

Die veränderte Wasserversorgung der Böden wirkt sich weiter auf die Funktionen des Bodens als Lebensraum für Tiere und Pflanzen oder auch als Wasserspeicher aus. So ist zu beobachten, dass in den letzten drei Jahren die Bodenfeuchte in den Messstellen (Indikator 5.2 „Bodenfeuchte“) zurückgeht, oder dass der Standardisierte Niederschlagsindex für das gleitende Mittel von zwölf Monaten ebenfalls in den letzten Jahren deutlich niedriger ist als in den Jahren vor 2008 (Indikator 4.1 „Standardisierter Niederschlagsindex (SPI)“). Sehr eindrucksvoll ist auch die in den letzten drei Jahren besonders markante Schere zwischen potenzieller Verdunstung (Evapotranspiration), die bei ungehinderter Wasserzufuhr theoretisch möglich wäre, und der realen Verdunstung, die durch das tatsächliche Wasserdargebot im Boden limitiert wird (Indikator 4.2 „Evapotranspiration“). Ab dem Jahr 2017 gab es auch eine markante Verschlechterung des Kronenzustands aller Baumarten (Indikator 7.3 „Waldzustand“) und einen regelrechten Sprung bei der Anzahl der Tage mit einer Waldbrandindexstufe 4 + 5 (Indikator 7.4 „Waldbrandgefahr und Waldbrände“). All diese hier beispielhaft genannten Klimafolgen können im Zusammenhang mit dem Niederschlagsdefizit der letzten drei Jahre gesehen werden.



8.4 Versicherungsleistungen bei Ertragsausfällen

I

Hohes Risiko für die Agrarversicherung – Schadensatz spiegelt Extremereignisse

Durch die höheren Temperaturen, in Verbindung mit einer saisonalen Verschiebung der Niederschläge und trockeneren Sommern, kann es bei Trockenstress zu Ertragseinbußen kommen. Zusätzlich können durch die klimatischen Veränderungen Extremwetterereignisse (Hitze, Spätfrost, Starkregen etc.) häufiger auftreten. Dabei können die landwirtschaftlichen Erträge und die Qualität der Produkte durch Trockenschäden, Frostschäden, Überschwemmung, Bodenerosion oder Hagelschäden beeinträchtigt werden.

Hagelereignisse sowie Sturm, Starkregen und Frost (erweiterte Elementarschäden) lassen sich in der Landwirtschaft versichern. Auch Dürreversicherungen werden bereits angeboten, doch diese Versicherungen spielen noch keine große Rolle in NRW, da sie eher kostenintensiv sind. In anderen Ländern, wo Beihilfen zu Dürreversicherungen gezahlt werden, ist deren Nutzung höher. Durch die potenziell häufiger werdenden und auch intensiveren Extremereignisse werden die Schadenssummen in der landwirtschaftlichen Versicherung perspektivisch ansteigen.

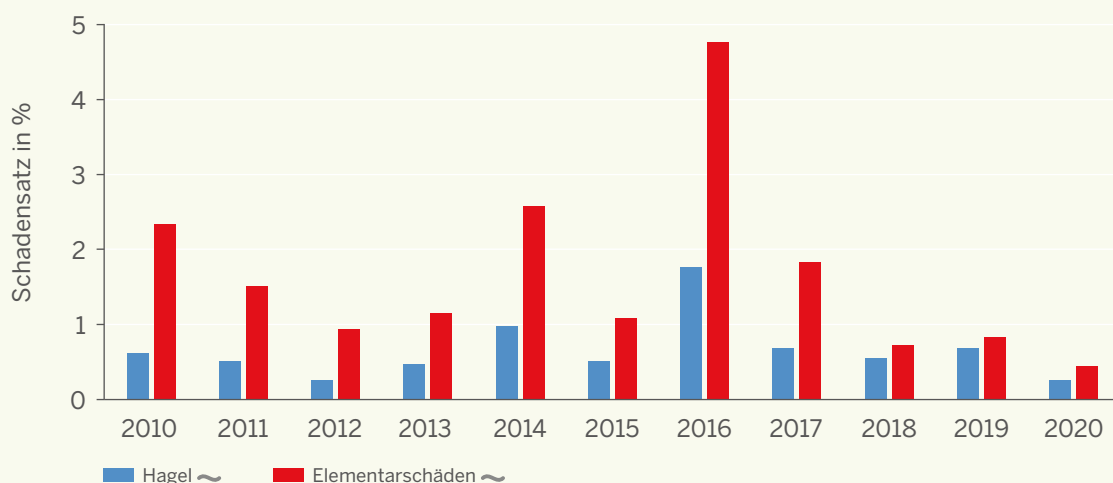


Abb. 81: Schadensatz (Verhältnis des Schadenaufwandes zur Versicherungssumme) der Hagel- und Elementargefahrenversicherungen im Agrarbereich in Prozent in Nordrhein-Westfalen im Zeitraum 2010 - 2020 (Datengrundlage: Vereinigte Hagelversicherung sowie Münchener & Magdeburger Agrar AG)

Zu den durch Extremereignisse verursachten Schadenssummen liegen aus den landwirtschaftlichen Versicherungen keine Daten vor, sodass hierzu keine Aussagen gemacht werden können. Daher zeigt dieser Indikator in Abbildung 81 die Schadensätze der Hagel- und Elementarversicherungen der für NRW bedeutendsten Versicherungsunternehmen im Agrarbereich im Zeitraum 2010 - 2020. Der Schadensatz ist das Verhältnis des Schadenaufwandes zur Versicherungssumme, jeweils in Euro. Im Zeitraum 2010 - 2020 wurden im Durchschnitt jährlich 0,7 % der Versicherungssumme für Hagelschäden von den Versicherern ausbezahlt; bei den weiteren Elementargefahren waren es 1,7 %. Noch zeigen sich bei der statistischen Prüfung für beide Zeitreihen keine signifikanten Änderungstrends. Im Gegensatz zu den Gebäudeversicherungen (Indikator 17.1 „Schadenaufwand in der Wohngebäudeversicherung“ und 17.2 „Elementarschäden“) sind im Agrarbereich die Schadensätze in Prozent dargestellt nicht im Promillebereich. Demnach ist das Risiko für Schadensleistungen für die Agrarversicherung deutlich höher als für die Wohngebäudeversicherung.

Da bei den Versicherungen gegen Hagel der Schadensatz über den Gesamtzeitraum kaum schwankt, lassen sich hier ganz deutlich Jahre mit außergewöhnlichen Hagelschäden ablesen, zum Beispiel 2016. Bei den Elementargefahren ist es aufgrund der Zusammenfassung verschiedener Extremereignisse schwieriger direkte Kausalzusammenhänge zu erkennen. Der höchste Index bei den Elementarversicherungen ist ebenfalls im Jahr 2016 zu erkennen. Dadurch kann vermutet werden, dass die in diesem Jahr besonders hohen Schadensätze durch Begleiterscheinungen von Hagelunwettern, wie Sturmschäden oder Starkniederschläge, verursacht wurden. Zumindest die Starkregenindikatoren 2.4 „Niederschlagsextreme“ und 2.5 „Überschreitungsstunden Starkregenwarnstufe ≥ 3 “ zeigen, dass 2016 eher überdurchschnittlich hinsichtlich dieser Extremereignisse gewesen ist. Würde ein eigener Schadensatz für Dürreversicherungen erhoben werden, sähe die Zeitreihe vermutlich zumindest für 2018 ganz anders aus.

Nicht zu nass, nicht zu trocken, nicht zu spät, nicht zu früh, nicht zu warm und nicht zu kalt...

... muss für die Landwirte das Wetter sein, damit sie optimalen Ertrag von ihren Feldern ernten können. Stimmen die Witterungsbedingungen eines Jahres nicht, wachsen die Pflanzen nicht so, wie sie sollen und es droht ein verminderter Ertrag für die Bauern.

Der landwirtschaftliche Ertrag kann durch viele Maßnahmen positiv beeinflusst werden: durch Züchtung werden Hochleistungs-Pflanzen entwickelt oder solche, die gegen bestimmte Krankheiten resistent oder an widrige Umweltbedingungen gut angepasst sind. Der Landwirt selbst kann durch die optimale Wahl des Saattermins, des Standortes, durch Maßnahmen zur Bodenverbesserung, durch Düngung, durch Schädlingsbekämpfung und vieles mehr seinen Ertrag ebenfalls beeinflussen.

Das Einzige was er nicht steuern kann, ist das Wetter. So war es im aktuellen Jahr 2021 im Frühjahr sehr lange noch sehr kalt, in den Jahren 2019 und 2020 hingegen sehr warm und vor allem viel zu trocken. Dazu kommt es im Hochsommer immer häufiger zu unvorhersehbaren Unwettern: Hagel, Sturm und Starkregen können im Extremfall ganze Ernten vernichten.

Doch ganz machtlos ist ein Landwirt nicht gegen diese Wettereinflüsse: inzwischen schließen immer mehr Bauern Versicherungen ab gegen durre-, nasse-, frost-, kälte-, und hitzebedingte Ernteaussfälle. Mit Fortschreiten des Klimawandels und den damit einhergehenden häufigeren Unwetterereignissen werden immer mehr solcher Versicherungspolicen angeboten. Auch das ist eine Folge des Klimawandels.



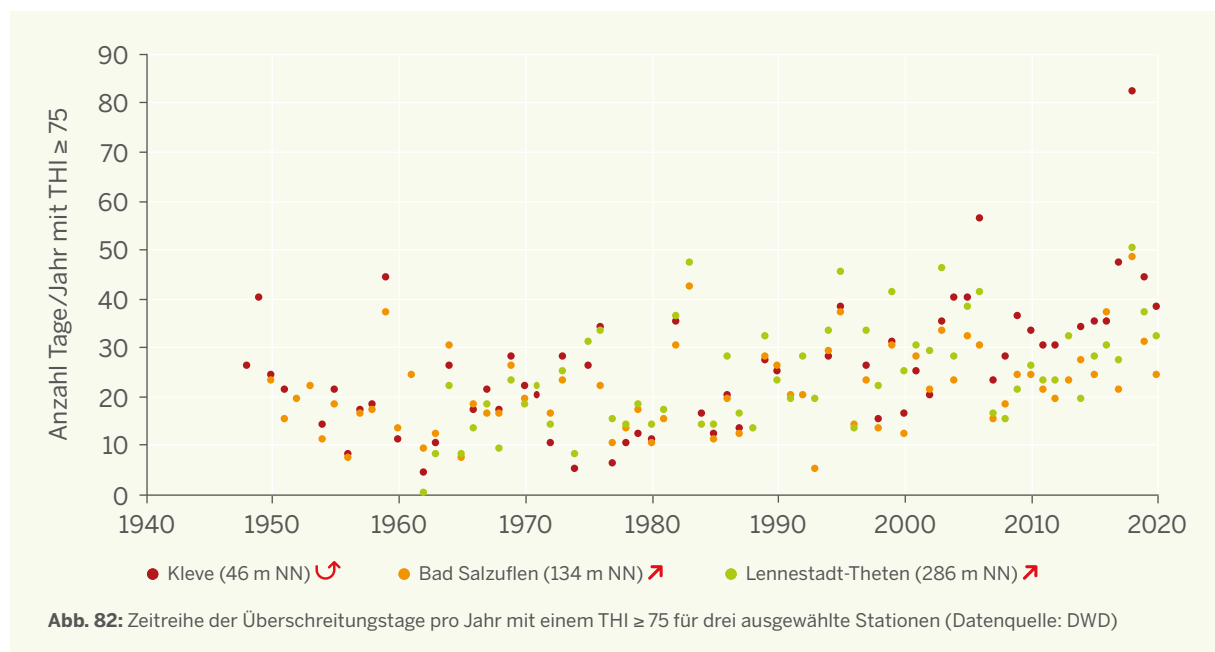
8.5 Wärmebelastung in der Tierhaltung

I

Hitzestresstage für Rinder nehmen zu

In Nordrhein-Westfalen spielt die Nutztierhaltung in der Landwirtschaft eine wichtige Rolle. Durch steigende Durchschnittstemperaturen und vermehrt auftretende Hitzetage nehmen Tage mit besonders großer Wärmebelastung zu. Darunter leiden auch Rinder. Ihre Haltung spielt in der Milchwirtschaft und Fleischproduktion noch vor der Schweinehal-

tung (nach Anzahl Großvieheinheiten) die wichtigste Rolle in Nordrhein-Westfalen (IT.NRW 2017). Tage mit extremem Hitzestress wirken sich nicht nur auf das Tierwohl aus, sondern auch auf Qualität und Quantität von Milch- und Fleischproduktion (Finger et al. 2018). In Zukunft wird Hitzestress in der Tierhaltung eine immer größere Rolle spielen.



Für den Indikator wurde repräsentativ für eine möglichst breite Abdeckung mit verschiedenen Standorteigenschaften der sogenannte luftfeuchtekorrigierte Hitzestressindex (temperature-humidity index = THI) nach Bohmanova et al. (2007) für sieben Wetterstationen in Nordrhein-Westfalen berechnet. In die Berechnung gehen die Luftfeuchtigkeit und die Maximaltemperatur der Stationen ein. Nach Finger et al. (2018) wurden die Tage pro Jahr gezählt, die einen THI von ≥ 75 haben.

Abbildung 82 zeigt stellvertretend Zeitreihen für drei von sieben Stationen mit der Anzahl an Überschreitungstagen THI ≥ 75 pro Jahr. Hier handelt es sich um die DWD-Stationen Kleve, Bad Salzuflen und Lennestadt-Theten, die jeweils in anderen Großlandschaften und unterschiedlichen Höhen liegen. Die Auswahl der Stationen erfolgte aufgrund ihrer unterschiedlichen Höhenlage und aufgrund ihrer Lage in unterschiedlichen Naturräumen Nordrhein-Westfalens. An allen sieben untersuchten Stationen liegt die Anzahl der Überschreitungstage THI ≥ 75 pro Jahr über die gesamten Messzeiträume betrachtet zwischen 18 und 28 Tagen. Das heißt, an allen Stationen in Nordrhein-Westfalen wird eine Wärmebelastung für Nutztiere errechnet.

Bei allen sieben Zeitreihen der Überschreitungstage THI ≥ 75 pro Jahr zeigen sich statistisch signifikante Steigerungen, die besonders in den Jahren nach 1980 stattgefunden haben (Abbildung 82). Der Anstieg erfolgt

analog zu der allgemein stark steigenden Mitteltemperatur (Indikator 1.1 „Durchschnittliche Jahreslufttemperatur“) und den ebenfalls ansteigenden klassischen warmen Temperaturkenntagen (Indikator 1.4 „Temperaturkenntage warm“). Dabei spielt weder die Höhenlage der Station eine Rolle, noch die Lage in den unterschiedlichen Naturräumen Nordrhein-Westfalens – überall nimmt die Wärmebelastung für Nutztiere zu, allerdings unterschiedlich stark.

Die Station Kleve hat über die gesamte Zeitreihe 1948 - 2020 einen Mittelwert von 25 Tagen pro Jahr mit Überschreitungstagen THI ≥ 75 . Hier hat sich die Anzahl der Überschreitungstage im Zeitraum 1948 bis 2020 insgesamt um rund 22 Tage erhöht. An der Station Bad-Salzuflen liegt der Mittelwert der Überschreitungstage THI ≥ 75 pro Jahr bei rund 21 Tagen, wenn man die gesamte Zeitreihe 1950 - 2020 betrachtet. Der Anstieg bei den Überschreitungstagen liegt hier bei rund elf Tagen pro Jahr. An der Station Lennestadt-Theten ergibt das Mittel der gesamten Zeitreihe 1962 bis 2020 einen Wert von 24 Überschreitungstagen THI ≥ 75 . Der Anstieg in diesem Zeitraum liegt bei 19 Tagen. Weitere Stationswerte sind in der Tabelle 10 zu sehen und können detailliert auch auf der Homepage des Klimafolgen- und Anpassungsmonitoring unter www.klimafolgenmonitoring.nrw.de betrachtet werden.



Nutztiere unter Hitzestress

Tiere passen sich sommerlichen Temperaturen in der Regel gut an. An heißen Sommertagen suchen sie oft schattige oder gut durchlüftete Orte auf. Sie fressen weniger, dafür trinken sie mehr. Die Tiere führen die überschüssige Körperwärme je nach Art durch Schwitzen, Hecheln oder Suhlen ab. Deshalb ist es wichtig, dass Tieren genügend Schattenplätze und Wassertränken zur Verfügung stehen. Wenn sie diese nicht finden, kommen sie in Hitzestress, der bei Nutztieren zu Leistungseinbußen und erhöhter Krankheitsanfälligkeit und somit für den Landwirt zu wirtschaftlich unerwünschten Nachteilen führt.

Bei Temperaturen zwischen -5 und +18 °C fühlen Kühe sich am wohlsten. Bereits bei Temperaturen ab +22 °C können sie in Hitzestress geraten. Im Pansen der Kühe erzeugen die Pansenbakterien durchgängig Wärme. Der Pansen wirkt hier wie ein kleiner Ofen, der sommers wie winters mitgetragen wird. Bei Hitze versuchen die Tiere, ihre Körpertemperatur zu stabilisieren, indem sie unter anderem weniger fressen. Bereits ein durchschnittlich warmer Sommertag kann deshalb zu einem erheblichen Rückgang der Milchproduktion führen. Besonders stark davon betroffen sind die Hochleistungskühe. Doch auch bei Mutterkühen, Masttieren und Jungvieh kommt es zu Leistungseinbußen und gesundheitlichen Einschränkungen.

Schafe produzieren als Wiederkäuer ebenfalls sehr viel Eigenwärme und bei langem Wollvlies kann es zu einem Hitzestau kommen. Eine Wollschur muss deshalb spätestens bis Ende Mai erfolgt sein. Frisch geschorene Schafe dürfen hingegen nicht der prallen Sonne ausgesetzt sein, da sie sonst Sonnenbrand bekommen.

Schweine können nicht schwitzen. Deshalb macht ihnen die Sommerhitze besonders zu schaffen. Sie versuchen, überschüssige Wärme durch Hecheln abzuführen. Da diese Methode nicht sehr effektiv ist, suchen Schweine kühle und feuchte Liegeplätze auf. Ein Schlammbad ist für sie die effektivste Abkühlungsmethode. Fehlen in Stallhaltungen solche Möglichkeiten, halten sich die Tiere stattdessen oft am Kotplatz auf und suhlen sich aufgrund des Mangels anderer Möglichkeiten in ihren eigenen Ausscheidungen. Schweine, die von Hitzestress betroffen sind, können einen erhöhten Blutdruck, Hyperglykämie und Störungen des Wasser- und Elektrolythaushaltes entwickeln. Außerdem zeigen sie häufig aggressives Verhalten, was in Zusammenhang mit dem Elektrolytungleichgewicht zu Kannibalismus führen kann.

Wasser ist bei allen Nutztieren ein Hauptfaktor zur Linderung von Hitzestress. Es müssen genügend Tränken an gut zugänglichen Stellen mit einem ausreichenden Wasserdurchfluss positioniert sein. Tiere auf der Weide brauchen immer Schattenplätze. Ist die Bereitstellung nicht möglich, kann auf Nachtweide umgestellt werden. Schweinen sollte in Freilandhaltung eine Suhlmöglichkeit zur Verfügung gestellt werden. Bei der Stallhaltung von Nutztieren muss auf eine ausreichende Belüftung geachtet werden. Dabei können Ventilatoren helfen. Auch Vernebelungsanlagen können Linderung bringen.

Maßnahmen zum Schutz von Nutztieren vor Hitze sind im Tierschutzgesetz und in der Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung vorgeschrieben.



Handlungsfelder Mensch



9. Menschliche Gesundheit



10. Katastrophenschutz



**11. Information, Bildung,
Netzwerke**



9. Menschliche Gesundheit

Durch den Klimawandel kann die Gesundheit der Bürgerinnen und Bürger Nordrhein-Westfalens langfristig stärker beeinträchtigt sein. So ist mit zunehmenden Erkrankungen bis hin zu Todesfällen und einer Minderung der Leistungsfähigkeit in Zusammenhang mit Hitze oder anderen Wetterextremen zu rechnen. Hinzu kommt eine stärkere Verbreitung von Vektoren, die Krankheitserreger übertragen, wie etwa Zecken und Mücken, oder Allergien auslösen, wie beispielsweise der Eichenprozessionsspinner. Möglicherweise zu erwarten sind zudem ein erhöhtes Hautkrebsrisiko durch eine stärkere UV-Belastung sowie die Zunahme von lebensmittelbedingten Infektionen und die Beeinträchtigung der Trinkwasserqualität durch höhere Temperaturen.

Indikatoren-Kernaussagen:

- Tage mit hoher Wärmebelastung nehmen zu.
- Insbesondere in städtischen Lagen treten vermehrt Tropennächte auf.
- 24 % der Siedlungsfläche NRW weist eine ungünstige oder sehr ungünstige thermische Situation auf – davon sind aktuell 6,9 Millionen Menschen betroffen.
- Hitzewellen erhöhen Sterberaten.
- Das Jahresmittel der bodennahen Ozonkonzentration steigt stetig an.
- Die Pollensaison dauert im Mittel mehr als sieben Monate an.
- Die Bekämpfung des Eichenprozessionspinners bindet zunehmend Ressourcen von Kommunen.

Auswirkungen des Klimawandels

Die Gesundheit der Bevölkerung in NRW ist in erster Linie durch die zunehmende Lufttemperatur und die daraus resultierende Hitzebelastung beeinträchtigt. Wenn Hitzeperioden plötzlich und früh im Jahr auftreten, stellen sie eine Gefährdung für die menschliche Gesundheit dar, weil sich der Organismus noch nicht an die hohen Temperaturen angepasst hat. Auch die mangelnde nächtliche Abkühlung während extremer Hitzeperioden trägt insbesondere durch die Minderung der Schlafqualität zur Beeinträchtigung der Gesundheit bei und führt zu einer verminderten Konzentrations- und Leistungsfähigkeit. Hitze erhöht weiter das Risiko schwerer bis tödlicher Verläufe im Falle von vorliegenden Atemwegs- und Herz-Kreislauf-erkrankungen, erst recht, wenn Medikationen und das Trinkverhalten nicht angepasst werden. Besonders betroffen sind vulnerable Bevölkerungsgruppen wie Kleinkinder, Schwangere und ältere Personen, Menschen mit Vorerkrankungen sowie Menschen, die vornehmlich im Freien arbeiten (zum Beispiel in vielen Handwerksberufen).

Bei höheren Temperaturen wird erwartet, dass sich die Bevölkerung vermehrt im Freien aufhält und dadurch länger UV-Strahlung ausgesetzt sein wird. Vor allem UVB-Strahlung gilt als krebserregend. Somit kann sich das Hautkrebsrisiko durch den Klimawandel erhöhen.

Die klimatischen Veränderungen begünstigen die Lebensbedingungen sowohl für heimische Krankheitsüberträger, zum Beispiel Zecken, als auch für neue Vektoren, vor allem Mücken. Neue Krankheitsüberträger können sich ausbreiten, wenn sich bestimmte Mückenarten in Nordrhein-Westfalen etablieren, die tropische Krankheiten transportieren können – aber auch deutschlandweit verbreitete Mückenarten können an der Verbreitung einzelner Krankheiten beteiligt sein (zum Beispiel West-Nil-Virus, RKI 2021). Für Malaria gilt, dass die Mücken längst in Deutschland etabliert sind, aber die Entwicklungsbedingungen für Krankheitserreger in den Mücken durch höhere Temperaturen begünstigt werden.

Es wird außerdem eine Zunahme von Allergien erwartet. Dies ist zum einen auf phänologische Veränderungen zurückzuführen, wie zum Beispiel eine frühere Blütezeit im Jahr sowie eine längere Vegetationszeit. Zum anderen treten neuartige Allergien im Zuge der Ausbreitung von Neozoen und Neophyten auf.



Höhere Temperaturen können zu einer vermehrten Keimbildung führen. Dadurch kann es, insbesondere wenn Kühlketten unterbrochen werden, verstärkt zu lebensmittelassoziierten Infektionen oder Beeinträchtigungen der Trinkwasserqualität kommen, wodurch Magen-Darm-Erkrankungen ausgelöst werden können.

Zusätzlich kann es durch die höheren Temperaturen (insbesondere bei Hitzewellen) auch zu einer erhöhten bodennahen Ozonbildung und -konzentration kommen, die auf die temperaturbedingte Reaktion mit Vorläufersubstanzen zurückzuführen ist. Hohe Ozonkonzentrationen in der Atemluft können unter anderem zu Atemwegsproblemen führen.

Durch Extremwetterlagen (Hitze, Starkregen) kann zum einen die Konzentrationsfähigkeit eingeschränkt sein oder können sich die Verkehrsbedingungen rapide verschlechtern, sodass währenddessen ein erhöhtes Unfallpotenzial, vor allem auch am Arbeitsplatz, besteht.

Insgesamt können die thermische Belastung sowie gleichzeitig auftretende hohe Pollen- und Ozonkonzentrationen die gesundheitlichen Beeinträchtigungen der Bevölkerung verstärken, wenn auch die Wechselwirkungen und Kombinationswirkungen nicht abschließend untersucht sind.



Tab. 11: Übersicht der Indikatoren zum Handlungsfeld 9 „Menschliche Gesundheit“

Indikator		Einheit	räumlicher Bezug	Zeitreihe	
9.1 Wärmebelastung		Anzahl Tage mit Gefühlter Temperatur > 32 °C (12 Uhr)	Köln-Bonn	1971 - 2020	
			Düsseldorf	1971 - 2020	
9.2 Tropennächte in Innenstädten		Anzahl	Köln (Turiner Straße)	2010 - 2020	
		Anzahl	Aachen (Wilhelmstraße)	2010 - 2020	
9.3 Hitze-warnungen	Hitzewarnungen	Anzahl	NRW	2005 - 2020	
	Warnungen vor extremer Hitze	Anzahl	NRW	2005 - 2020	
9.4 Hitzebetroffenheit der Bevölkerung		Anzahl der betroffenen EinwohnerInnen		Thermische Belastungsklasse	
			NRW	sehr günstig	
			NRW	günstig	
			NRW	weniger günstig	
			NRW	ungünstig	
			NRW	sehr ungünstig	
9.5 Hitzebedingte Todesfälle		Anzahl	NRW	1992 - 2017	
9.6 Belastung mit bodennahem Ozon	Jahresmittel der Ozonkonzentration	µg/m³	NRW	2000 - 2020	
	Überschreitung der Informationsschwelle*	Anzahl Tage	NRW	2000 - 2020	
	Überschreitung der Alarmschwelle**	Anzahl Tage	NRW	2000 - 2020	
	Überschreitung des Zielwerts zum Schutz der menschlichen Gesundheit***	Anzahl Tage	NRW	2000 - 2020	
9.7 Länge der Pollensaison (PS)	Beginn PS	Tag im Jahr	Bad Lippspringe	1997 - 2020	
	Ende PS	Tag im Jahr	Bad Lippspringe	1997 - 2020	
	Länge PS	Anzahl Tage	Bad Lippspringe	1997 - 2020	
	Beginn PS	Tag im Jahr	Mönchengladbach	1997 - 2020	
	Ende PS	Tag im Jahr	Mönchengladbach	1997 - 2020	
	Länge PS	Anzahl Tage	Mönchengladbach	1997 - 2020	
9.8 Befall mit Eichenprozessionsspinnern (EPS)	EPS-Befall	Anzahl Städte/Gemeinden	NRW	2018 - 2020	
	kein EPS-Befall	Anzahl Städte/Gemeinden	NRW	2018 - 2020	
	keine Rückmeldung	Anzahl Städte/Gemeinden	NRW	2018 - 2020	
	Teilnahmequote	%	NRW	2018 - 2020	

steigender Trend
 fallender Trend
 Trend mit Trendumkehr: zuerst fallend, dann steigend
 Trend mit Trendumkehr: zuerst steigend, dann fallend
 kein Trend

günstige Entwicklung
 ungünstige Entwicklung
 keine Bewertung der Entwicklung möglich oder gleichzeitig günstige und ungünstige Entwicklungsaspekte vorhanden

	Mittelwert Zeitreihe	Trend Zeitreihe	Änderung Zeitreihe	Mittelwert der Klimanormalperioden			Querbezüge zu anderen Handlungsfeldern
				1971-2000	1981-2010	1991-2020	
	11,7	~	–	10,8	11,7	12,6	11 (S. 216), 13 (S. 230), 14 (S. 248), 18 (S. 276), 19 (S. 288)
	9,6	~	–	8,8	10,1	10,4	
	18,0	↗	+14,7	–	–	–	11 (S. 216), 13 (S. 230), 14 (S. 248), 18 (S. 276), 19 (S. 288)
	10,8	↗	+7,9	–	–	–	
	8,8	~	–	–	–	–	
	1,3	~	–	–	–	–	
	2018	„Entwicklung“ (Abschätzung für 2050)					12 (S. 224), 13 (S. 230), 14 (S. 248)
	900.000	–	–	–	–	–	
	3.400.000	–	–	–	–	–	
	6.400.000	–	–	–	–	–	
	6.400.000	10.600.000	–	–	–	–	
	500.000	3.700.000	–	–	–	–	13 (S. 230)
	500	~	–	–	–	–	
	41,5	↻	+9,6	–	–	–	7 (S. 150), 15 (S. 256)
	10	~	–	–	–	–	
	1	–	–	–	–	–	
	42	~	–	–	–	–	
	21	~	–	–	–	–	6 (S. 130)
	234	~	–	–	–	–	
	213	~	–	–	–	–	
	14	~	–	–	–	–	
	235	~	–	–	–	–	
	221	~	–	–	–	–	6 (S. 130), 7 (S. 150)
	121	–	–	–	–	–	
	84	–	–	–	–	–	
	191	–	–	–	–	–	
	52	–	–	–	–	–	

* 1-h-Mittelwert $\geq 180 \mu\text{g}/\text{m}^3$, **1-h-Mittelwert $\geq 240 \mu\text{g}/\text{m}^3$, *** 8-h-Mittelwert $\geq 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$



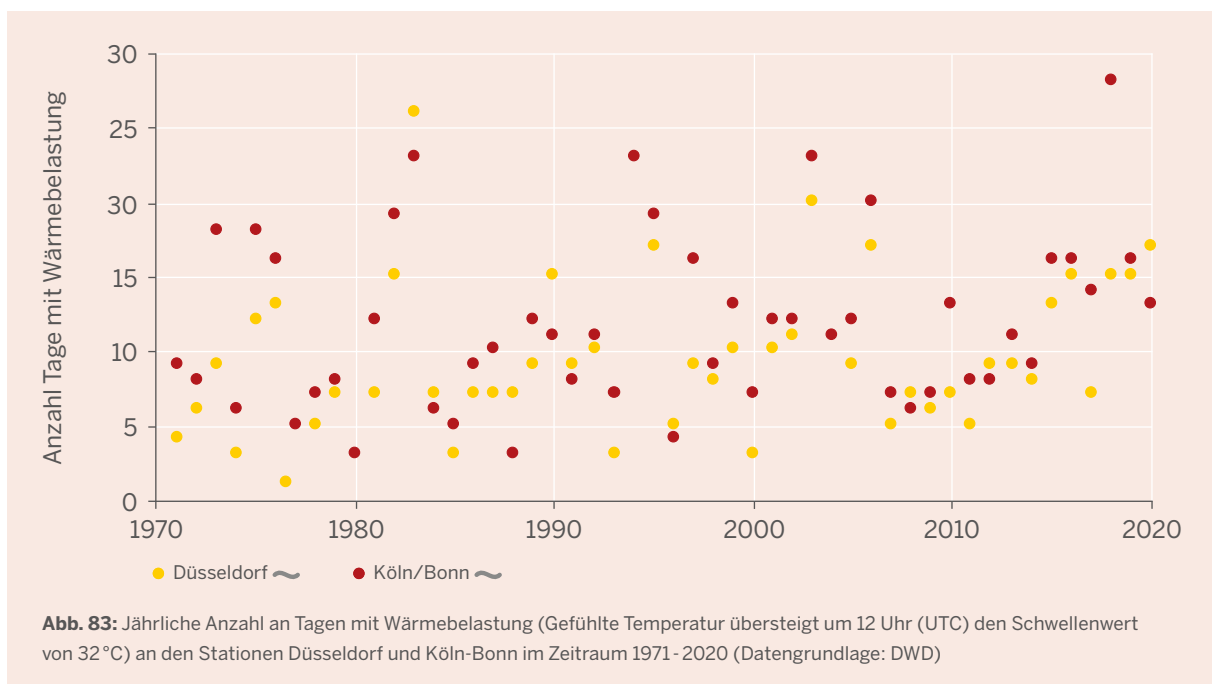
9.1 Wärmebelastung

I

Tage mit Wärmebelastung nehmen zu

Das Wärmeempfinden des Menschen hängt nicht alleine von der Lufttemperatur ab. Es wirken weitere Faktoren wie Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Strahlungstemperatur auf das Wärmeempfinden ein. Bei der Bestimmung der „Gefühlten Temperatur“ werden diese Faktoren mit einbezogen.

An Tagen mit hoher Wärmebelastung ist die Gefühlte Temperatur besonders hoch, wodurch sich die Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit insbesondere bei anfälligen Personengruppen vergrößern.



Für den Indikator werden die Tage mit Wärmebelastungen beispielhaft an den Messstationen Düsseldorf und Köln/Bonn betrachtet (Abbildung 83). Seit dem Beginn der Zeitreihe im Jahr 1971 lässt sich für diese beiden Stationen bisher kein statistisch signifikanter Trend nachweisen.

Jahre mit besonders warmen Sommern wie 1983, 1994, 2003, 2006 und 2018 gehen jedoch mit einer hohen Anzahl an Tagen mit Wärmebelastung einher. So traten im Hitzesommer 2018 an der Station Köln/Bonn 28 Tage mit Wärmebelastung auf. Auch der Sommer des Jahres 2003 war von einer hohen Anzahl an Tagen mit Wärmebelastung geprägt – 20 an der Station Düsseldorf und 23 an der Station Köln-Bonn.

„Gefühlte Temperatur“

Um die Auswirkungen verschiedener Witterungsbedingungen auf den menschlichen Organismus einschätzen zu können, reicht die Lufttemperatur als Messgröße nicht aus. Wie stark Hitze beziehungsweise Kälte auf den Menschen einwirken, erfasst die „Gefühlte Temperatur“. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) hat zur Bestimmung der Gefühlten Temperatur das Klima-Michel-Modell entwickelt. Auch die Messgrößen der Indikatoren 9.1 „Wärmebelastung“ und 9.3 „Hitzewarnungen“ greifen auf die Temperatur zurück, die der Klima-Michel „fühlt“. Denn: Der Klima-Michel ist nicht etwa der Erfinder des Modells, sondern dessen zentrale Bezugsperson (DWD 2021b).

Der Klima-Michel ist ein Modell. Die Modellperson ist männlich, 35 Jahre alt, 75 kg schwer, 1,75 m groß, geht mit einer konstanten Geschwindigkeit von 4 km/h und passt ihre Bekleidung zwischen leichter Sommer- und dicker Winterbekleidung an, damit ihr stets behaglich ist (Abbildung 84). Im dem nach dem „Klima-Michel“ benannten Energiebilanzmodell soll er den vollständigen Wärmehaushalt eines Menschen symbolisieren und dient so zur Berechnung der „Gefühlten Temperatur“. Die Standardisierung des Klima-Michels ermöglicht einen Vergleich zwischen verschiedenen Wetterereignissen und Klimata (DWD 2021b), wenngleich klar ist, dass Personen anderen Alters oder anderen Geschlechts etwas abweichende Energiebilanzen aufweisen.

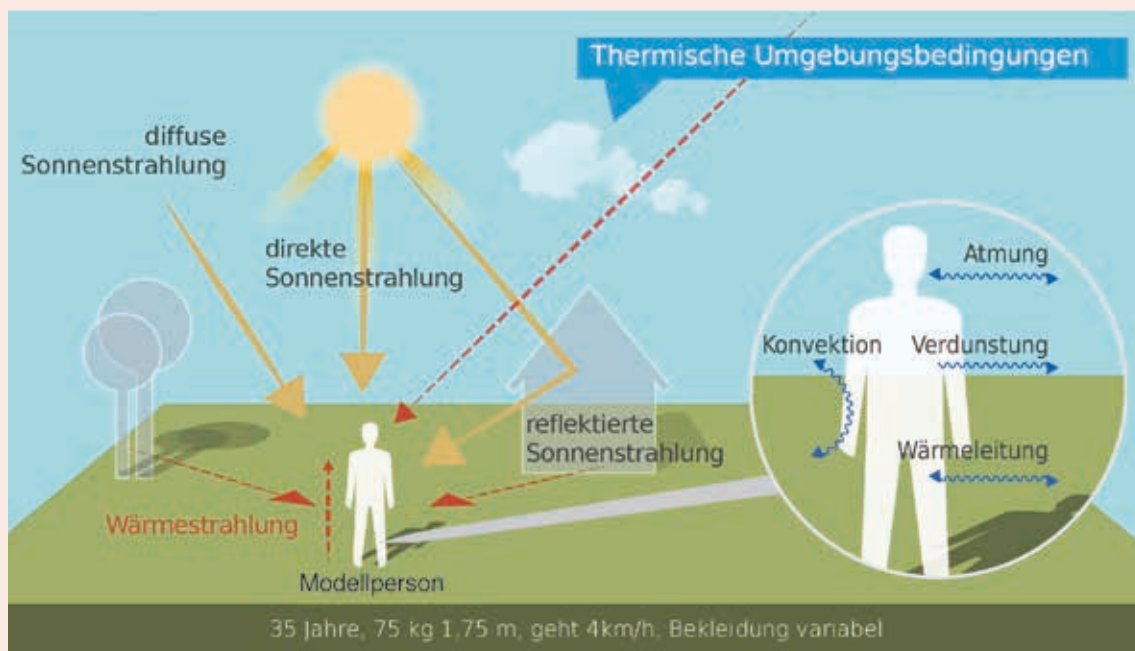


Abb. 84: Klima-Michel-Modell und Gefühlte Temperatur (Quelle: nach DWD)



Der Mensch ist im Freien unterschiedlichen Strahlungen ausgesetzt, zum Beispiel der direkten Sonnenstrahlung (Abbildung 84). Die Stärke dieser Strahlungen variiert allerdings je nach Lokalität und Zeitpunkt. Der Mensch kann seine Temperatur jedoch nur in einem sehr schmalen Bereich regulieren. So kann die Gefühlte Temperatur, je nach Wetterlage, sehr stark von der gemessenen Temperatur abweichen. Damit der Körper weder zu stark abkühlt noch zu stark aufheizt, reguliert er mit verschiedenen Mechanismen die Körpertemperatur. Zu diesen Mechanismen zählen die Atmung, die Verdunstung, die Wärmeleitung und die Konvektion (Abbildung 84). Diese Regulierung der Körpertemperatur wird als Thermoregulation bezeichnet. Wenn die Thermoregulation nur gering gefordert ist, empfinden wir Behaglichkeit, je stärker sie gefordert wird, desto eher empfinden wir die thermischen Umgebungs-

bedingungen als belastend. Gefühlte Temperaturen zwischen 0 und 20 °C vermitteln Behaglichkeit. Gefühlte Temperaturen unter 0 °C erzeugen ein Kälte- und über 20 °C ein Wärmegefühl (DWD 2021b).

Bei extremer Wärmebelastung, wie zum Beispiel bei Hitzewellen, kann die Regulierung der Körpertemperatur aufwendig und dadurch der Kreislauf übermäßig beansprucht werden. Neben der Temperatur beeinflussen auch die Luftfeuchtigkeit und die Windgeschwindigkeit die Thermoregulation. Je feuchter die Luft ist, desto geringer ist die Kühlungsleistung der Haut: Durch die Sättigung der Luft kann weniger Schweiß verdunsten. Vor allem bei älteren Menschen, Kindern, sowie Menschen mit einem geschwächten Herz-Kreislauf-System können sich extreme äußere Bedingungen stark auf die Gesundheit auswirken.





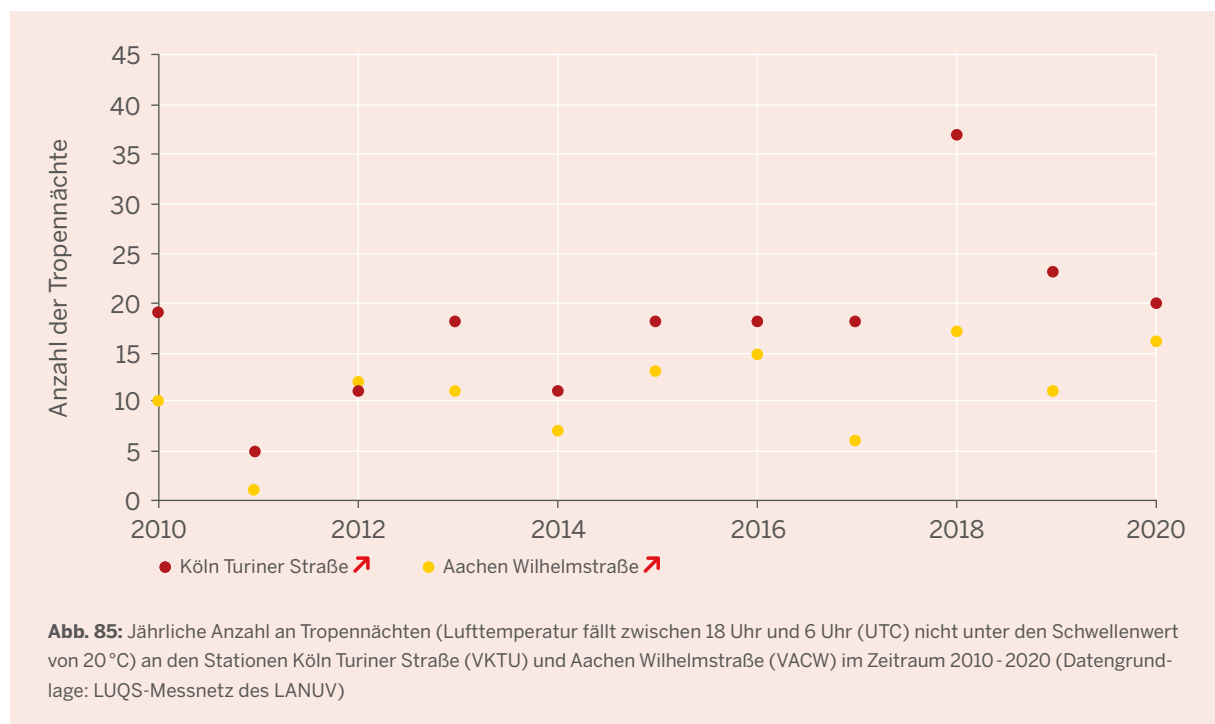
9.2 Tropennächte in Innenstädten



Mehr Tropennächte in NRW

Mangelnde nächtliche Abkühlung schränkt aufgrund der geringeren Schlafqualität die Regeneration des menschlichen Organismus ein und verstärkt somit die Hitzebelastung des Körpers. Infolge von Wärmeinseleffekten kommt es vor allem in verdichteten

Lagen zu nächtlicher Überwärmung. Dort sind viele Menschen, unter ihnen auch Risikogruppenangehörige wie ältere Menschen, Schwangere, Kleinkinder und Vorerkrankte, von den thermischen Belastungen betroffen.



Tropennächte bezeichnen Nächte, in denen die Temperatur nicht unter 20 °C sinkt. Die Zeitreihe zur Anzahl von Tropennächten ist mit zehn Jahren noch recht kurz (Abbildung 85). An beiden Station in Köln und Aachen lässt sich aber bereits ein statistisch signifikanter Änderungstrend nachweisen. Hier ist eine deutliche Zunahme der Tropennächte über die Zeitreihe zu

erkennen. Besonders viele Tropennächte traten im Jahr 2018 auf, dessen Hitzesommer nicht nur mit hohen Temperaturen tagsüber, sondern auch mit fehlender Abkühlung während der Nächte – insbesondere in Innenstadtlagen – einherging. An der Station in Aachen wurden in diesem Jahr 17 Tropennächte erfasst, an der Kölner Station sogar 37 Tropennächte.



9.3 Hitzewarnungen

I

Der Deutsche Wetterdienst warnt vor Hitze

Der menschliche Organismus passt sich über längere Zeit an sich ändernde klimatische Bedingungen an. Durch den Klimawandel treten aber – für den menschlichen Körper verhältnismäßig plötzlich – höhere Lufttemperaturen auf und wirken sich negativ auf die Gesundheit aus. Vor allem während des Sommers können extreme Temperaturen hitzebedingte Belastungen und Krankheiten hervorrufen. Seit 2005 hat der Deutsche Wetterdienst (DWD) –

als Reaktion auf den Hitzesommer 2003 – einen Hitzewarndienst eingerichtet. Der DWD gibt eine Hitzewarnung heraus, wenn eine starke Wärmebelastung vorherrscht beziehungsweise zu erwarten ist. So können sich nicht nur Einzelpersonen vor den Auswirkungen der Hitze schützen, sondern auch Pflegeeinrichtungen, Veranstalter etc. frühzeitig Schutzmaßnahmen ergreifen.

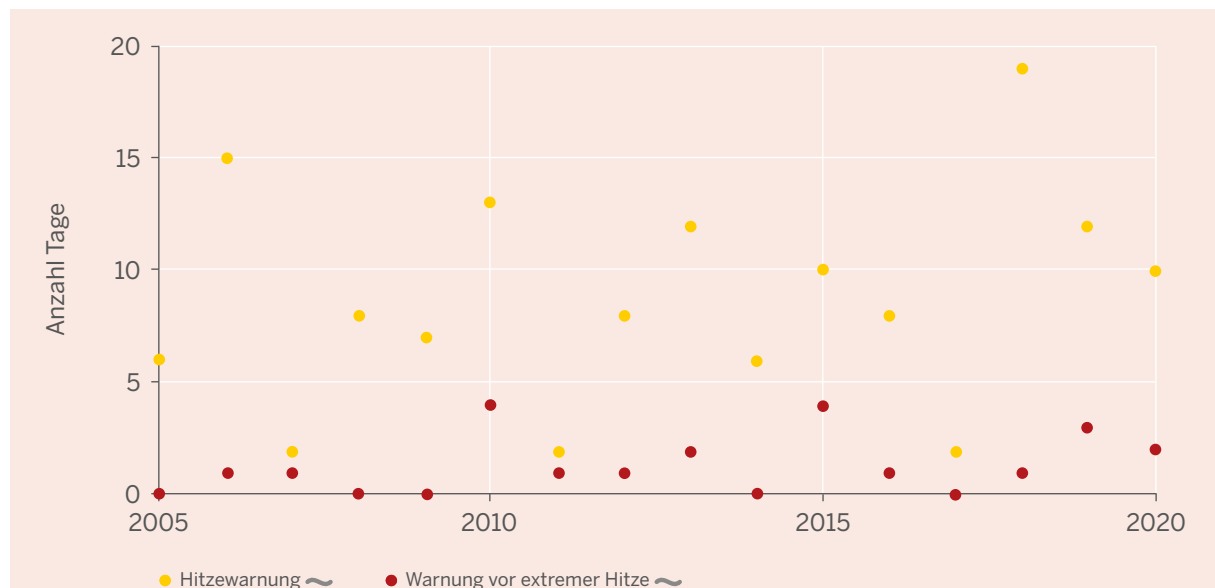


Abb. 86: Jährliche Anzahl an Tagen mit Hitzewarnungen (gefühlte Temperatur erreicht für zwei Tage in Folge mindestens 32°C; gleichzeitig wird keine ausreichende nächtliche Auskühlung der Wohnräume mehr gewährleistet) und jährliche Anzahl an Tagen mit Warnung vor extremer Hitze (gefühlte Temperatur überschreitet 38°C) in Nordrhein-Westfalen im Zeitraum 2005 - 2020. Wenn an einem Tag eine Warnung nur für einzelne Kreise ausgegeben wurde, wird dieser Tag für ganz NRW gezählt (Datengrundlage: DWD).



Warnungen vor Hitze gibt der DWD heraus, wenn extreme Wärmebelastungen auftreten oder bei unzureichender nächtlicher Abkühlung hohe Wärmebelastungen entstehen. Der DWD betrachtet für Warnungen vor Hitze die gefühlte Temperatur nach dem Klima-Michel-Modell (siehe auch Indikator 9.1 „Wärmebelastung“) und gibt die Meldungen auf Kreisebene heraus. Zusätzlich berücksichtigt der Hitzewarndienst auch Akklimatisierungseffekte. Das heißt, die Temperaturen der vergangenen 30 Tage werden bei Warnungen mitberücksichtigt, da sich der menschliche Körper bei länger anhaltender Hitze an die klimatischen Bedingungen anpassen kann. Zum Teil wird auch für die Folgetage gewarnt, sodass eine gewisse Vorbereitungszeit bleibt.

Die Anzahl jährlicher Tage mit Hitzewarnungen schwankt über die Zeitreihe (Abbildung 86). Ein statistisch signifikanter Trend ist seit der Einrichtung des Dienstes im Jahr 2005 noch nicht nachweisbar. Es zeigt sich jedoch, dass die Anzahl an Tagen mit Hitzewarnungen in den Jahren mit heißen Sommern wie 2006, 2010 und 2018 besonders hoch ist. Im Jahr 2018 warnte der DWD an 19 Tagen vor Hitze, an drei Tagen sogar vor extremer Hitze.



9.4 Hitzebetroffenheit der Bevölkerung

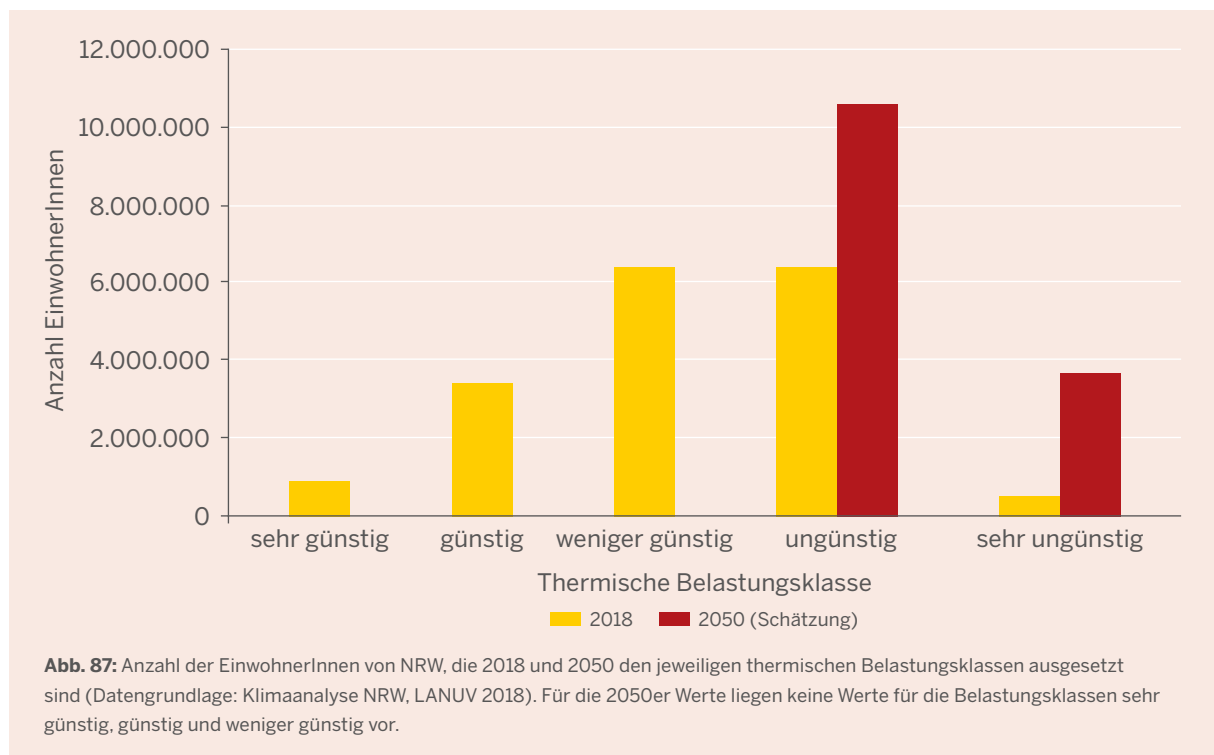
I

Zukünftig sind mehr als zwei Drittel der Bevölkerung von NRW von Hitzebelastung betroffen

Als dicht besiedeltes Bundesland ist Nordrhein-Westfalen von dem klimawandelbedingten Temperaturanstieg besonders betroffen. Durch einen verringerten Luftaustausch, Wärmespeicherung durch Gebäude und Straßen und die vermehrte Freisetzung von Wärme von Industrie und Verkehr kann in dicht bebauten innerstädtischen Quartieren bei sommerlichen Hochdruckwetterlagen die Temperatur um bis zu zehn Grad Celsius höher liegen als im Umland (LANUV 2013).

Dies wird als städtischer Wärmeinseleffekt bezeichnet. Die Wärmeinselintensität ist nachts am stärksten ausgeprägt, was insbesondere negative Effekte auf den Schlaf und die Erholung der Bevölkerung und resultierend auf die Gesundheit zur Folge hat, da besonders nachts kein Ausweichen auf klimatisch günstigere Bereiche möglich ist. Der folgende Indikator quantifiziert, wie hoch die Anzahl der EinwohnerInnen in NRW ist, die durch thermische Belastungen betroffen ist.





Anhand der Untersuchungsergebnisse der Klimaanalyse NRW (LANUV 2018, vgl. Exkurs auf der nächsten Seite) ist erkennbar, dass etwa 24 % der Siedlungsfläche NRWs eine ungünstige oder sehr ungünstige thermische Situation aufweisen. Hiervon sind knapp 40 % der Bevölkerung NRWs – das sind etwa 6,9 Millionen Menschen – betroffen (Abbildung 87).

Unter der pauschalen Annahme einer Temperaturerhöhung von +1 K bis zur Mitte des Jahrhunderts wird berechnet, dass sich in Zukunft die Zahl der Menschen in NRW, die von einer ungünstigen oder sehr ungünstigen thermischen Situation betroffenen sein werden, um etwa 7,4 Millionen auf dann 14,3 Millionen Menschen (80 % der EinwohnerInnen NRWs) erhöhen könnte (Abbildung 87). Diese abgeschätzte Entwicklung gibt Anlass zu einem wiederholten Monitoring der thermischen Situation und der davon betroffenen Bevölkerung in NRW.

Klimaanalyse NRW

Das Wohlbefinden und auch die Gesundheit der Menschen kann durch hohe Temperaturen deutlich beeinträchtigt werden. Besonders sensible Bevölkerungsgruppen, zum Beispiel Menschen mit Vorerkrankungen, ältere Menschen, Kleinkinder oder auch Schwangere leiden besonders unter Hitzebelastungen.

Die Klimaanalyse NRW (LANUV 2018) ermittelt, wie viele Menschen in Nordrhein-Westfalen von Hitzebelastungen betroffen sind. Die Beurteilung der Hitzebelastung wird dabei unterteilt in fünf thermische Belastungsklassen (sehr günstig, günstig, weniger günstig, ungünstig, sehr ungünstig).

Die Methodik unterscheidet zunächst zwischen Belastungen am Tag und in der Nacht. Das Kriterium für eine starke thermische Belastung in der Nacht ist eine Überschreitung der Lufttemperatur von 20 °C um 4 Uhr. Eine starke Belastung am Tag ist vorhanden, wenn der PET-Wert (physiologisch äquivalente Temperatur) 35-41 °C beträgt, eine extrem starke Belastung ist für die Überschreitung des PET-Werts von 41 °C definiert. In Abhängigkeit des Flächennutzungstyps führt eine Gewichtung

der Belastungen am Tag und in der Nacht zu einer flächenscharfen Gesamtbetrachtung (Abbildung 88). Entsprechend der Aufenthaltsorte der Bevölkerung zu den verschiedenen Tageszeiten wird die Belastung bei Wohnbauflächen in der Nacht höher gewertet als am Tag, bei Gewerbeflächen fällt die Situation am Tage stärker ins Gewicht.

Der Klimawandel und der damit zu erwartende weitere Temperaturanstieg sorgen dafür, dass die Hitzebelastung in NRW zukünftig weiter zunehmen wird und entsprechende Gegenmaßnahmen getroffen werden müssen. Mithilfe der Modellierung der klimatischen Situation ist es möglich, die komplexen klimatischen Prozesse und Zusammenhänge näher zu untersuchen, um damit gezielter Anpassungsmaßnahmen vornehmen zu können.



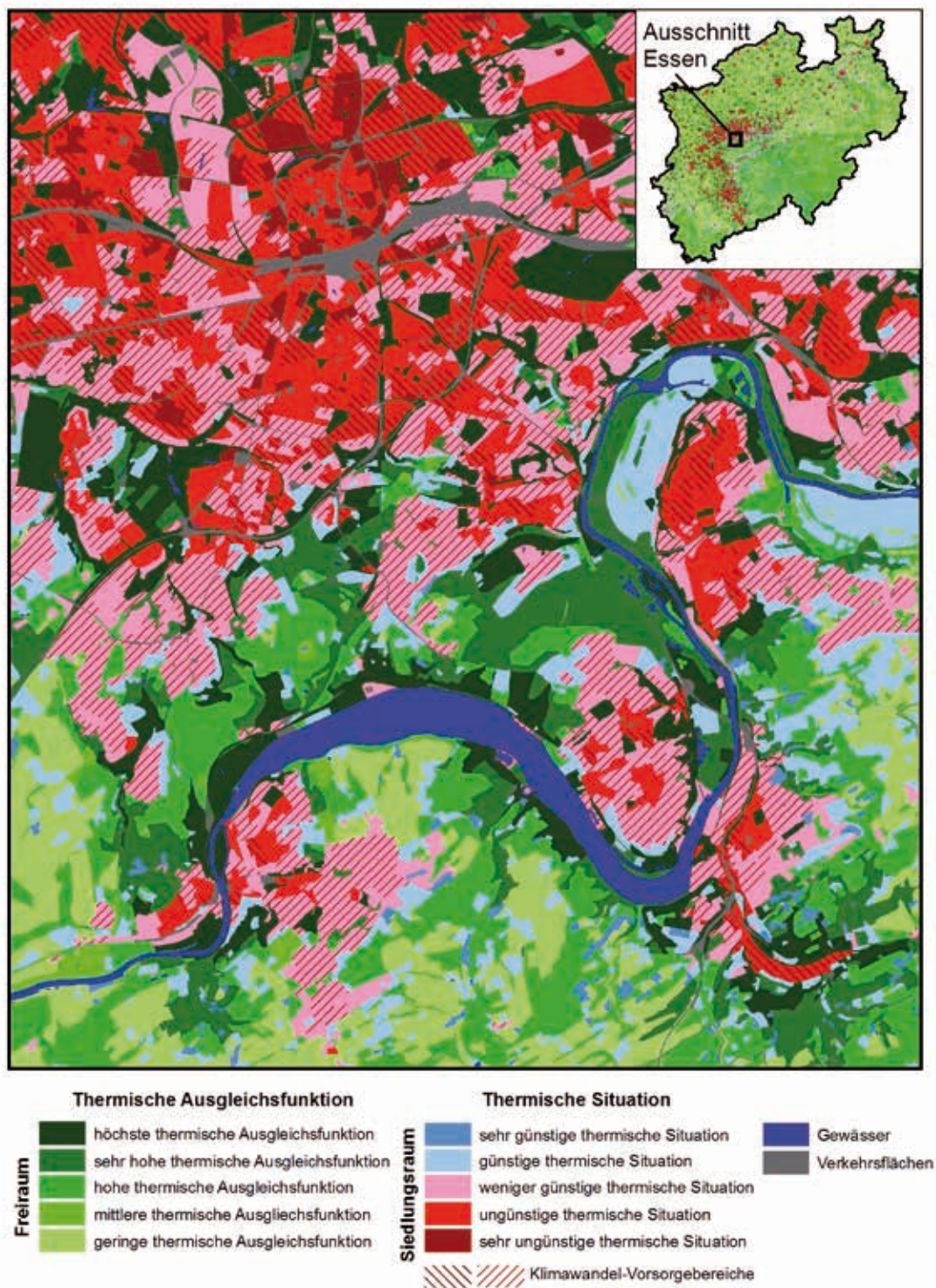


Abb. 88: Detailausschnitt Klimaanalyse Gesamtbetrachtung (Quelle: LANUV 2018)



9.5 Hitzebedingte Todesfälle

I

Hitzewellen erhöhen Sterberaten

Als Folge von Hitzewellen steigen lokal die Sterberaten über saisonal übliche Erwartungswerte hinaus an. Als hauptverantwortliche Ursache gelten dabei Herz-Kreislauf-Erkrankungen, die bei hohem Hitzestress zum Tode führen können. Im Hitzesommer 2003 sind geschätzt europaweit über 70.000

Menschen aufgrund der extremen Hitze gestorben (Robine et al. 2008). Etwa 7.600 hitzebedingte Tode wurden in Deutschland verzeichnet (an der Heiden et al. 2019). Betroffene Personengruppen sind in diesem Zusammenhang in erster Linie alte und/oder vorerkrankte Menschen.

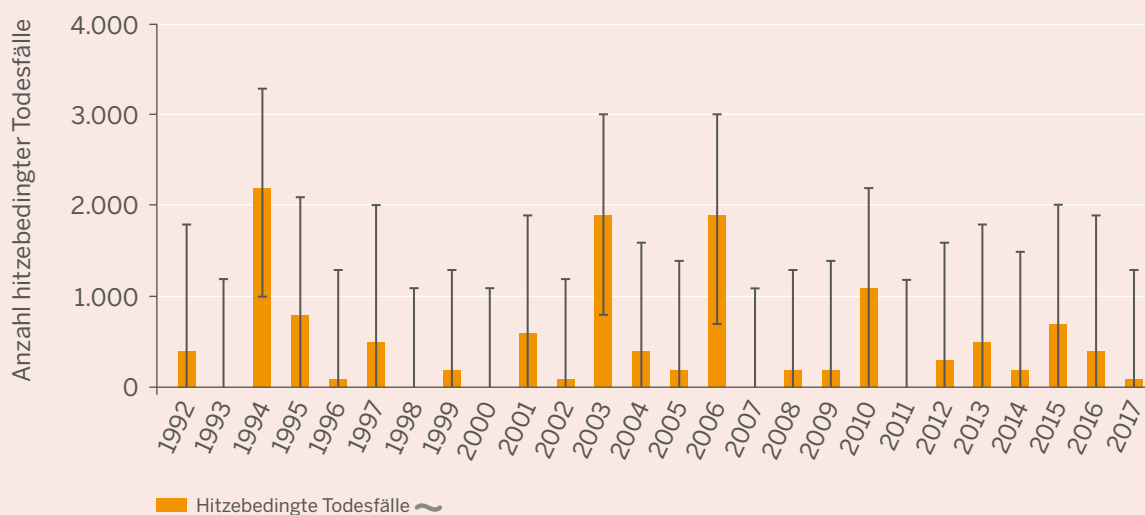


Abb. 89: Anzahl hitzebedingter Todesfälle (orange) mit 95 %-Konfidenzintervall (schwarz) in Nordrhein-Westfalen im Zeitraum 1992 - 2017 (Datengrundlage: der Heiden et al. 2020)

Die jährliche Anzahl hitzebedingter Todesfälle ist direkt nur schwer erfassbar. Mithilfe eines mathematischen Modells kann aber der statistische Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und Sterblichkeit beschrieben werden (an der Heiden et al. 2020). Die Anzahl der hitzebedingten Todesfälle wird als Differenz der beobachteten Sterblichkeit – basierend auf Daten des statistischen Bundesamtes – und einer hypothetischen Sterblichkeit, welche sich einstellen würde, wenn die Wochenmitteltemperatur nicht 20 °C übersteigen würde, berechnet.

In der Zeitreihe der hitzebedingten Todesfälle spiegeln sich die sommerlichen Hitzewellen der vergangenen Jahre wider (Abbildung 89). Auffällig sind hier die Jahre 1994, 2003 und 2006, in denen nach der Modellschätzung besonders viele hitzebedingte Todesfälle auftraten. Hier zeigt sich auch ein deutlicher Zusammenhang zum Indikator 9.1 „Wärmebelastung“. 1994, 2003 und 2006 traten viele Tage mit Wärmebelastung auf. Insgesamt unterliegt die Zeitreihe Schwankungen. Ein statistisch signifikanter Trend liegt nicht vor.

Hitzesommer 2003

Der Sommer des Jahres 2003 ist nun schon einige Zeit vergangen. Dennoch ist er vielen in Erinnerung geblieben. Im Juli und August trat damals eine Hitzewelle in Europa auf, die mit extremen Temperaturen einherging. Auch in Nordrhein-Westfalen machte sich die Hitzewelle bemerkbar. Während heiße Tage (Tagesmaximaltemperatur > 30 °C) in Nordrhein-Westfalen üblicherweise fünf bis sechs mal im Jahr auftreten, kletterte das Thermometer 2003 gleich 16 mal über die 30 °-Marke (Indikator 1.4 „Temperaturkenttage warm“).

Grundsätzlich spürt die gesamte Bevölkerung die Auswirkungen der Hitze. Allerdings gibt es Gruppen, die besonders empfindlich auf Hitze reagieren. Dazu zählen beispielsweise ältere Menschen und Menschen mit Vorerkrankungen. Für diese Personengruppen gehen Hitzewellen nicht nur mit gesundheitlichen Einschränkungen einher, sie können sogar zum Tod führen. So kam es im Sommer des Jahres 2003 in NRW geschätzt zu 1.900 Todesfällen, die mit der Hitzebelastung in Verbindung standen



(Abbildung 89). Gleichzeitig stellt die sommerliche Hitzewelle des Jahres 2003 aber auch einen Wendepunkt dar. Denn vor diesem Sommer fehlte in vielen Mittel- und Nordeuropäischen Ländern das Bewusstsein dafür, dass Hitze für weite Bevölkerungsteile zur Bedrohung werden kann (RKI 2004). So war die Einführung eines Hitzewarnsystems durch den deutschen Wetterdienst eine direkte Reaktion auf den Hitzesommer 2003 (Indikator 9.3 „Hitzewarnungen“).



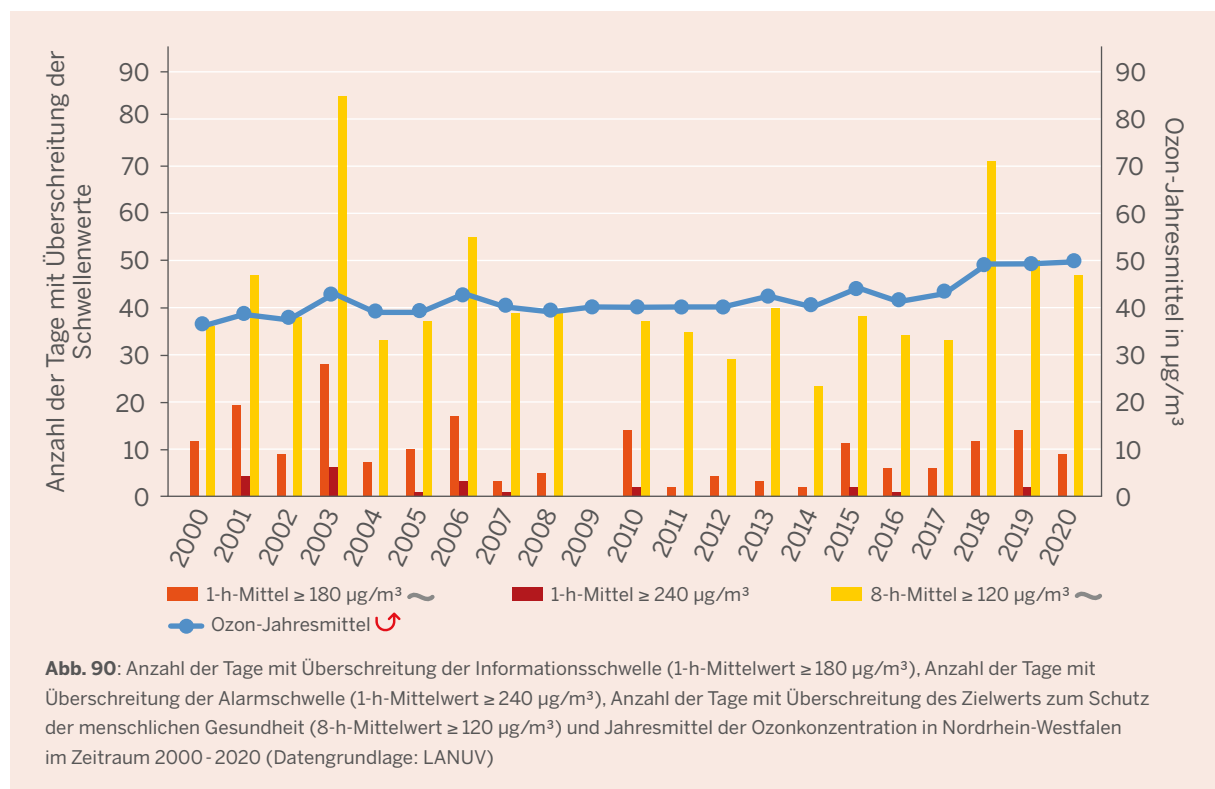
9.6 Belastung mit bodennahem Ozon

I

Bodennahes Ozon nimmt zu

Ozon (O_3) ist ein Schadstoff, der mit verschiedenen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit verknüpft ist. Als Reizgas führt er an Tagen mit hohen Ozonkonzentrationen in der Luft bei Menschen zu Reizerscheinungen der Augen, Atemwegsbeschwerden wie Kurzatmigkeit oder Hustenreiz und Kopfschmerzen (UBA 2020a). Zu den Effekten von Ozon gehören zudem eine verstärkte Symptomatik bei bestehenden Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen.

Die Bildung von Ozon steht mit menschlichen Aktivitäten, zum Beispiel durch den Ausstoß von Stickoxiden, in Verbindung. Aber auch sommerliche Witterungsbedingungen können die Produktion bodennahen Ozons begünstigen. Ein häufigeres Eintreten solcher Witterungsbedingungen infolge des Klimawandels kann daher auch einen Einfluss auf die Ozonbelastung der Bevölkerung haben.



Auch wenn in Deutschland bzw. Nordrhein-Westfalen die Belastungs-Spitzenwerte durch eine drastische Emissionsminderung der Vorläuferstoffe von Ozon seit 1990 zurückgegangen sind (UBA 2020b), bleibt die Ozonproblematik weiter relevant. Während die mittlere Konzentration des bodennahen Ozons (Jahresmittel) über die Zeitreihe signifikant ansteigt, unterliegen

die Überschreitungen der Schwellenwerte größeren Schwankungen (Abbildung 90). Hier lassen sich keine bzw. keine signifikanten Trends berechnen. Es zeigt sich aber, dass in den Jahren mit besonders heißen Sommern wie 2003 und 2018 vermehrt die Schwellenwerte überschritten wurden.

Unterschiede zwischen dem Ozonloch und bodennahem Ozon

Ozon besitzt für das Klima und das Leben auf der Erde sehr unterschiedliche Eigenschaften, die stark von der Höhe abhängen, in der es in der Erdatmosphäre vorkommt. Die vertikale Verteilung des Ozons ist sehr unterschiedlich. Etwa 90 % des Ozons befinden sich in einer Höhe von 12 - 50 km in der Stratosphäre, und nur 10 % des Ozons sind in den unteren 12 km der Atmosphäre, der Troposphäre, enthalten.

Die Ozonschicht in der Stratosphäre wirkt als Schutzschild gegen die schädliche UV-Strahlung, indem sie einen großen Teil der UV-Strahlung der Sonne absorbiert. Der Ozonverlust in der unteren Stratosphäre durch die Einwirkung von FCKW hat in den letzten beiden Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts zur Bildung des Ozonlochs geführt.

Eine größere klimatische Bedeutung kommt aber der geringen Ozonmenge zu, die sich in der Troposphäre befindet. Hier wirkt Ozon, neben Kohlendioxid und Methan, als drittstärkstes anthropogenes Treibhausgas. Im Vergleich zu anderen Treibhausgasen besitzt das troposphärische Ozon jedoch nur eine relativ kurze Lebensdauer und ist deshalb sehr ungleichmäßig um den Globus verteilt. Im Unterschied zu den langlebigen Treibhausgasen wird Ozon außerdem nicht direkt emittiert, sondern entsteht erst in der Atmosphäre aus der Reaktion von Sauerstoff mit Vorläuferstoffen (flüchtige organische Kohlenwasserstoffe, Stickoxide) bei intensiver Sonneneinstrahlung. Ozon wird daher als sekundärer Luftschadstoff bezeichnet. Hohe Temperaturen und starke Sonneneinstrahlung (sommerliche Hochdruckwetterlagen) begünstigen die Entstehung von bodennahem Ozon. Die Emission der Ozon-Vorläuferstoffe und damit auch die troposphärische Ozonkonzentration sind durch menschliche Aktivitäten beeinflusst.

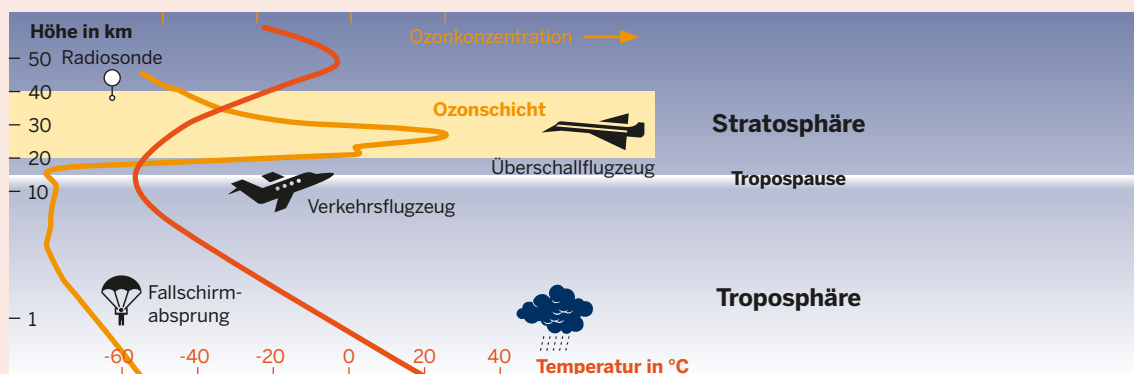


Abb. 91: Verteilung des Ozons in der Erdatmosphäre (Quelle: nach Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim 2017)



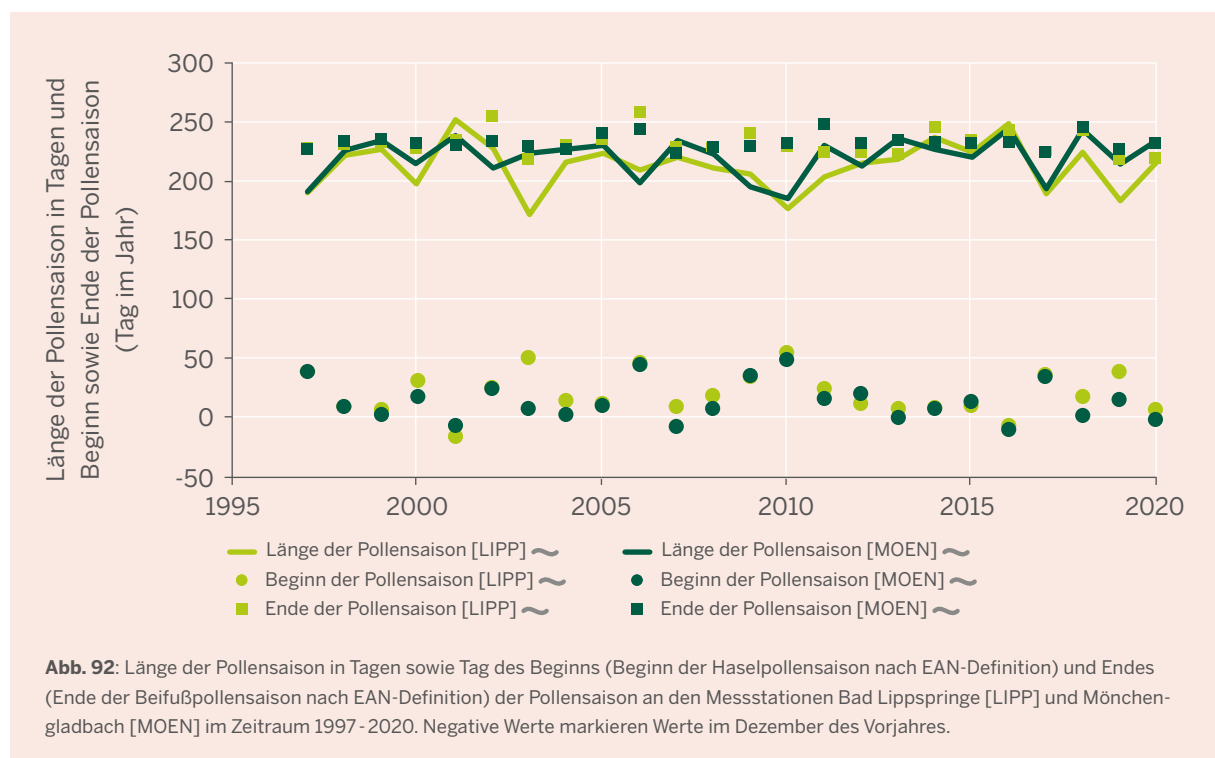
9.7 Länge der Pollensaison

I

Die Pollensaison dauert im Mittel mehr als sieben Monate

Typische durch Pollen ausgelöste allergische Krankheiten sind allergische Rhinitis (Heuschnupfen) und allergisches Asthma. Während der Pollensaison ist eine Vielzahl der von Pollenallergien Betroffenen auf

eine medikamentöse Behandlung angewiesen und leidet zusätzlich unter deren Nebenwirkungen. Eine Verlängerung der Pollensaison infolge des Klimawandels kann die gesundheitlichen Folgen verstärken.



Um die Länge der Pollensaison abzubilden, greift der Indikator auf Messreihen des Polleninformationsdienstes (PID) zum Pollenflug von Hasel und Beifuß zurück. Üblicherweise markiert der Pollenflug der Hasel den Beginn, jener des Beifußes das Ende der Pollensaison (Damialis et al. 2019). Die Länge der Pollensaison gibt der Indikator in Tagen an. Dabei ist zu beachten, dass der Pollenflug der Hasel und damit auch die gesamte Pollensaison bereits im Dezember des Vorjahres beginnen kann. Ist dies der Fall, wird der Tag des Beginns der Pollensaison vom Jahresbeginn rückwärts gezählt und mit negativem Vorzeichen angegeben.

An den beiden dargestellten Messstationen ist noch kein signifikanter Trend erkennbar (Abbildung 92). Die Länge der Pollensaison unterliegt großen Schwankungen. Im Jahr 2003 betrug sie in Bad Lippspringe lediglich 169 Tage, im Jahr 2001 dauerte sie hingegen 255 Tage an. Die durchschnittliche Länge der Pollensaison beträgt in Bad Lippspringe 213 und in Mönchengladbach 221 Tage und erstreckt sich somit über mehr als sieben Monate des Jahres.

Pollenallergie – Wie viele Menschen sind betroffen?

Heuschnupfen ist unangenehm. Betroffene leiden während der Pollensaison an Schnupfen, Niesreiz sowie tränenden und juckenden Augen. Auch Konzentrationsprobleme, Schlafstörungen und Husten sind Symptome einer Pollenallergie. Aber wie viele Menschen reagieren eigentlich allergisch auf Pollen?

Die Größe, die angibt, wie viele Menschen zu einem bestimmten Zeitpunkt von einer Erkrankung betroffen sind, ist die Prävalenz. Auf Datengrundlage der Studie zur Gesundheit Erwachsener in Deutschland, die das Robert-Koch-Institut letztmalig im Zeitraum von 2008 - 2011 durchführte, lassen sich Prävalenzen berechnen (Haftenberger et al. 2013). Im Ergebnis zeigt sich, dass große Bevölkerungsteile

Deutschlands gegenüber Pollen sensibilisiert sind – das heißt allergisch auf Pollen reagieren. So sind in NRW 20 % aller Erwachsenen gegen Gräserpollen allergisch. Gegenüber Baumpollen sind ca. 20 % und gegenüber Kräuterpollen noch ca. 9 % der Erwachsenen sensibilisiert. Interessant ist dabei, dass junge Erwachsene häufiger von Allergien betroffen sind als ältere.

Es deutet sich außerdem an, dass die Prävalenzen von Pollenallergien insgesamt ansteigen. Wenn zunehmend mehr Menschen von Pollenallergien betroffen sind, wird auch eine Verlängerung der Pollensaison für mehr Menschen zu einem gesundheitlichen Problem.





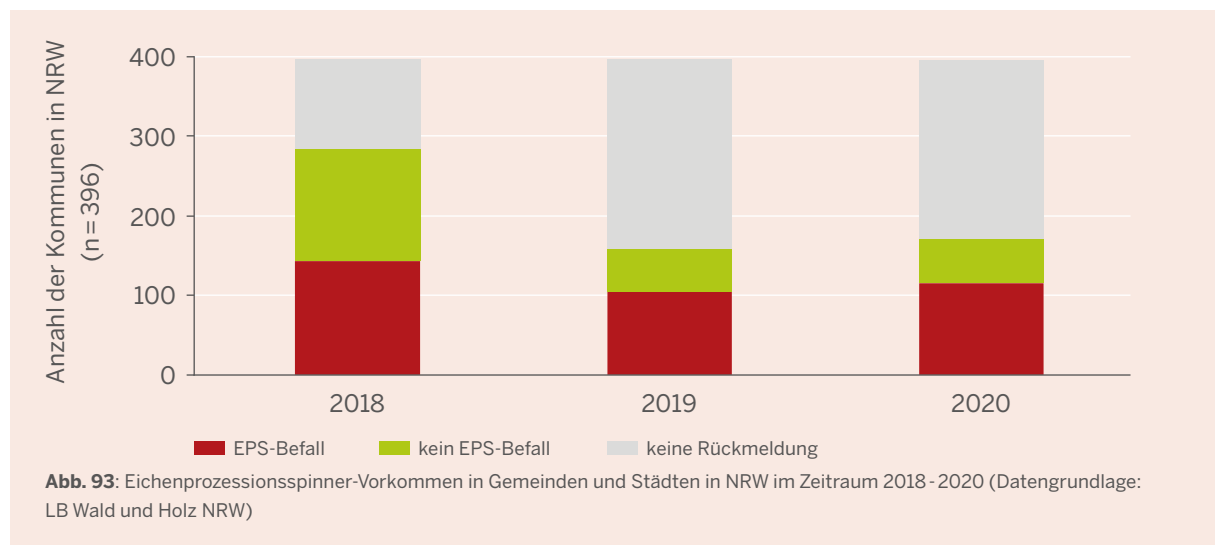
9.8 Befall mit Eichenprozessionsspinnern

I

Hoher Bekämpfungsaufwand für Kommunen

Infolge des Klimawandels kann es zur Vermehrung von wärmeliebenden Tierarten kommen. In diesem Zusammenhang tritt der Eichenprozessionsspinner (EPS) vermehrt auf. Bevorzugte Orte für seine Eiablage sind Eichen an sonnenexponierten Lagen, etwa an Waldrändern, Übergangsbereichen zu Straßen und Siedlungen, in Parkanlagen und Gärten sowie an Sport- und Spielplätzen (Bräsicke 2013).

Für die menschliche Gesundheit ist die Ausbreitung des EPS mit unangenehmen Folgen verbunden. Die Brennhaare von Eichenprozessionsspinnerräupen können starken Juckreiz, Hautrötungen, Quaddeln, Allergien, Bindehautentzündungen, Bronchitis, Asthma oder Schwindel verursachen.



Seit dem Jahr 2018 ermittelt der Landesbetrieb Wald und Holz über eine jährliche Befragung, in welchen Kommunen in NRW Eichenprozessionsspinner-Befälle auftraten (Abbildung 93). Als Messgröße kommt daher für den Indikator die Anzahl an Kommunen in NRW zum Einsatz, in denen ein Befall gemeldet wurde. Als Befall gilt dabei ein bloßes Vorkommen, auch wenn keine Bekämpfungsmaßnahmen durchgeführt wurden.

Der Eichenprozessionsspinner beschäftigt viele Kommunen in NRW: Im Zeitraum 2018-2020 haben jeweils mehr als 100 Kommunen einen Befall gemeldet. Allerdings war die Beteiligung der Kommunen an der Befragung in den drei Jahren freiwillig und unterschiedlich hoch, sodass die Darstellung eher Stichprobencharakter hat. Da sich die Zeitreihe im Aufbau befindet, sind Aussagen zu Trends noch nicht möglich. Die Aussagekraft des Indikators wird sich erhöhen, wenn künftige Jahrgänge die Zeitreihe ergänzen.

Wie wird der Eichenprozessionsspinner bekämpft?

Wenn in einem Gebiet Eichen mit Eichenprozessionsspinner-Befall festgestellt werden, gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Gefährdung für die menschliche Gesundheit einzudämmen. Die Wahl sinnvoller Maßnahmen hängt dabei unter anderem vom Ort und der Stärke des Befalls ab, aber auch vom Zeitpunkt bzw. dem Entwicklungsstadium in dem sich der Eichenprozessionsspinner befindet (Fransen 2013).

Bei schwächeren Befällen in Bereichen, die nur selten von Menschen betreten werden, reicht es aus, die Öffentlichkeit auf die Gefahr hinzuweisen, zum Beispiel mit Warnschildern. Bei stärkeren Befällen, aber geringer Wahrscheinlichkeit, dass viele Menschen in Kontakt mit Brennhaaren der Raupen kommen, sollten die betroffenen Gebiete während der Hochsaison in Mai und Juni weiträumig abgesperrt werden. In der Luft können die Brennhaare bis zu 500 Meter weit getragen werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass gesundheitliche Probleme durch die Raupen des Eichenprozessionsspinners auftreten, erhöht sich, wenn sich in dem betroffenen Gebiet regelmäßig viele Menschen aufhalten und eine weiträumige Absperrung nicht möglich ist. Für diesen Fall existieren verschiedene Möglichkeiten zur Bekämpfung. Aber welche Methode ist wann sinnvoll?

Ein relevanter Aspekt ist hierbei, wie früh der Eichenprozessionsspinner-Befall erkannt wird. Bei früher Erkennung bietet sich der Einsatz biologischer Bekämpfungsmittel an, beispielsweise die Injektion von Nematoden in die Nester des EPS. Nach der Injektion im April oder Mai dringen sie in die Körper der Raupen ein und entwickeln sich. Dadurch werden die Raupen des EPS abgetötet.

Ab Ende Mai kommen dann mechanische oder thermische Bekämpfungsmethoden zum Einsatz. Die mechanische Bekämpfung erfolgt üblicherweise durch Absaugen oder manuelle Beseitigung. Beim Absaugen werden größere Mengen an Raupen und Raupennester am Boden und in den Bäumen mittels einer Art „Staubsauger“ oder einer Vakuum-



pumpe mit angeschlossenem Jauchefass abgesaugt. Die manuelle Beseitigung in Bäumen führen Baumkletterer durch. Diese nehmen die Nester vorsichtig vom Baum ab und führen sie einer geeigneten Entsorgung zu. Sowohl beim Absaugen als auch bei der manuellen Beseitigung ist eine fachgerechte Entsorgung der Raupenrückstände und die Beachtung von Arbeitsschutzmaßnahmen für die Ausführenden nötig.

Da die reine thermische Bekämpfung über Abflammen viele Nachteile besitzt und mittlerweile eher unüblich ist, hat sich inzwischen eine Kombination aus mechanischer und thermischer Bekämpfung bewährt. Hierbei werden die Raupen durch ein sogenanntes „Raupenkrematorium“ erst abgesaugt und anschließend mittels Infrarotstrahlung verbrannt. So verbleiben keine schädlichen Brennhaare mehr im Rückstand, wodurch eine spezielle Müllbeseitigung nicht mehr notwendig ist.

Das Umweltministerium NRW hat 2020 den Kommunen einen Praxisleitfaden zum Umgang mit dem Eichenprozessionsspinner zur Verfügung gestellt und veröffentlicht (MULNV 2020a). In dem Leitfaden werden auch Bekämpfungsmaßnahmen detailliert dargestellt. Er wurde unter der Mitarbeit des Landesbetriebes Wald und Holz erstellt.



10. Katastrophenschutz

Der Katastrophenschutz ist wie die gesamte Gefahrenabwehr in Nordrhein-Westfalen unter anderem auf den Umgang und die Bewältigung von Naturgefahren wie Starkregen, Dürre oder orkanartige Stürme ausgerichtet. Die Kreise und kreisfreien Städte als kommunale Aufgabenträger sind nach dem Gesetz über den Brandschutz, die Hilfeleistung und den Katastrophenschutz (BHKG) im Rahmen ihrer Aufgaben zur Gefahrenabwehr verpflichtet, Katastrophenschutzpläne für Großschadenslagen und Katastrophen sowie Sonderschutzpläne zu erstellen und fortzuschreiben. Diese Pläne sind auf die Vorbereitung der Gefahrenabwehr zur tatsächlichen Schadensbewältigung ausgerichtet und beinhalten abgestuft die möglicherweise erforderlichen Maßnahmen wie etwa „Räumung“, „Evakuierung“ oder „Betreuung“.

Im Zuge des fortschreitenden Klimawandels ist davon auszugehen, dass sich sowohl die Häufigkeit als auch die Intensität von Naturereignissen erhöhen werden. Zu den Kernaufgaben des Katastrophenschutzes gehört die Beseitigung unmittelbarer Gefahrenlagen, die aus solchen Ereignissen resultieren. Insofern ist für die Zukunft mit einer Zunahme der Einsätze des Katastrophenschutzes sowie mit wachsenden Herausforderungen zu rechnen. Dies berücksichtigen die Katastrophenschutzbehörden bei der Fortschreibung ihrer Planungen, der Aus- und Fortbildung, der Resilienz der eigenen Liegenschaften oder ihrer Ausstattung. Das Land unterstützt die Behörden vor Ort durch zentrale Beschaffungen etwa von Hochleistungspumpen oder Notstromaggregaten.



Auswirkungen des Klimawandels

Durch die veränderten klimatischen Verhältnisse kommt es voraussichtlich zu einem vermehrten und intensiveren Auftreten von Extremwetterereignissen. Dies kann eine Zunahme der Einsatzaufkommen bei Katastrophenschutzbehörden zur Verhinderung oder Beseitigung von Schäden zur Folge haben. Des Weiteren kann es durch extremwetterbedingte Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen, wie der Überflutung von Liegenschaften und Anbindungswegen oder den Ausfall der Strom- und Energieversorgung, auch zu einer Beeinträchtigung der Einsatzfähigkeit von Katastrophenschutzbehörden selbst kommen.

Indikatoren-Kernaussagen:

- Unwetterwarnungen vor konvektiven Gewittern haben in der letzten Dekade zugenommen.
- Einsatzzahlen der Feuerwehren steigen mit Extremereignissen stark an.
- Trockenheit führt zu deutlich mehr Bränden in der Vegetation.



Tab. 12: Übersicht der Indikatoren zum Handlungsfeld 10 „Katastrophenschutz“

Indikator		Einheit	räumlicher Bezug	Zeitreihe	
10.1 Unwetterwarnungen	Gewitter (konvektiv)	Anzahl Unwetterwarnungen der Stufen 3 und 4	NRW	2010 - 2020	
	Wind		NRW	2010 - 2020	
	Stark-/Dauerregen		NRW	2010 - 2020	
	Schneefall		NRW	2010 - 2020	
	Tauwetter		NRW	2010 - 2020	
	gesamt		NRW	2010 - 2020	
10.2 Einsatzzahlen Wasser- und Sturm-schäden	technische Hilfeleistung der öffentlichen Feuerwehren in der Kategorie Wasser- und Sturmschäden	Anzahl	NRW	2012 - 2020	
10.3 Gefahrenabwehr Vegetationsbrände	Anzahl der Brandeinsätze zur Vegetationsbrandbekämpfung	Anzahl	NRW	2012 - 2020	

steigender Trend

fallender Trend

Trend mit Trendumkehr: zuerst fallend, dann steigend

Trend mit Trendumkehr: zuerst steigend, dann fallend

kein Trend



günstige Entwicklung

ungünstige Entwicklung

keine Bewertung der Entwicklung möglich oder gleichzeitig günstige und ungünstige Entwicklungsaspekte vorhanden



	Mittelwert Zeitreihe	Trend Zeitreihe	Änderung Zeitreihe	Querbezüge zu anderen Handlungsfeldern
	135	~	-	4 (S. 82), 9 (S. 184), 13 (S. 230), 14 (S. 248), 15 (S. 256), 16 (S. 262)
	6	~	-	
	8	~	-	
	6	↘	-15	
	1	-	-	
	155	~	-	4 (S. 82), 9 (S. 184), 12 (S. 224), 13 (S. 230), 14 (S. 248), 15 (S. 256), 16 (S. 262)
	27.680	~	-	
	3.647	↗	+3.135	4 (S. 82), 5 (S. 114), 9 (S. 184), 13 (S. 230), 14 (S. 248), 15 (S. 256), 16 (S. 262)



10.1 Unwetterwarnungen



Unwetterwarnungen vor konvektiven Gewittern nehmen zu

Die klimawandelbedingte Zunahme der Lufttemperatur wirkt sich unter anderem durch eine steigende Verdunstung unmittelbar auf den Wasserdampfgehalt der Luft und mittelbar auf die Zirkulationssysteme der Erde aus. Dies kann in manchen Regionen der Erde zu Dürren führen, in anderen Regionen zur Erhöhung der Niederschlagssummen. Dort kann es vermehrt zu Gewittern, Starkregen oder Dauerregen mit großen Niederschlagsmengen kommen. Darüber

hinaus begünstigt die durch die Verdunstung zur Verfügung stehende Energiemenge möglicherweise die Entstehung von Stürmen. Unwetter richten oft Schäden an, an deren Beseitigung Katastropheneinsatzkräfte wie beispielsweise die Feuerwehren beteiligt sind. Vermehrte Unwetterwarnungen können daher Anzeiger für vermehrten Einsatzbedarf von Katastrophenschutzkräften sein.

Als Indikator wird die Anzahl der vom Deutschen Wetterdienst (DWD) ausgegebenen Unwetterwarnungen für NRW verwendet (Abbildung 94). Der DWD hat vier Warnstufen für warnwürdiges Wetter definiert (DWD 2020d), von denen für den Indikator die zwei mit dem höchsten Schadenspotenzial gebündelt ausgewertet werden: Warnungen vor Unwettern (Stufe 3) und Warnungen vor extremen Unwettern (Stufe 4). Dabei unterscheidet der DWD hinsichtlich folgender Kriterien nach deren Intensität: Wind (orkanartige Böen, Orkanböen, extreme Orkanböen), Gewitter (schwere bzw. extreme Gewitter),

Regen (heftigen bzw. extrem heftigen Starkregen, ergiebigen bzw. extrem ergiebigen Dauerregen), Schnee (starker bzw. extrem starker Schneefall, starke bzw. extrem starke Schneeverwehungen), Glatteis und starkes Tauwetter. Die Warnungen werden aufgeschlüsselt nach den Kategorien Gewitter (konvektiv), Wind, Stark-/Dauerregen, Schnee und Tauwetter dargestellt. Es ist zu beachten, dass Unwetterwarnungen amtliche Vorhersagen von Wettererscheinungen sind, die zu einer Gefahr für die öffentliche Sicherheit und Ordnung führen können. Es handelt sich nicht um Daten zu tatsächlich eingetretenen Schadensereignissen. Weitere Warnungen des DWD betreffen zum Beispiel den Bereich Hitze und werden im Indikator 9.3 „Hitzewarnungen“ beschrieben.



Die Unwetterwarnungen wurden zu Beginn der Zeitreihe im Jahr 2010 auf Landkreisebene herausgegeben, seit dem Jahr 2016 auf Gemeindeebene. Zur besseren Vergleichbarkeit werden auch in den aktuellen Jahren für die Auswertung die Zusammenfassungen der Gemeindewarnungen zu Landkreiswarnungen genutzt. Für den Indikator werden alle ausgegebenen Unwetterwarnungen gezählt. Speziell bei kleinräumig auftretenden Unwettern können dies auch mehrere Warnungen pro Tag sein.

Im Zeitraum 2010 bis 2020 gab der DWD für NRW insgesamt 1.709 Unwetterwarnungen der Stufen 3 und 4 aus. Davon entfielen 87 % auf das Warnereignis Gewitter (konvektiv). Die Kurve der Gewitterwarnungen lässt eine Zunahme dieser Warnungen vermuten (Abbildung 94), diese ist jedoch nicht statistisch signifikant. Die Anzahl der Extremniederschlagsereignisse hat über den Gesamtmesstzeitraum in NRW tatsächlich zugenommen. Dies bestätigt der Indikator 2.4 „Niederschlagsextreme“. Außerdem haben Auswertungen im Projekt ExUS 2020 gezeigt, dass die Extremniederschlagsereignisse insbesondere für kurze Dauerstufen bis vier Stunden zunehmen (LANUV, unveröffentlicht).

Die Kategorien Wind, Stark-/Dauerregen und Schneefall spielen mit jeweils rund 4 bis 5 % der Unwetterwarnungen eine deutlich kleinere Rolle, Warnun-

gen vor Tauwetter gab es in den ganzen Jahren nur im Jahr 2011 (Abbildung 94). Hier liegt lediglich für die Kategorie Schneefall ein statistisch signifikant fallender Trend vor.

In den Jahren 2014 und 2016 wurden mit mehr als 300 die mit Abstand meisten Unwetterwarnungen für NRW herausgegeben (Abbildung 94). Ursächlich waren in 2014 als herausragende Witterungsereignisse der Pfingststurm Ela und die verheerenden Überschwemmungen im Juli in Münster infolge eines Starkregenereignisses. 2016 suchte eine Unwetterserie im Mai und Juni mit den Tiefs „Elvira“, „Friederike“ und „Lea“, ebenfalls mit extrem heftigen Starkregenfällen, weite Teile von NRW heim. 2018 sorgte am 18. Januar ein Orkantief – wieder mit Namen „Friederike“ – verbreitet für erhebliche Schäden.

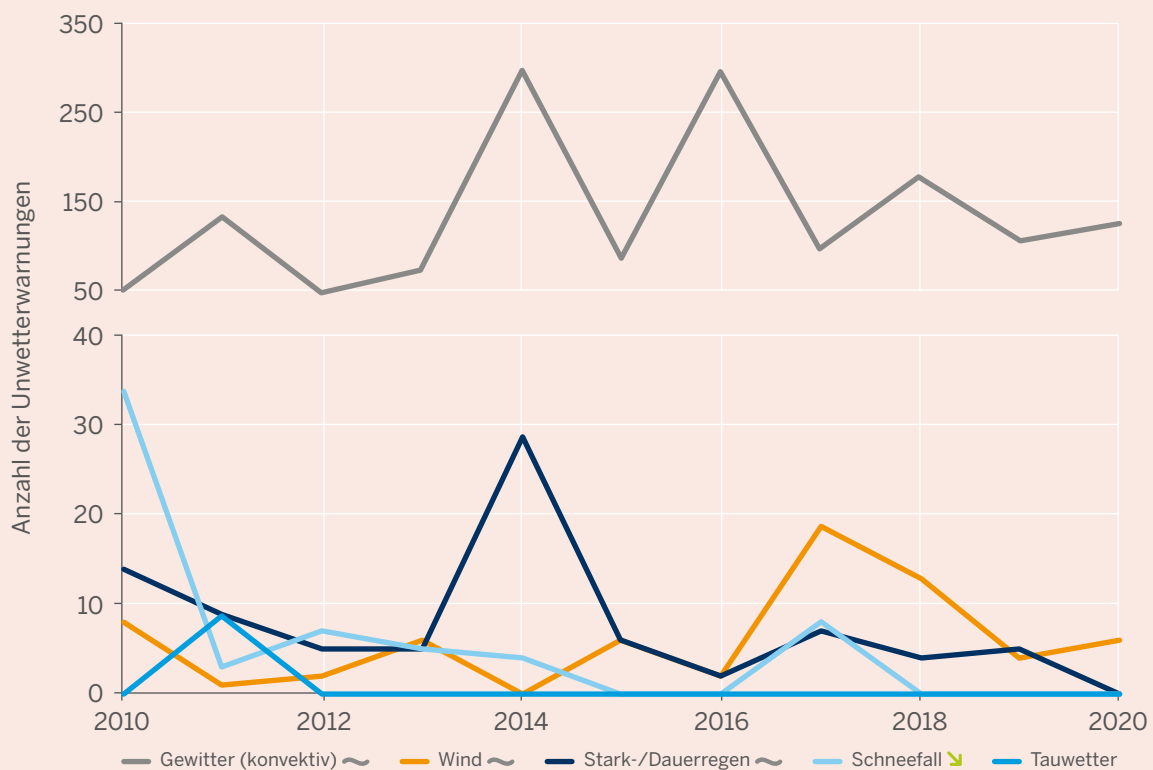


Abb. 94: Anzahl der Warnungen des Deutschen Wetterdienstes vor warnwürdigem Wetter der Stufen 3 (Unwetterwarnungen) und 4 (Warnung vor extremen Unwetter) nach verschiedenen Ursachen (Datengrundlage: DWD)



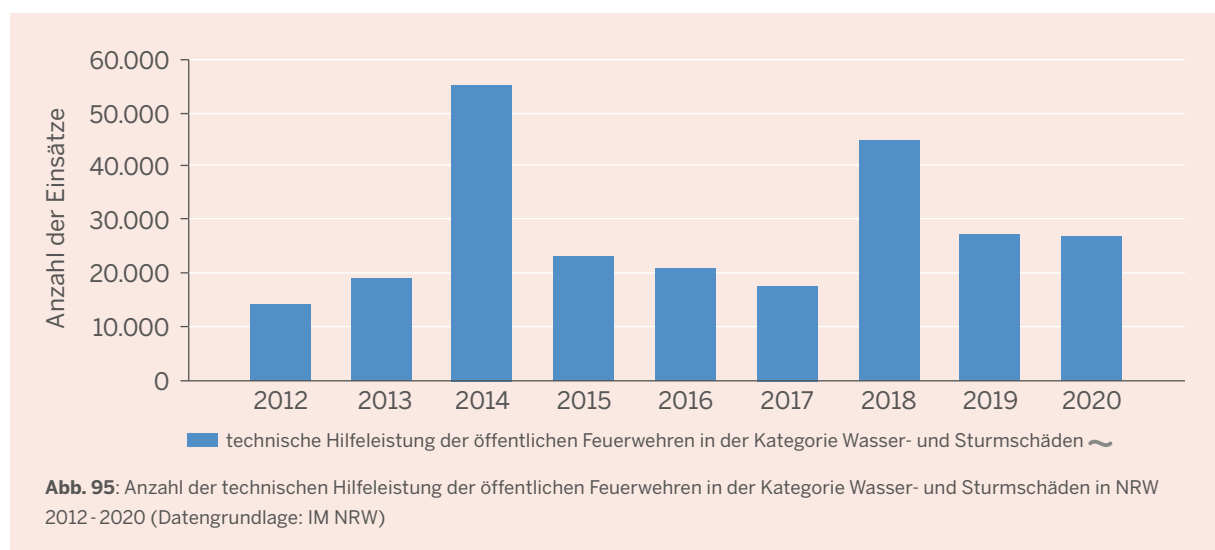
10.2 Einsatzzahlen Wasser- und Sturmschäden

I

Extremereignisse fordern unsere Einsatzkräfte

Durch die veränderten klimatischen Verhältnisse ist zukünftig mit einem vermehrten Auftreten von Extremwetterereignissen zu rechnen. Dies kann ein erhöhtes Einsatzaufkommen bei Katastrophenschutzbehörden zur Verhinderung oder Beseitigung von Schäden zur Folge haben. Die originären Aufgabenträger der Gefahrenabwehr und des Katastro-

phenschutzes sind die Städte, Gemeinden und Kreise, sodass die wetter- und witterungsbedingte Gefahrenabwehr in erster Linie durch die Feuerwehren geleistet wird. Weitere Hilfsorganisationen, wie etwa das Technische Hilfswerk (THW), kommen zum Einsatz, wenn Vorfälle nicht allein durch örtliche Einsatzkräfte zu bewältigen sind.



Der Indikator zeigt die Entwicklung der technischen Hilfeleistung der öffentlichen Feuerwehren in der Kategorie Wasser- und Sturmschäden in NRW von 2012 bis 2020 (Abbildung 95). Die Zahlen stammen aus der Jahresstatistik zur Gefahrenabwehr, die durch das Ministerium des Innern des Landes Nordrhein-Westfalen veröffentlicht wird (IM NRW 2020). Als öffentliche Feuerwehren gelten in diesem Zusammenhang Berufsfeuerwehren und Freiwillige Feuerwehren.

Die Anzahl der jährlichen technischen Hilfeleistungen in diesem Zeitraum liegt zwischen rund 14.000 und 55.000 Einsätzen pro Jahr. In den Jahren 2014 und 2018 wurden mit rund 55.000 und 45.000 bei Weitem die meisten Einsätze verzeichnet. Dies ist auf das Sturmtief Ela und das Starkregenereignis in Münster in 2014, sowie das Orkantief Friederike in 2018 zurückzuführen, welche hohe Schäden in NRW verursacht haben. Diese Extremereignisse bilden sich ebenfalls in

verschiedenen anderen Indikatoren, wie beispielsweise 10.1 „Unwetterwarnungen“ oder 17.2 „Elementarschäden“ ab. Aktuell ist bei diesem Indikator noch kein statistisch signifikanter Trend festzustellen. Zukünftig muss jedoch durch den Klimawandel vermehrt mit solchen

Ereignissen und damit – je nach Wirksamkeit getroffener präventiver Maßnahmen – mit einem entsprechend erhöhten Einsatzbedarf für technische Hilfsleistungen gerechnet werden.

Starkregenkarten decken Risikogebiete auf

Potenziell ist jeder Ort von Starkregen gefährdet, denn diese können überall auftreten. Das Risiko, von einem Starkregen geschädigt zu werden, resultiert vor allem aus den lokalen topographischen Gegebenheiten, zum Beispiel durch die Lage von Gebäuden in Senken, in denen sich das Niederschlagswasser sammelt. Außergewöhnliche Regenereignisse führen zu Überflutungen, mit der Folge, dass Wasser über tiefer liegende Gebäudeöffnungen, wie beispielsweise Türen, Treppen, Lichtschächte oder Garageneinfahrten in Gebäude eindringen kann. Darüber hinaus können starke Regenfälle in ungesicherten Kellern zu Überschwemmungen durch Rückstau aus der Kanalisation führen. Neben Schäden an PKW, Heizungen, Waschmaschinen etc. können Öltanks beschädigt und Schadstoffbelastungen verursacht werden. Zudem besteht ein Risiko der Schimmelbildung nach Abpumpen des Wassers (STEB Köln 2021b). Im öffentlichen Bereich können tiefer liegende Straßen, wie Brückenunterführungen, überflutet werden und so wichtige Anbindungen für die Feuerwehr und den Rettungseinsatz unterbrechen.

Einige Städte stellen der Einwohnerschaft auf ihren Internetseiten Starkregenkarten zur Verfügung, in denen sich Interessierte über die individuelle Gefährdung durch Starkregen informieren können. Dies sind besonders Gebäudeeigentümerinnen und -eigentümer sowie öffentliche Stellen, die an der Gestaltung der städtischen Flächen (zum Beispiel Verkehrsflächen oder Grünflächen) beteiligt sind. Für Köln bieten etwa die Stadtentwässerungsbetriebe eine solche Karte an (Abbildung 96). Die gefährdeten Bereiche werden über Blautöne hinsichtlich ihrer Überflutungshöhe und Ausdehnung dargestellt. Dabei wird unterschieden, wie groß die Gefahr der Überflutung für ein mittleres (statistisch 30-jährlich), seltenes (statistisch 50-jährlich) oder extremes (statistisch 100-jährlich) Starkregenereignis ist. Die Karten wurden mithilfe einer Simulation von Oberflächenabflüssen auf einem digitalen Geländemodell mit 1 x 1 m Auflösung erstellt (STEB Köln 2021a). Begleitet wird die Karte von einem umfangreichen Informationsangebot beispielsweise mit praktischen Hinweisen zu Schutzmaßnahmen, die privat auf Grundstücken und in Gebäuden gegen Überflutungen getroffen werden können (STEB Köln 2021b).



Starkregengefährdung

	gering
	mäßig
	hoch
	sehr hoch

Abb. 96: Starkregengefährdungskarte in Köln. Zugrunde gelegt wurde ein mittleres Niederschlagsereignis (statistisch 30-jährlich) (Quelle: STEB Köln 2021a)



10.3 Gefahrenabwehr

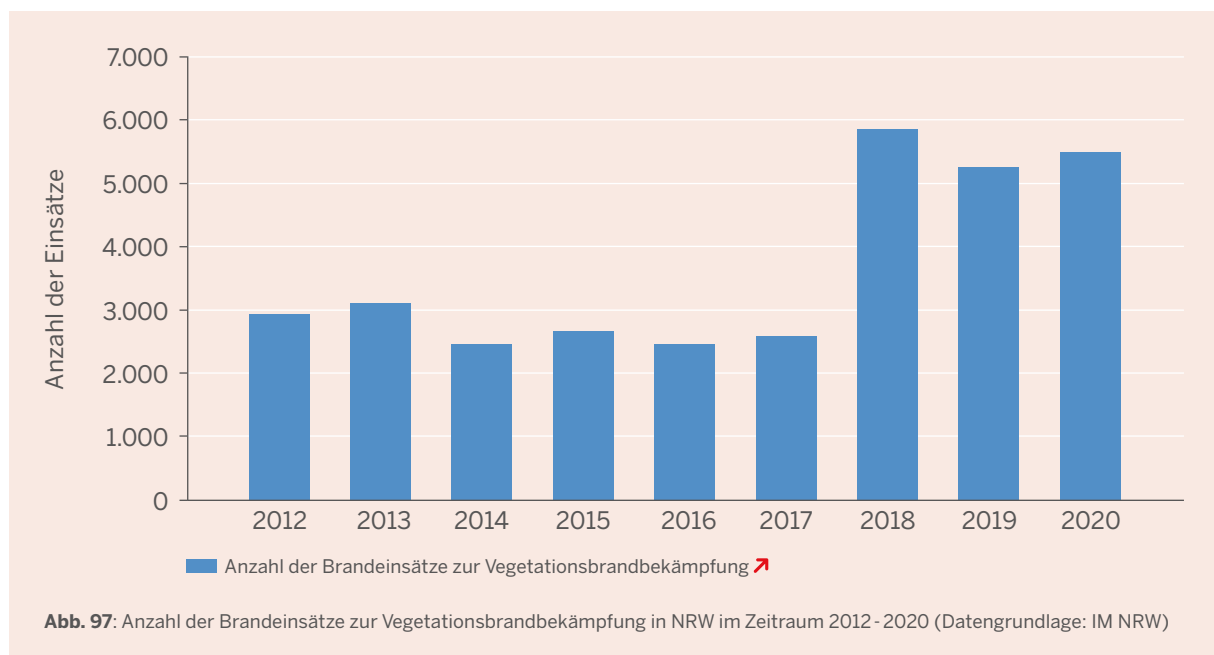
I

Vegetationsbrände

Trockenheit führt zu mehr Bränden in der Vegetation

Die veränderten klimatischen Verhältnisse führen zu einem vermehrten Auftreten von Extremwetterereignissen. Dürreperioden haben zu Folge, dass die Vegetation nicht mit ausreichend Wasser versorgt wird und somit im Wald, in Mooren oder auch an Straßenböschungen trockene Verhältnisse herr-

schen, welche das Entstehen und die Ausbreitung von Bränden fördern können. Auch dies kann ein erhöhtes Einsatzaufkommen bei Katastrophenschutzbehörden zur Verhinderung oder Beseitigung von Schäden zur Folge haben.



Neben der Anzahl der technischen Hilfeleistungen der öffentlichen Feuerwehren im Indikator 10.2 „Einsatzzahlen Wasser- und Sturmschäden“, wird auch die Anzahl der Brandeinsätze zur Vegetationsbrandbekämpfung im Gefahrenabwehrbericht des Landes NRW (IM

NRW 2020) erfasst. Anhand der Anzahl der Brandeinsätze zur Vegetationsbrandbekämpfung kann der Einfluss des steigenden Temperaturniveaus auf die Trockenheit der Vegetation und deren Verwundbarkeit dargestellt werden.

Bei der hier dargestellten Anzahl der Brandeinsätze ist zu beachten, dass nicht nach der Brandursache differenziert wird, sodass nicht abschließend gesichert ist, ob die Brände durch klimabedingte hohe Temperaturen entstanden sind und welchen Einfluss Brandstiftung hat. Grundsätzlich entstehen und verbreiten sich Brände jedoch schneller in einer durch fehlende Niederschläge und hohe Temperaturen trockenen Vegetation.

Die Anzahl der Brandeinsätze zur Vegetationsbrandbekämpfung liegt von 2012 bis 2017 auf einem relativ konstanten Niveau zwischen rund 2.500 und 3.100 Einsätzen (Abbildung 97). In den Jahren 2018 bis 2020 ist eine starke Zunahme der Brandeinsätze auf über 5.200 zu beobachten. Für den überdurchschnittlich heißen Sommer 2018 und die insgesamt trockenen Jahre 2019 und 2020 kann ein Zusammenhang mit dem Klimawandel angenommen werden. Es liegt ein signifikant steigender Trend vor.

Regionale Waldbrandbekämpfung am Beispiel des Kreises Viersen

Nach einem Brand im Naturpark Maas-Schwalm-Nette, bei dem Ende April 2020 rund 200 Hektar Wald und Heide vernichtet wurden, bereitet sich der Kreis Viersen mit kurz-, mittel- und langfristigen Maßnahmen auf weitere Waldbrände vor (RP 2020). Der Katastrophenschutzplan des Kreises soll mit Blick auf die Waldbrandprävention überarbeitet werden, um die Handlungsmöglichkeiten Städte- bzw. Gemeindeübergreifend zu erweitern.

Zu den Sofortmaßnahmen zählen der Einsatz von Waldbrandstreifen und die Erhöhung der Alarmstufe bei einem Waldbrandverdacht. Zudem sollen auch im Grenzgebiet Wasserentnahmestellen eingerichtet werden, um selbst im Sommer eine gesicherte Wasserentnahme zu ermöglichen. Zur Umsetzung der Maßnahmen wird die Fahrzeugflotte mit einem weiteren Waldbrandlöschfahrzeug ausgerüstet.

Parallel zu den Aktivitäten des Kreises Viersen wurde in der deutsch-niederländischen Region zwischen Goch und Wassenberg bis Ende 2020 das deutsch-niederländische Interreg-Projekt zur Natur- und Waldbrandprävention durchgeführt. Gefördert

von der Europäischen Union, dem Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes NRW und der Provinz Limburg beteiligten sich 16 niederländische und deutsche Grenzgemeinden, Naturschutzorganisationen und Forsteinrichtungen als Projektpartner (RP 2020). Ziel des Projektes war der Austausch deutscher und niederländischer Kenntnisse über die Vermeidung und Bekämpfung von Natur- und Waldbränden im Grenzwald. Es wird angestrebt, das Projekt fortzuführen und die Ergebnisse in das Katastrophenschutzkonzept des Kreises einzuarbeiten.





11. Information, Bildung und Netzwerke

Der Klimawandel und seine konkreten Folgen sind heute noch nicht ausreichend im Bewusstsein der Bevölkerung verankert, beziehungsweise werden viele Ereignisse nicht mit dem Klimawandel in Verbindung gebracht. Gemäß Klimaanpassungsgesetz NRW (KIAng NRW) sollen das Verständnis und die Motivation der Bevölkerung für Klimaanpassungsmaßnahmen durch Bildung, Ausbildung, Information und Beratung gesteigert werden. Aufgabe im Querschnittsbereich „Information, Bildung, Netzwerke“ ist es daher, die Information, Sensibilisierung und Qualifizierung der Menschen zur Anpassung an die Klimafolgen zu bündeln und hierbei die Zusammenarbeit von Bildungsträgern und anderen Transfereinrichtungen zu stärken. Dazu müssen Wissensgrundlagen verbessert und Instrumente und Methoden zum Wissenstransfer entwickelt und umgesetzt werden. Unter anderem gilt es in diesem Zusammenhang, Beratungsangebote für Bürgerinnen und Bürger bereitzustellen sowie das Thema Klimafolgenanpassung in die schulische Bildung sowie in die berufliche Aus- und Fortbildung zu integrieren.



Indikatoren-Kernaussagen:

- Bildungsangebote zur Klimaanpassung aktuell stark nachgefragt.
- Die zunehmende Nachfrage nach Grundlagendaten- und -karten zeigt eine zunehmende Sensibilisierung für das Thema Klimafolgen und Klimaanpassung.

Tab. 13: Übersicht der Indikatoren zum Handlungsfeld 11 „Information, Bildung und Netzwerke“

Indikator		Einheit	räumliche Einheit	Zeitreihe	Mittelwert Zeitreihe	Trend Zeitreihe	Querbezüge zu anderen Handlungsfeldern
11.1 Bildungsangebote zum Thema Klima-anpassung	Seminare	Anzahl	BEW	2016 - 2020	4,2	–	4 (S. 82), 9 (S. 184), 10 (S. 206), 13 (S. 230), 14 (S. 248), 15 (S. 256)
	Teilnehmer-Innen	Anzahl	BEW	2016 - 2020	66	–	
11.2 Nutzung des Fachinformationssystems Klimaanpassung		Anzahl Aufrufe	–	2018 - 2020	362.440	–	4 (S. 82), 5 (S. 114), 6 (S. 130), 7 (S. 150), 8 (S. 166), 9 (S. 184), 12 (S. 224), 13 (S. 230), 14 (S. 248)



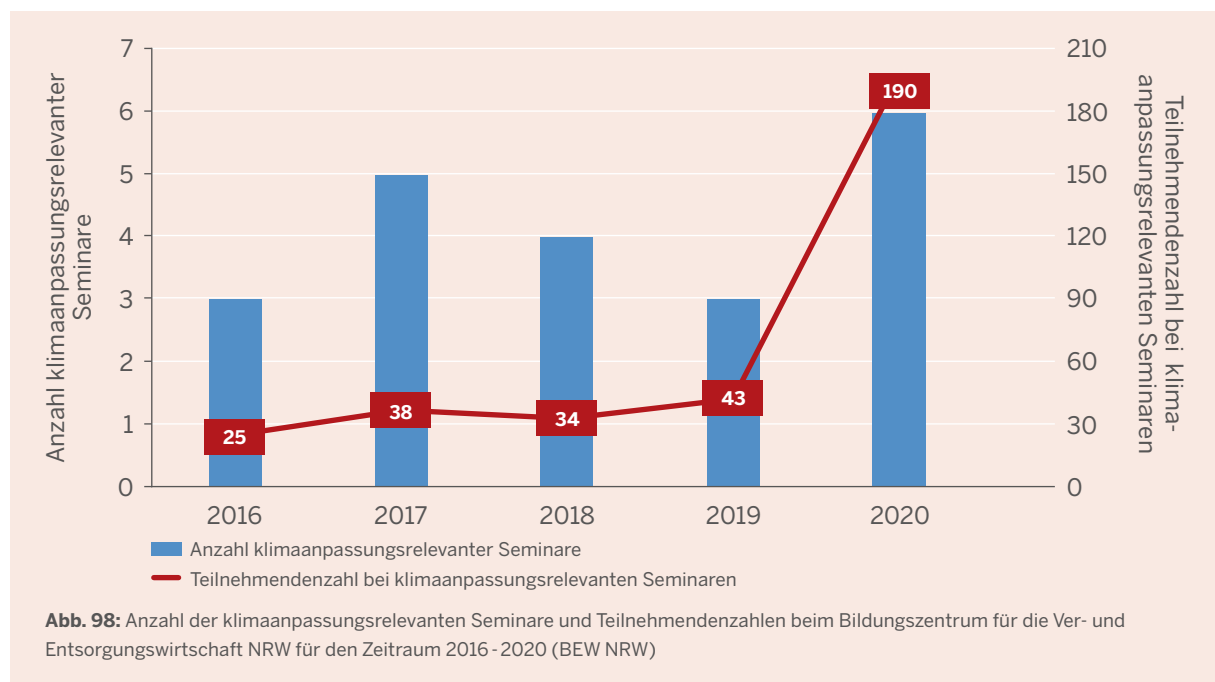
11.1 Bildungsangebote zum Thema Klimaanpassung



Seminarangebote zur Klimaanpassung nehmen zu

Um die klimaanpassungsrelevanten Akteure aus den verschiedenen Handlungsbereichen mit Erkenntnissen aus Praxis und Forschung auszustatten, ist es von Bedeutung, entsprechende Veranstaltungen zur beruflichen Fort- und Weiterbildung anzubieten. Dazu können zum Beispiel Seminare relevanter Be-

rufskammern und weiterer Bildungsinstitutionen gehören. Dabei können die Weiterbildungsangebote zur Klimaanpassung und deren Nachfrage einen Trend abbilden, inwieweit die Fortbildungsbranche auf diese Bedarfe reagiert und die Angebote von den jeweiligen Zielgruppen angenommen werden.



Zur Messung der vorhandenen Bildungsangebote für klimaanpassungsrelevante Fachkräfte werden im Rahmen dieses Indikators die Bildungsveranstaltungen des Bildungszentrums für die Ver- und Entsorgungswirtschaft (BEW) als Grundlage verwendet. Gemessen wird jeweils die Anzahl der Veranstaltungsangebote

zur Klimaanpassung sowie die Anzahl der Teilnehmenden an diesen Veranstaltungen pro Jahr. Mithilfe des Indikators werden Veranstaltungen/Angebote aus dem Bereich der beruflichen Fort- und Weiterbildung beispielhaft erfasst. Der genannte Fortbildungsträger wurde ausgewählt, da es hier konkret abgrenzbare Ange-

bote für den Bereich „Klimaanpassung“ gibt – andere Bildungsträger weisen diesen Bereich (noch) nicht explizit aus. Der thematische Schwerpunkt beim BEW liegt allgemein bei der Vermittlung von Klimaanpassungsprozessen, vor allem in Bezug auf Städte und Gemeinden, und der Kommunikation über soziale Medien.

Aufgrund der kurzen Zeitreihen im Zeitraum 2016 bis 2020 können noch keine eindeutigen Entwicklungen sowohl bei der Anzahl der klimaanpassungsrelevanten Bildungsangebote als auch bei der Anzahl der Teilnehmenden festgestellt werden (Abbildung 98). Auf-

fällig ist aber der sprunghafte Anstieg der Anzahl der Teilnehmenden im Jahr 2020. Die Seminare waren in diesem Jahr deutlich besser ausgelastet als zuvor. Dies deutet auf eine – zumindest aktuell – große Nachfrage nach (Weiter-)Bildungsangeboten für klimaanpassungsrelevante Fachkräfte hin und könnte ein Hinweis auf eine gestiegene Sensibilisierung beim Thema Klimafolgen/Klimaanpassung sein.

Netzwerker Klimafolgenanpassung NRW

Seit dem Jahr 2016 ist in NRW ein Netzwerker für Klimafolgenanpassung aktiv, der bei der EnergieAgentur.NRW angesiedelt ist. Er begleitet, unterstützt und vernetzt die Regionen, Kommunen sowie auch Unternehmen zum Themenkomplex Klimafolgenanpassung. Im Rahmen der Information und Bewusstseinsbildung zu den Folgen des Klimawandels und der Notwendigkeit einer frühzeitigen Anpassung bietet der Netzwerker für Klimafolgenanpassung Einstiegs- und Orientierungsberatungen an und dient als eine Art Erstansprechpartner für die kommunale Ebene. In diesem Zusammenhang hat der Netzwerker für Klimafolgenanpassung seit Beginn seiner Tätigkeit ca. 120 Fachvorträge gehalten.

In den Jahren 2018 und 2019 wurden unter der Federführung der EnergieAgentur.NRW fünf sogenannte „Regionalforen zur Klimafolgenanpassung“ in den einzelnen Regierungsbezirken sowie ein Sonderforum für die Großstädte Nordrhein-Westfalens durchgeführt. Darauf aufbauend haben sich regionale Klimaanpassungsnetzwerke etabliert, die durch den „Klimaanpassungsnetzwerker“ betreut werden. In diesem Zusammenhang finden in der Regel zweimal jährlich pro Region Erfahrungsaustausche zu unterschiedlichen regionalspezifischen Schwerpunktthemen der Klimafolgenanpassung

statt, die vom Klimaanpassungsnetzwerker – unterstützt durch die regionalen KlimaNetzwerker der EnergieAgentur.NRW – organisiert und durchgeführt werden. Hinzu kommen Veranstaltungen für Unternehmen, die in der Regel gemeinsam mit den regionalen IHKs und HWKs oder kommunalen Wirtschaftsförderungsgesellschaften durchgeführt werden und zahlreiche weitere Workshopveranstaltungen mit regionalen Partnern. Insgesamt wurden durch den Netzwerker für Klimafolgenanpassung in den letzten Jahren ca. 30 Vernetzungsveranstaltungen (mit)-organisiert, durch die ungefähr 2.300 Teilnehmende aus allen Handlungsfeldern der Klimafolgenanpassung erreicht werden konnten. Neben der Betreuung der eigenen Netzwerke nimmt der Netzwerker für Klimafolgenanpassung an verschiedenen weiteren etablierten regionalen Netzwerken als Mitglied teil.

Anhand der Nachfrage nach den Angeboten des „Klimaanpassungsnetzwerkers“ lässt sich in den letzten Jahren bei den kommunalen Akteuren ein zunehmendes Bewusstsein für die Notwendigkeit einer Anpassung an die Folgen des Klimawandels, insbesondere auf kommunaler Ebene, erkennen, wodurch nicht zuletzt auch die klimatischen Ereignisse der Jahre 2018 bis 2021 beigetragen haben.



11.2 Nutzung des Fachinformationssystems Klimaanpassung

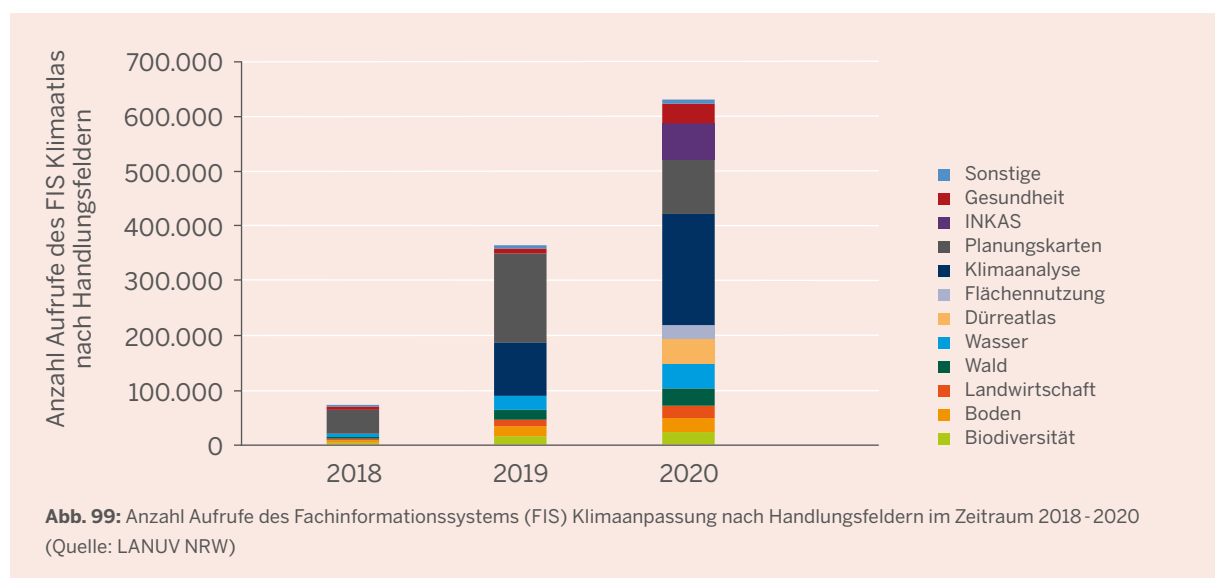


Die Nachfrage nach Grundlagenkarten für Klimaanpassungsmaßnahmen steigt

Aufgrund der vielfältigen Betroffenheit durch die Folgen des Klimawandels ist es wichtig, die Öffentlichkeit und anpassungsrelevante Akteure, wie zum Beispiel Planer und Planerinnen, für das Thema Klimaanpassung zu sensibilisieren. Zudem werden für die Identifizierung von Klimafolgen und die Planung von Maßnahmen Grundlagendaten und -karten benötigt. Das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV) stellt zu diesem Zweck seit Mitte 2016 das Fachinformationssystem (FIS) Klimaanpassung mit einer umfangreichen Informations- und Kartensammlung online zur Verfügung.

Im FIS Klimaanpassung (www.klimaanpassung.nrw.de, Abbildung 100) wird vorhandenes Wissen zu den

Klimafolgen und zur Anpassung an den Klimawandel in Nordrhein-Westfalen in Karten zusammengeführt. Ziel des FIS Klimaanpassung ist es, eine landesweite Daten- und Informationsgrundlage zur Abschätzung der Folgen des Klimawandels zu liefern, auf deren Basis Konzepte und Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel entwickelt werden können. Das FIS wird stetig weiterentwickelt und mit immer mehr Karten ausgestattet, seit 2018 werden auch die Seitenaufrufe je Handlungsfeld automatisch gezählt. Im Jahr 2020 standen Karten mit Daten aus zwölf Handlungsfeldern bereit, wie beispielsweise zur hitzeangepassten Quartiersplanung, Wasserwirtschaft, Planung, Boden, Wald, Landwirtschaft und Dürre.



Für den Indikator wird die Anzahl der Aufrufe des Fachinformationssystems (FIS) Klimaanpassung differenziert nach Handlungsfeldern genutzt (Abbildung 99). Die Zahlen zeigen ein großes Interesse an Grundlagen- und -karten zum Thema Klimafolgen und Klimaanpassung. Im Jahr 2020 wurden die Karten des FIS Klimaanpassung knapp 630.000 Mal aufgerufen. Aufgrund der kurzen Zeitreihe sind noch keine Trendaussagen möglich. Es ist aber eine deutliche Zunahme der Aufrufe zu sehen, sodass davon ausgegangen werden kann, dass die steigende Nachfrage mit einer zunehmenden Sensibilisierung hinsichtlich dieser Thematik zusammenhängt.



Abb. 100: Das Fachinformationssystem (FIS) Klimaanpassung (Quelle: LANUV NRW)

Klimaanpassungsgesetz NRW – Aufgaben des LANUV

Im Juli 2021 hat die nordrhein-westfälische Landesregierung als erstes Bundesland das Klimaanpassungsgesetz NRW (KlAnG) verabschiedet. Damit möchte sie der wachsenden Bedeutung des Themas der Anpassung an die Auswirkungen des Klimawandels Rechnung tragen. Insbesondere sollen die negativen Auswirkungen des Klimawandels begrenzt, drohende Schäden verringert, die Klimaresilienz gesteigert und Beiträge zu den nationalen und internationalen Anstrengungen bei der Klimaanpassung geleistet werden. Zweck des Gesetzes ist die Festlegung von Klimaanpassungszielen sowie die Schaffung einer rechtlichen Grundlage zur Erarbeitung einer Klimaanpassungsstrategie. Weiterhin soll die Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen vorangetrieben werden.

Nach § 9 KlAnG sind die Klimaanpassungsziele und die Umsetzung der Maßnahmen der Klimaanpassungsstrategie von einem fortlaufenden, wissenschaftlich fundierten Monitoring zu begleiten. Die Ergebnisse des Monitorings werden veröffentlicht und bilden die Grundlage für die Fortschreibung der Klimaanpassungsstrategie.

Das Landesamt für Natur-, Umwelt- und Verbraucherschutz hat in diesem Zusammenhang unter anderem die Aufgabe, das Klimafolgen- und Anpassungsmonitoring (KFAM) zu erarbeiten, fortlaufend zu aktualisieren und zu veröffentlichen. Mit diesem Bericht werden die Ergebnisse des KFAM aus der Arbeit der vergangenen Jahre erstmals der Öffentlichkeit präsentiert.

Eine weitere gesetzlich festgeschriebene Aufgabe des LANUV ist nach § 10 Abs. 2 die Erarbeitung und Bereitstellung von wissenschaftlichen Datengrundlagen und Instrumenten zur Unterstützung der Akteure der Klimaanpassung. Das LANUV arbeitet derzeit an der Zusammenführung des FIS Klimaanpassung mit weiteren Angeboten des LANUV zu einem Gesamtportal „Klimaatlas“. Der Klimaatlas soll eine noch umfangreichere und nutzerorientierte landesweite Daten- und Informationsgrundlage in NRW zum Klimawandel und seinen Auswirkungen bieten und Daten für die Konzeption von Anpassungsmaßnahmen bereitstellen. Zukünftig wird der Klimaatlas mit seinen Nutzungszahlen den Indikator 11.2 „FIS Klimaanpassung“ ersetzen.



Handlungsfelder

Bau und Planung



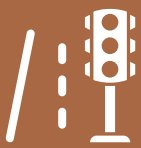
**12. Landes- und Regional-
planung**



**13. Stadtentwicklung und
kommunale Planung**



14. Bauen und Wohnen



**15. Verkehr und Verkehrs-
infrastruktur**



12. Landes- und Regionalplanung

Die Landes- und Regionalplanung (Raumordnung) spielt im Bereich der Klimafolgenanpassung eine bedeutende Rolle: So kann insbesondere die Regionalplanung über die Festsetzung von textlichen Zielen und Grundsätzen sowie die zeichnerische Ausweisung von Vorbehalts- und Vorranggebieten die räumlichen Voraussetzungen für Planungen und Maßnahmen schaffen, mit denen die Folgen des Klimawandels abgemildert werden können. Beispiele hierfür sind die Sicherung und Ausweitung von Abfluss- und Retentionsflächen in hochwassergefährdeten Gebieten oder zum Beispiel die Abmilderung des Effektes städtischer Wärmeinseln durch eine entsprechende Abgrenzung des Siedlungsraums und die Sicherung von regionalen Grünzügen, um damit Frischluftschneisen oder Kaltluftabflussbahnen freizuhalten.

Indikatoren-Kernaussagen:

- Die Sicherung von Überschwemmungsbereichen schafft Retentionsräume für den Hochwasserfall.
- Die ausgewiesene Siedlungsfläche pro Einwohnerin bzw. Einwohner in den Regionalplänen geht leicht zurück.

Kernaufgabe der Landes- und Regionalplanung ist dabei eine querschnittsorientierte Planung, mit der der Rahmen für die nachgeordneten Ebenen wie die Bauleitplanung und weitere Fachplanungen grobmaßstäblich festgelegt wird. Innerhalb dieses Rahmens haben die nachgeordneten Planungsträger vielfältige Spielräume zur Ausgestaltung konkreter Planungen und Maßnahmen. Hierfür werden im Landesentwicklungsplan sowie in den Regionalplänen konkrete Ziele und Grundsätze formuliert. Daher sind die maßgeblichen Indikatoren zur Bemessung der Klimaanpassung letztlich eher anderen Handlungsfeldern wie dem Städtebau, der Wasserwirtschaft oder dem Naturschutz zuzuordnen.

Außerdem ist es wichtig, dass den Regionalplanungsbehörden durch verschiedene Fachbehörden, insbesondere das LANUV, entsprechende fachliche Grundlagen bereitgestellt werden, um über die Festlegung von Zielen und Grundsätzen die Erfordernisse der Klimafolgenanpassung integrieren zu können. So erstellt das LANUV beispielsweise den Fachbeitrag Klima, der neben dem Thema Klimaschutz insbesondere die Möglichkeiten der Regionalplanung zur Anpassung an den Klimawandel fokussiert.

Tab. 14: Übersicht der Indikatoren zum Handlungsfeld 12 „Landes- und Regionalplanung“

Indikator	Einheit	räumliche Einheit	Zeitreihe	Mittelwert Zeitreihe	Trend Zeitreihe	Änderung Zeitreihe	Querbezüge zu anderen Handlungsfeldern
12.1 Sicherung von Überschwemmungsbereichen für den Hochwasserschutz	ha	NRW	2015 - 2020	136.344	–	–	4 (S. 82), 5 (S. 114), 6 (S. 130), 9 (S. 184), 10 (S. 206), 13 (S. 230), 14 (S. 248)
12.2 Effizienz der Flächeninanspruchnahme	m² pro Einw.	NRW	2015 - 2020	258	–	–	5 (S. 114), 6 (S. 130), 7 (S. 150), 8 (S. 166), 9 (S. 184), 13 (S. 230), 14 (S. 248)



12.1 Sicherung von **Überschwemmungsbereichen** **für den Hochwasserschutz**



140.000 Hektar Überschwemmungsbereiche für vorbeugenden Hochwasserschutz



Ein wesentlicher Aspekt der Anpassung an den Klimawandel ist die Sicherung von ausreichenden Gebieten für den vorbeugenden Hochwasserschutz bzw. der erforderlichen Retentionsräume. Diese werden durch die Regionalplanung auf Basis der erforderlichen Fachbeiträge als Überschwemmungsbereiche festgelegt. Die Überschwemmungsbereiche sind planerisch durch die Kommunen als Abfluss- und Retentionsraum zu erhalten und zu entwickeln und bewirken ein faktisches Verbot für die Inanspruchnahme für Siedlungszwecke.



In Abbildung 101 ist die Entwicklung der in den Regionalplänen Nordrhein-Westfalens seit 2015 ausgewiesenen Überschwemmungsbereiche dargestellt. Über die kurze Zeitreihe sind marginale Schwankungen erkennbar. Aufgrund der kurzen Zeitreihe ist bisher kein Trend berechenbar. Die regionalplanerisch ausgewiesenen Überschwemmungsbereiche nehmen im Jahr 2020 ca. 4,1 % der Landesfläche von NRW ein (ca. 140.000 ha), im Jahr 2019 waren es ca. 4,0 % (ca. 135.000 ha).

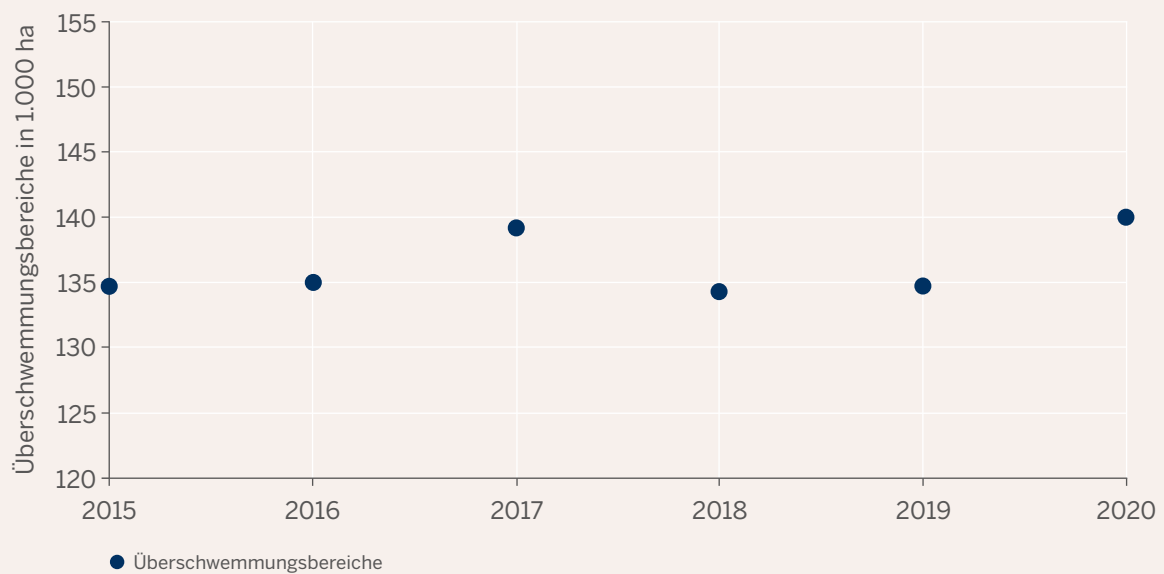


Abb. 101: Regionalplanerisch ausgewiesene Überschwemmungsbereiche in NRW (Datengrundlage: IT.NRW)



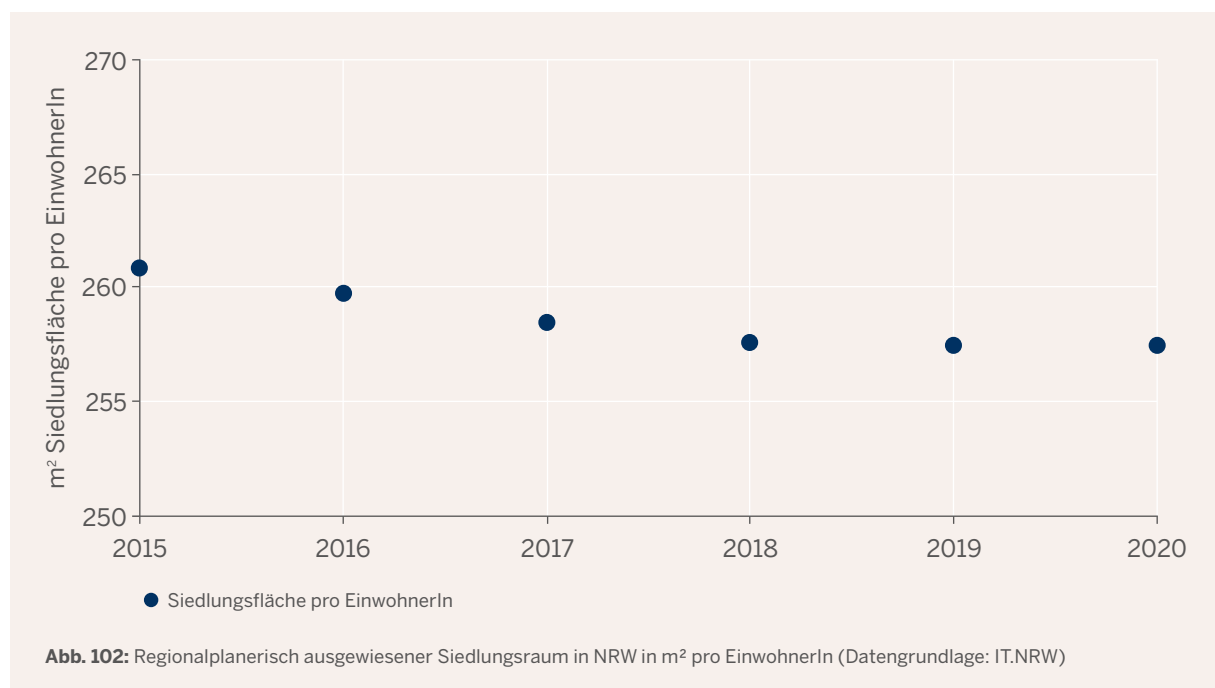
12.2 Effizienz der Flächeninanspruchnahme



Die Siedlungsfläche pro Einwohnerin bzw. Einwohner geht leicht zurück

Ein wichtiger Grundsatz der Landes- und Regionalplanung ist der Erhalt von Freiraum mit seinen vielfältigen Funktionen, zu denen auch die Sicherung unversiegelter Flächen gehört. Gleichzeitig soll die Siedlungsentwicklung bedarfsgerecht und flächensparend durch die Ausweisung von Siedlungsraum und in untergeordnetem Maße von Bauflächen in

den kleineren Ortsteilen gestaltet werden. Diese Rahmensetzung wirkt sich allerdings erst durch die konkrete Planung und Umsetzung der nachgeordneten Ebenen konkret auf die Landbedeckung und Landnutzung aus. Die tatsächliche Nutzung der vorgegebenen Möglichkeiten bleibt den kommunalen Planungsträgern überlassen.



Der regionalplanerische Siedlungsraum, in dem sich die Siedlungsentwicklung der Städte und Gemeinden hauptsächlich vollzieht, setzt sich aus den in den Regionalplänen festgelegten Allgemeinen Siedlungsbereichen (ASB) und Bereichen für gewerbliche und industrielle Nutzungen (GIB) (einschließlich ASB und GIB für zweckgebundene Nutzung und GIB für flächenintensive Großvorhaben) zusammen.

In Bezug auf Klimaanpassung ist es dabei von zentraler Bedeutung, die Effizienz der Flächennutzung zu steigern und die Inanspruchnahme von Freiraum so gering wie möglich zu halten. Entsprechend wird die Entwicklung des regionalplanerisch festgelegten Siedlungsraums im Verhältnis zur Bevölkerungsentwicklung beurteilt.

Abbildung 102 zeigt insgesamt eine leichte Abnahme der ausgewiesenen Siedlungsfläche pro Einwohnerin bzw. Einwohner. Zurückzuführen ist dies auf den steigenden Bevölkerungsstand in NRW, welcher seit 2015 im Verhältnis schneller gewachsen ist, als der in den Regionalplänen zur Verfügung gestellte Siedlungsraum. Eine belastbare Trendberechnung ist aufgrund der kurzen Zeitreihe bisher nicht möglich.

Der regionalplanerisch definierte Freiraum

Abgesehen von Verkehrsbändern und einzelnen flächenhaften Infrastruktur-Festlegungen (zum Beispiel für Flughäfen), sind die übrigen Flächen von Nordrhein-Westfalen dem regionalplanerisch definierten „Freiraum“ zuzuordnen. Dieser setzt sich aus überwiegend agrarisch genutzten Offenlandbereichen, Waldbereichen und Wasserflächen zusammen. Dieser regionalplanerisch definierte „Freiraum“ wird teilweise durch unterschiedliche Schutzfunktionen, wie Bereiche zum Schutz der Natur, Bereiche zum Schutz des Grundwasser- und Gewässerschutzes, Überschwemmungsbereiche, oder Nutzungsfunktionen, wie Bereiche für die Sicherung und den Abbau oberflächennaher Bodenschätze, überlagert.

Auch kleinere Ortsteile unterhalb einer Größe von in der Regel 2.000 Einwohnerinnen und Einwohnern, die nicht als ASB festgelegt werden, liegen im regionalplanerisch definierten „Freiraum“. Gleiches gilt für viele in diesem Freiraum liegende Einzelbauwerke, insbesondere die nach § 35 Baugesetzbuch (BauGB) privilegierten Vorhaben, wie landwirtschaftliche Gehöfte oder auch Windparks und andere technische Einrichtungen der Ver- oder Entsorgung.



13. Stadtentwicklung und kommunale Planung

Das Handlungsfeld Stadtentwicklung und kommunale Planung ist ein Querschnittsthema, das durch seine Maßnahmen in verschiedene andere Handlungsfelder hineinwirken kann, wie beispielsweise „Menschliche Gesundheit“ (9), „Bauen und Wohnen“ (14) oder „Biodiversität und Naturschutz“ (6). Da gerade mit der Stadtentwicklung und kommunalen Planung oft Weichen für die nächsten Jahrzehnte und darüber hinaus geschaffen werden, müssen im Sinne einer vorausschauenden Planung bereits heute die Auswirkungen des Klimawandels, wie beispielsweise zunehmende Wärmebelastung und Starkniederschläge, berücksichtigt werden. Ziel der Stadtentwicklung und Stadtplanung muss es sein, die Lebensqualität der Einwohnerinnen und Einwohner NRWs sowohl in der Stadt als auch auf dem Land für die Zukunft attraktiv und lebenswert zu erhalten.



Auswirkungen des Klimawandels

Nordrhein-Westfalen ist das am dichtesten besiedelte Flächenland in Deutschland. Aufgrund des hohen Anteils an versiegelten Flächen insbesondere in den städtischen Gebieten ergeben sich aus dieser Dichte besondere Herausforderungen im Umgang mit den Folgen des Klimawandels. Dies gilt sowohl für die steigende Wärmeinselintensität in dicht besiedelten Bereichen aufgrund steigender Lufttemperaturen (vgl. „Lufttemperatur“) als auch für die steigende Überflutungsgefahr aufgrund von Stark- und Dauerregen (vgl. „Niederschlag“), beides verbunden mit erheblichen Gefahren für die Gesundheit der Bevölkerung (vgl. Handlungsfeld 9 „Menschliche Gesundheit“).



Indikatoren-Kernaussagen:

- Kühlung wird als städtebauliches Ziel immer wichtiger.
- Die großen Städte NRWs zeigen große Differenzen in der Erreichbarkeit ihrer städtischen Grünflächen.
- In hochverdichteten Städten haben gerade auch private Grünflächen eine hohe Bedeutung für die Naherholung.
- Jährlich sind im Schnitt 14,3 % der Siedlungsgebiete in NRW über eine Stunde von Starkregen der Unwetterwarnstufe 3 und höher betroffen.
- Das Bewusstsein zum Thema Klimaanpassung in Kommunen und Kreisen nimmt zu.



Tab. 15: Übersicht der Indikatoren zum Handlungsfeld 13 „Stadtentwicklung und kommunale Planung“

Indikator		Einheit	räumlicher Bezug	
13.1 Wärmeinsel-Intensität	mittel	Kelvin (K)	Aachen	
	maximum			
	mittel	Kelvin (K)	Bochum	
	maximum			
	mittel	Kelvin (K)	Bonn	
	maximum			
13.2 Erreichbarkeit von öffentlichen Grünflächen	mittel	Kelvin (K)	Köln	
	maximum			
	H1: 50.000 - 100.000 Einw.	% der Einw.	NRW	
	H1: > 100.000 - 250.000 Einw.			
	H1: > 250.000 Einw.	% der Einw.	NRW	
	H2: 50.000 - 100.000 Einw.			
13.3 Öffentliche und private Grünflächen	H2: > 100.000 - 250.000 Einw.	% der Einw.	NRW	
	H2: > 250.000 Einw.			
	öffentlich	Anteil in %	Herne	
	privat			
	teilweise öffentlich zugänglich			
	landwirtschaftlich			
	gesamt			
	öffentlich	Anteil in %	Nettetal	
	privat			
	teilweise öffentlich zugänglich			
	landwirtschaftlich			
	gesamt			
	öffentlich	Anteil in %	Oberhausen	
	privat			
	teilweise öffentlich zugänglich			
	landwirtschaftlich			
	gesamt			
	öffentlich	Anteil in %	Soest	
	privat			
	teilweise öffentlich zugänglich			
	landwirtschaftlich			
	gesamt			
13.4 Starkregen in Siedlungsgebieten	1 - 3 Stunden	Anteil der Siedlungsfläche mit Überschreitung der Starkregen-Warnstufe 3 (Unwetter) in %	NRW	
	> 3 - 6 Stunden			
	> 6 - 12 Stunden			
	> 12 - 24 Stunden			
13.5 Klimaanpassungskonzepte in Kommunen und Kreisen	Anzahl	Anteil in % und Anzahl	Kommunen	
	Anteil			
	Anzahl	Anteil in % und Anzahl	Kreise	
	Anteil			

- steigender Trend
 fallender Trend
 Trend mit Trendumkehr: zuerst fallend, dann steigend
 Trend mit Trendumkehr: zuerst steigend, dann fallend
 kein Trend

- günstige Entwicklung
 ungünstige Entwicklung
 keine Bewertung der Entwicklung möglich oder gleichzeitig günstige und ungünstige Entwicklungsaspekte vorhanden

	Zeitreihe	Mittelwert Zeitreihe *	Trend Zeitreihe	Änderung Zeitreihe	aktueller Stand *	Querbezüge zu anderen Handlungsfeldern
	2011 - 2020	4,5 7,4	~ ~	- -	- -	9 (S. 184), 14 (S. 248), 18 (S. 276)
	1997 - 2020	1,9 4,2	↗ ↗	+0,9 +1,4	- -	
	2006 - 2020	3,0 5,1	~ ~	- -	- -	
	2010 - 2020	4,4 7,6	↗ ↗	+1,8 +1,9	- -	
	Zensus 2011, ATKIS 2021	85,4 87,2 86,2	- - -	- - -	- - -	
	Zensus 2011, ATKIS 2021	93,1 95,0 92,0	- - -	- - -	- - -	6 (S. 130), 7 (S. 150), 9 (S. 184), 12 (S. 224), 14 (S. 248), 15 (S. 256)
	Stand 2017/2018	- - - - -	- - - - -	- - - - -	30,5 12,0 5,0 7,8 55,4	5 (S. 114), 6 (S. 130), 7 (S. 150), 8 (S. 166), 9 (S. 184), 14 (S. 248)
	Stand 2017/2018	- - - - -	- - - - -	- - - - -	25,5 4,0 1,9 47,2 78,6	
	Stand 2017/2018	- - - - -	- - - - -	- - - - -	24,8 12,4 16,5 4,5 62,1	
	Stand 2017/2018	- - - - -	- - - - -	- - - - -	11,4 0,4 1,3 67,0 84,3	
	2001 - 2020	6,8 6,3 1,2 0,1	~ ~ ~ ~	- - - -	- - - -	
	2013 - 2020	- -	↗ ↗	+47 +12	65 16	
	2013 - 2020	- -	↗ ↗	+6 +20	5 17	
						alle

* entsprechend der Aussage des Indiktors, wird entweder der Mittelwert über die
Zeitreihe oder der aktuelle Stand der letzten Erhebung angegeben



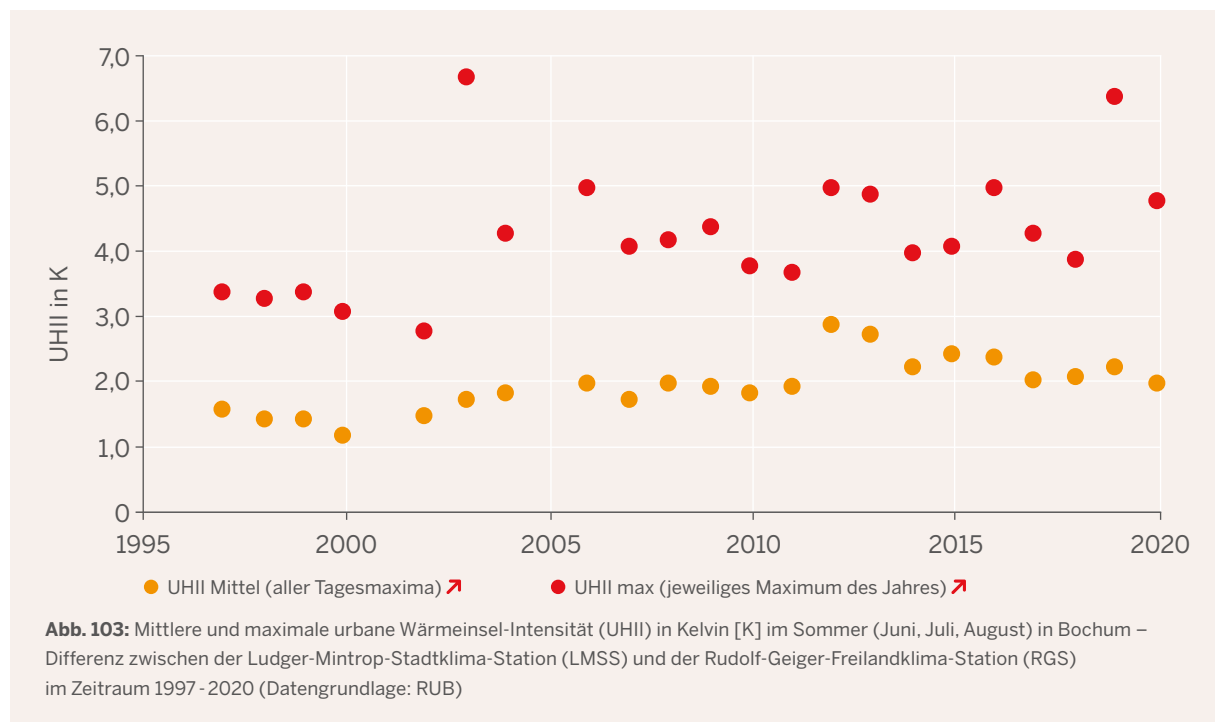
13.1 Wärmeinsel-Intensität

I

Kühlung als städtebauliches Ziel zunehmend wichtiger

Höhere Lufttemperaturen wirken sich negativ auf die menschliche Gesundheit aus. Vor allem während des Sommers können extreme Temperaturen hitzebedingte Belastungen und Krankheiten hervorrufen. Die Auswirkungen des Klimawandels in Städten als Aufenthaltsraum der Menschen stehen besonders

im Fokus. Städte sind stärker durch Hitze und höhere thermische Belastungen betroffen als das weniger dicht bebaute Umland – dieses Phänomen wird als städtische Wärmeinsel (Urban Heat Island = UHI), ihre Ausprägung als Urban Heat Island Intensity (UHII) bezeichnet.



Als Indikator wird die Intensität der städtischen Wärmeinsel im meteorologischen Sommer (Juni, Juli, August) verwendet. Die UHII ist die Lufttemperaturdifferenz zwischen der (überwärmten) Innenstadt und dem (möglichst unbeeinflussten) Umland. Zur Berechnung der

Lufttemperaturdifferenz werden Zeitreihen von zwei Stationen benötigt, wovon eine im städtischen Bereich, die andere im Umland liegen sollte. Hier wird als Beispiel die Entwicklung in der Stadt Bochum dargestellt.

Abbildung 103 zeigt, dass die mittlere und maximale sommerliche UHI über die Gesamtzeitreihe in Bochum angestiegen ist. Jahre mit besonders intensiven Sommern, wie 2003 oder 2019 (Indikator 1.2 „Durchschnittliche Jahreszeitenlufttemperatur“), treten darin durch die hohe maximale UHI deutlich hervor.

Drei weitere Stationen sind in Tabelle 15 aufgeführt. Während in Bochum und in Köln signifikant steigende Trends vorliegen, liegen für die Stationen in Aachen und Bonn keine signifikanten Trends vor. Dies zeigt, dass das Messnetz sowohl innerhalb dieser Städte als auch landesweit durch weitere Stationen ergänzt werden sollte, um die unterschiedliche Auswirkung verschiedener groß- und kleinräumiger Einflussfaktoren besser erfassen zu können.

Durch die Einordnung eines Stadtgebietes in verschiedene Klimatop-Typen können einerseits städtische Bereiche erfasst werden, die von Hitzesituationen besonders betroffen und damit anfälliger gegenüber klimawandelbedingten Temperaturerhöhungen sind. Andererseits lassen sich naturnahe Klimatope abgrenzen, die eine hohe klimaökologische Funktionalität besitzen und als Ausgleichsflächen für thermisch belastete Gebiete dienen. Am Beispiel von Bochum gibt Abbildung 104 eine Übersicht über die Verteilung der Klimatope und die Lage der verwendeten Stationen zur Auswertung der urbanen Wärmeinsel-Intensität.

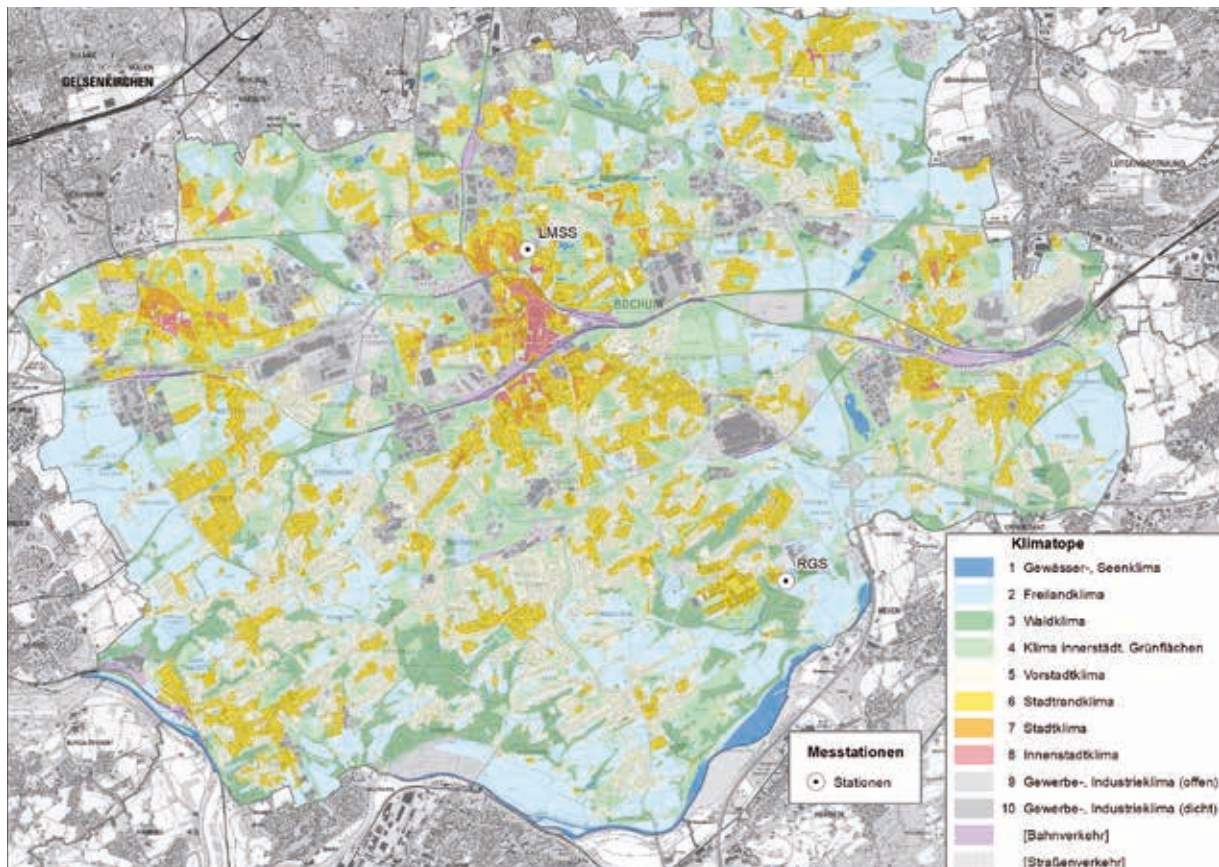


Abb. 104: Karte der Verteilung der Klimatope in Bochum und Lage der Messstationen Ludger-Mintrop-Stadtklima-Station (LMSS) und Rudolf-Geiger-Freilandklima-Station (RGS) (Datengrundlage: Geobasis NRW (Topografische Hintergrund-Karte), LANUV und RUB)

Maßnahmen zur Anpassung an urbane Hitzebelastung

Die Verdunstung von Wasser (direkt oder über die Blätter von Pflanzen) verbraucht Wärmeenergie und trägt so zur Abkühlung der Luft bei. Maßnahmen wie Fassaden- und Dachbegrünungen sowie der Erhalt oder die Neuanlage wohnungsnaher Parks, Grünanlagen oder Wasserflächen dienen daher nicht nur der Naherholung oder einer attraktiven Wohnumfeldgestaltung, sondern helfen auch, übermäßige Wärmebelastungen in Siedlungsbereichen zu vermindern. Bäume im Straßenraum können darüber hinaus die Hitzebelastung auch durch eine bessere Verschattung verringern und für eine Verbesserung der Luftqualität sorgen.

Auch (städtebauliche) Maßnahmen, wie die (teilweise) Entsiegelung und klimaangepasste Gestaltung vorhandener innerstädtischer Plätze, die Entsiegelung von großen Stellplatzflächen (Park-

platzflächen), die optimierte Ausrichtung von Gebäuden, die Verwendung heller Oberflächenmaterialien oder bauliche Maßnahmen zur Verschattung dienen dem Schutz vor Überwärmung von Siedlungsbereichen.

Darüber hinaus können technische Warnsysteme, zum Beispiel die NINA-Warn-App, auf ein erhöhtes Risiko während sommerlicher Hitzeperioden aufmerksam machen. Weitere Informationen zum hitzeangepassten Verhalten, beispielsweise über die Medien, unterstützen die Bevölkerung während Hitzeepisoden (Indikator 9.3 „Hitzewarnungen“).





13.2 Erreichbarkeit von öffentlichen Grünflächen



Erholungsflächen gewinnen als Oasen in der Sommerhitze an Bedeutung

Grün-, Wasser- und Freiflächen, die der Erholung dienen, steigern nicht nur die Wohn- und Aufenthaltsqualität von Stadtquartieren, sondern sind für eine aktive Freizeitgestaltung und Erholung im Freien und somit für die Gesundheitsvorsorge sehr wichtig. Besonders für weniger mobile Bevölkerungsgruppen sind Erholungsflächen in der direkten Wohnumgebung von großer Bedeutung. Durch die Verdunstung von Wasser wirken Bäume, Grün- und Wasserflächen außerdem lokal der Bildung von Hitzeinseln in dicht besiedelten Bereichen entgegen (vgl. Indikator 13.1 „Wärmeinsel-Intensität“). Ein direkter Zugang zu diesen Flächen ermöglicht außerdem eine Vermeidung von Freizeitverkehr und somit eine Reduktion von Umweltbelastungen.

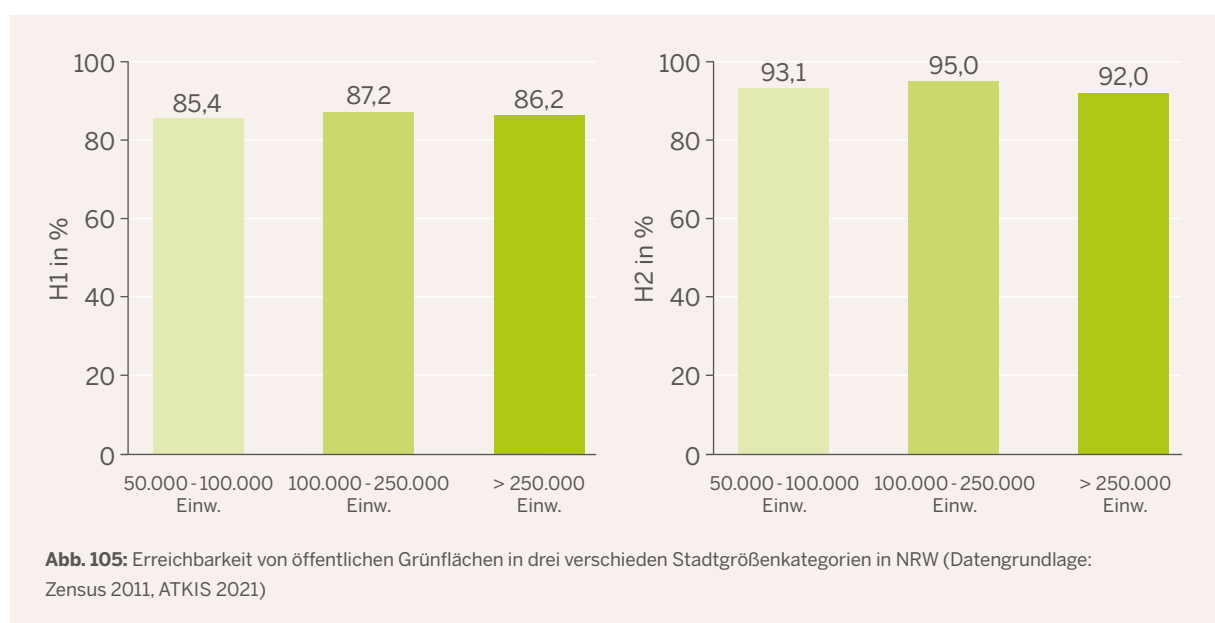
Es ist daher ein wichtiges Ziel der kommunalen Planung, allen Einwohnerinnen und Einwohnern den Zugang zu qualitativ gut ausgestatteten Erholungsflächen in ihrer unmittelbaren Wohnumgebung zu ermöglichen. Neben der Neuanlage von Erholungsflächen ist hierfür insbesondere im Bestand die Weiterentwicklung und Aufwertung bestehender Flächen von Bedeutung. Im Sinne der doppelten Innenentwicklung (Kühnau et al. 2016) sollten darüber hinaus auch bei allen Vorhaben zur baulichen Verdichtung zugleich Maßnahmen zum Erhalt und zur Qualifizierung des verbleibenden urbanen Grüns durchgeführt werden.



Der Indikator „Erreichbarkeit von öffentlichen Grünflächen“ stellt eine relative prozentuale Maßeinheit der Erreichbarkeit nahe gelegener städtischer Grünflächen für die Bevölkerung dar (Grunewald et al. 2016). Hierbei werden zwei Kategorien unterschieden: H1: nahe gelegene städtische Grünflächen mit einer Mindestgröße von einem Hektar und einer fußläufigen Distanz von maximal 10 bis 15 Minuten Gehzeit (300 m Luftliniendistanz) und H2: größere städtische Grünflächen mit einer Mindestgröße von 10 Hektar und einer maximalen Entfernung von 20 Minuten Fußweg (700 m Luftliniendistanz). Die öffentlichen Grünflächen umfassen Flächen, die der Freizeit und Erholung dienen: Grünanlagen und Parks, Friedhöfe, Wälder sowie Fließgewässer und Seen. Der Indikator berechnet sich aus dem Verhältnis der Einwohnerzahl mit Zugang zur jeweiligen Grünflächenkategorie innerhalb eines definierten Gebietes sowie der Gesamteinwohnerzahl dieses Gebietes.

Abbildung 105 zeigt für drei verschiedene Stadtgrößenkategorien NRWs den Anteil der Bevölkerung, die einen fußläufigen Zugang zu den öffentlichen Grünflächen hat. Im Mittel können in allen drei Stadtkategorien rund 85 bis 87 % der Einwohnerinnen und Einwohner in einer fußläufigen Distanz von maximal 10-15 Minuten eine städtische Grünfläche mit einer Mindestgröße von einem Hektar erreichen. Bei einer maximalen Gehzeit von 20 Minuten können je nach Stadtgröße im Mittel zwischen 92 und 95 % der Einwohnerinnen und Einwohner eine 10 Hektar große Erholungsfläche erreichen.

Bei Betrachtung der einzelnen Städte zeigt sich jedoch, dass es deutliche Unterschiede in der Erreichbarkeit der öffentlichen Grünflächen gibt (Abbildung 106). Während in einigen Städten deutlich über 90 % der Bevölkerung die öffentlichen Grünflächen unter den oben beschriebenen Voraussetzungen erreichen, sind es in anderen Städten nur zwischen 70 und 80 % der Einwohnerinnen und Einwohner.



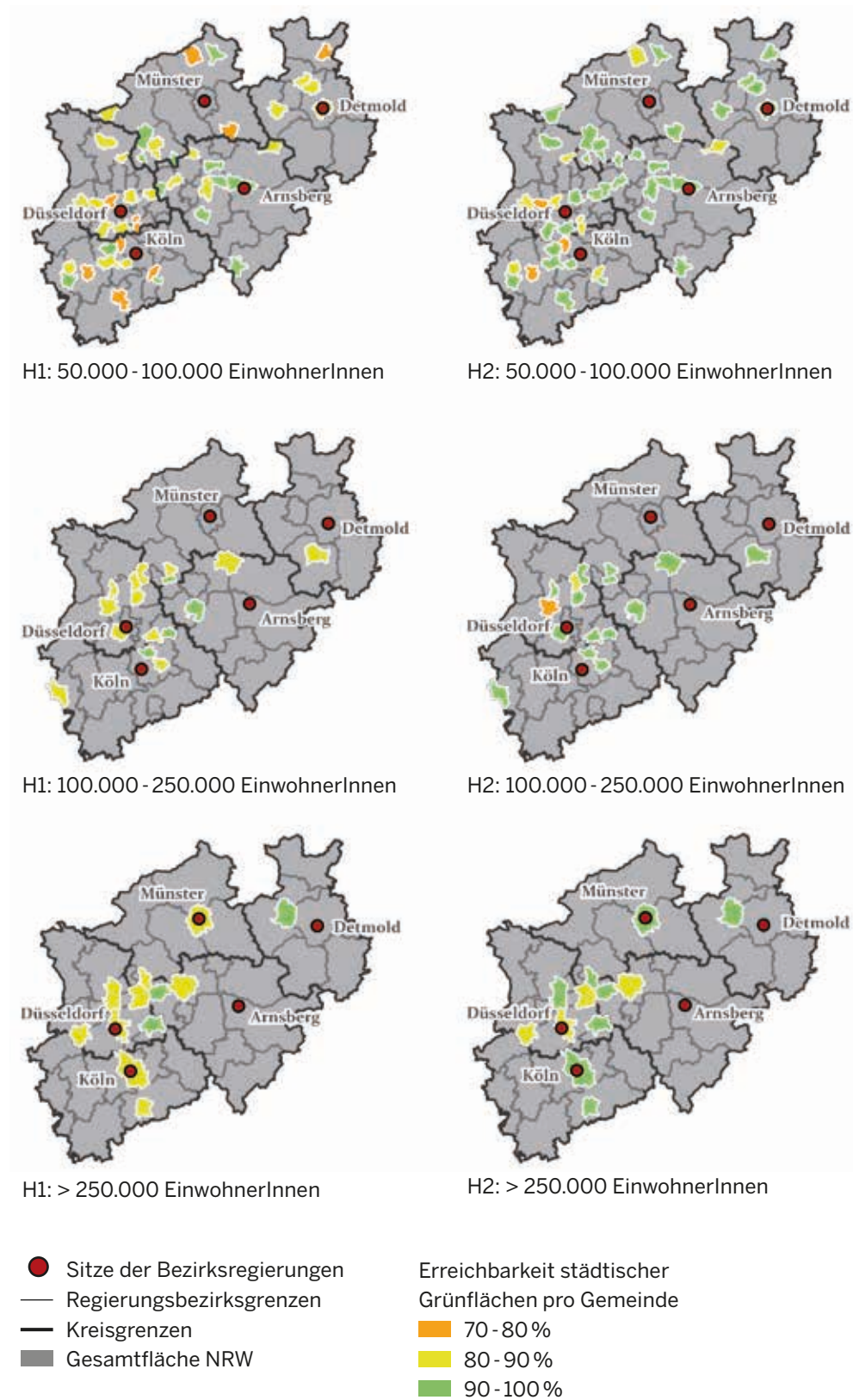


Abb. 106: Erreichbarkeit von öffentlichen Grünflächen für die einzelnen Städte in drei verschiedenen Stadtgrößenkategorien in NRW (Datengrundlage: Zensus 2011, ATKIS 2021)



13.3 Öffentliche und private Grünflächen



Parks sind gut fürs Klima – private Gärten auch!

Infolge des Klimawandels muss damit gerechnet werden, dass Extremwetterereignisse wie Hitzewellen und Starkregen häufiger und deutlich ausgeprägter auftreten werden. Öffentliche und private Grünflächen sind Bestandteil der „grünen Infrastruktur“ einer Stadt und tragen dazu bei, die Folgen dieser Extremwetterereignisse abzumildern. Auch dienen sie als Aufenthaltsraum für die Bevölkerung. Grünflächen können vor allem an Hitzetagen die Aufenthaltsqualität in einer Stadt deutlich verbessern und bieten gleichzeitig eine wichtige Grundlage für ein effizientes Regenwassermanagement.

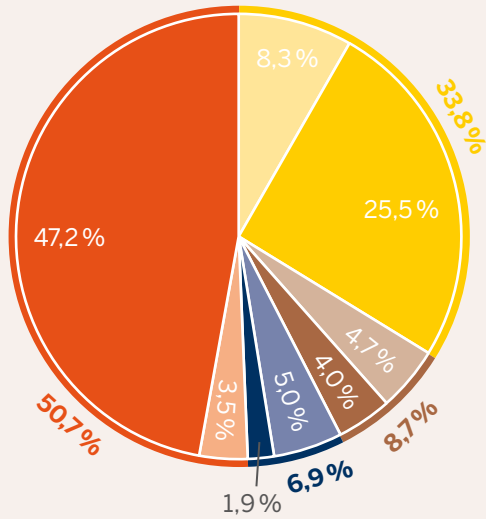
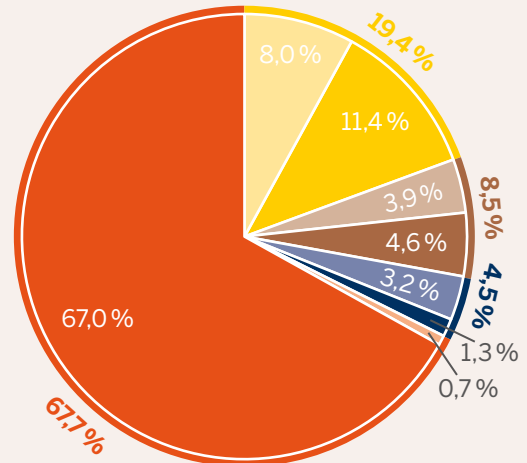
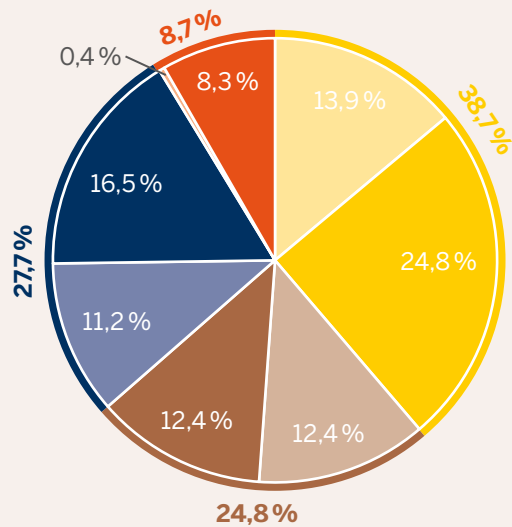
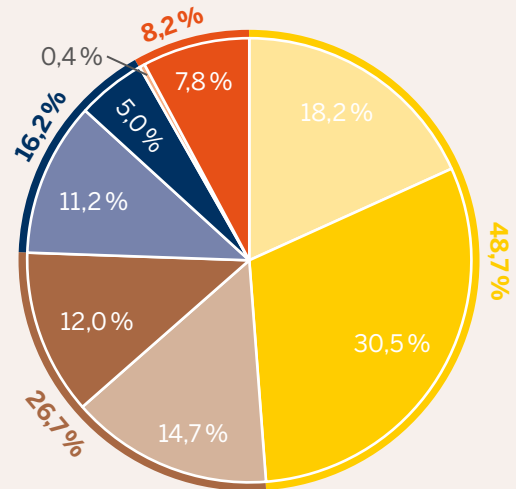
Zur Erfassung aller Grünflächen in vier Beispielstädten (Herne, Oberhausen, Nettetal und Soest) wurden Luftbilder, die alle einen Aufnahmezeitpunkt zwischen März 2017 und Juni 2018 abbilden, hinsichtlich des Vegetationsanteils in den Stadtgebieten ausgewertet. Die so erfassten Grünflächen wurden anhand des ALKIS-Flächennutzungsdatensatzes verschiedenen Flächennutzungen zugeordnet. Dadurch ist eine grobe Einschätzung möglich, welchen Anteil in einer Stadt öffentliche Grünflächen ausmachen, wie zum Beispiel Parks, und welcher Anteil beispielsweise in Wohnbereichen liegt und somit eher zum privaten Raum zu zählen ist. Dieser Indikator soll zukünftig alle fünf Jahre fortgeschrieben werden, um eventuelle Änderungen der Grünflächenanteile zu beobachten.

Der Gesamtvegetationsanteil spiegelt deutlich die Besiedlungsdichte der einzelnen Städte wider: Herne weist den geringsten Anteil mit 55,4 % auf, gefolgt von Oberhausen mit 62,1 % (Abbildung 107). Bei den kleineren Städten macht sich ebenfalls die Struktur be-



merkbar: Soest hat mit seiner kompakten Stadtstruktur mit umgebenden Landwirtschaftsflächen den höchsten Vegetationsanteil von 84,3 %, im Vergleich zu Nettetal mit 78,6 %.

In der Gegenüberstellung der Großstädte zu den Mittelstädten zeigt sich, dass die Bedeutung von privaten Grünflächen zunimmt: ca. 12 % private Grünflächen in den Großstädten gegenüber etwa 4 % in den Mittelstädten. Die teilweise öffentlich zugänglichen Flächen sind in den vier Städten sehr heterogen, auch was ihren Grünflächenanteil angeht. Der hohe Grünflächenanteil der Mittelstädte lässt sich auf den Anteil der landwirtschaftlichen Flächen begründen, der insbesondere in Soest mit 68 % sehr hoch ist.

Nettetal (Grünfläche gesamt: 78,6 %)**Soest** (Grünfläche gesamt: 84,3 %)**Oberhausen** (Grünfläche gesamt: 62,1 %)**Herne** (Grünfläche gesamt: 55,4 %)

öffentliche Flächen ohne Grünflächen
 öffentliche Grünflächen
 private Flächen ohne Grünflächen
 private Grünflächen

teilweise öffentlich zugängliche Flächen
 ohne Grünflächen
 teilweise öffentlich zugängliche Grünflächen
 landwirtschaftliche Flächen ohne Grünflächen
 landwirtschaftliche Grünflächen

Abb. 107: Flächennutzungsarten mit jeweiligem Anteil der Grünflächen in Nettetal, Soest, Oberhausen und Herne mit Stand 2017 - 2018 (Datengrundlage: Geobasis.NRW)

Gründachkataster

Öffentliche und private Grünflächen mildern negative klimatische Effekte ab, zum Beispiel Überhitzung und Starkregen. Nicht nur Gärten vor oder hinter dem Haus wirken durch Verdunstung, Versickerung und Regenwasserspeicherung positiv. Auch die Entsiegelung oder Begrünung von Stellplatzanlagen oder Restflächen, die Begrünung des Straßenraums (beispielsweise mit Baumalleen) oder die Begrünung von Dächern und Fassaden tragen zur Reduktion der Hitze in der Umgebung und im Gebäude bei.

Das flächendeckende Gründachkataster NRW (www.gruendachkataster.nrw.de, Abbildung 108) liefert für fast jede Dachfläche Informationen, ob die Dachfläche für eine Gründachnachrüstung geeignet ist und wenn ja, welche Vorteile damit verbunden sind und welche ungefähren Kosten eine Nachrüstung nach sich zieht (LANUV 2021b).

Eine Dachbegrünung bietet nicht nur den Bewohnern des begrünten Hauses Vorteile, zum Beispiel in Form von Wärmedämmung und Hitzeschutz, sondern auch der Umgebung. So wirken sie den städtischen Wärmeinseln entgegen. Sie haben das Potenzial bis zu 80 % des Jahresniederschlages

zurück zu halten und so durch die Verdunstung die Umgebungsluft abzukühlen. Zusätzlich liefern Gründächer damit während Starkregenereignissen einen zusätzlichen Speicherraum für Niederschlagswasser. Durch die Rückhaltung von Niederschlagswasser bei Starkregen erlassen viele Kommunen den Hauseigentümern sogar einen Teil der Niederschlagsgebühr. Die begrünten Dächer können ebenfalls Staub und Treibhausgase aus der Luft filtern und so die Luftqualität in der Umgebung verbessern. Weiterhin dienen sie der Biodiversität, in dem sie Insekten einen Lebensraum bieten.

Die etwa 11,3 Millionen Gebäude in NRW besitzen zusammen eine Dachfläche von etwa 1.380 Quadratkilometern. Die Potenzialberechnung im Gründachkataster NRW hat ergeben, dass hiervon etwa 440 Quadratkilometer für eine nachträgliche Dachflächenbegrünung sehr gut geeignet (0° bis 5° Dachneigung) bis noch geeignet (>10° bis 15° Dachneigung) sind. Das entspricht ungefähr der Fläche der Stadt Köln.



Abb. 108: Das Gründachkataster NRW im Fachinformationssystem Klimaanpassung (www.gruendachkataster.nrw.de) (LANUV 2021b)



13.4 Starkregen in Siedlungsgebieten

I

Starkregenereignisse sind in Raum und Intensität sehr variabel

Die zunehmende Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen (Indikator 2.4 „Niederschlagsextreme“) gehören zu den Folgen des Klimawandels. Sommerliche Starkregen, oft in Verbindung mit Gewittern, treten überall auf – eine räumliche Häufung der Starkregenereignisse wurde bislang nicht festgestellt. Aus diesem Grund besteht in allen Regionen Nordrhein-Westfalens das Risiko, von Starkregenereignissen betroffen zu sein (Winterrath et al. 2017).

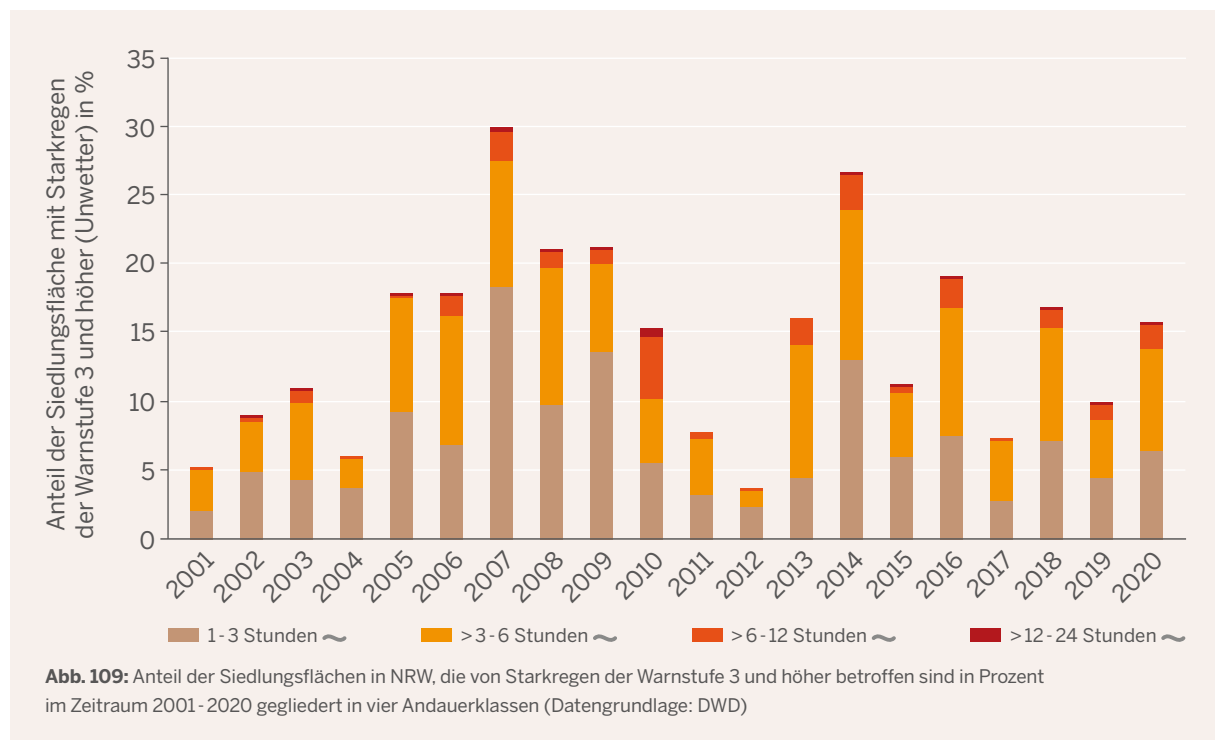
Trifft Starkregen Siedlungsgebiete, sind häufig Schäden an Gebäuden oder Infrastrukturen die Folge, darüber hinaus kann es – wie im Sommer 2021 (vgl.

Exkurs Indikator 17.2 „Elementarschäden“) – auch zu Todesfällen kommen. Auslöser sind vor allem:

- Treibgut, das zu Blockaden von Brücken, Unterführungen oder Kanalisationseinlässen führen kann;
- Wasserdruck, Nässe, Feuchtigkeit sowie Schadstoffe, die das Wasser mitführen kann (zum Beispiel Heizöl);
- die kinetische Energie des Niederschlagswassers.

Mit der Zunahme von Starkregenereignissen erhöht sich gleichzeitig die Gefahr von Schäden.





Der Indikator „Starkregen in Siedlungsgebieten“ zeigt den Anteil der jährlich von Starkregenereignissen betroffenen Siedlungsflächen in Nordrhein-Westfalen auf mit dem Ziel, Zu- und Abnahmen in der zeitlichen Entwicklung erkennbar zu machen. Der vorliegende Indikator bezieht sich auf mittels RADOLAN-Daten errechnete Starkregenstundensummen, die jeweils für ein Kalenderjahr bestimmt wurden. Berücksichtigung finden dabei unwetterartige Starkregenereignisse (Starkregen der Warnstufe 3 und höher: $\geq 25 \text{ l/m}^2$ in 1 Stunde oder $\geq 35 \text{ l/m}^2$ in 6 Stunden).

Räumliche Schwerpunkte entstehen dabei zufällig. Der Indikator bildet nicht ab, in welchen Gebieten Nordrhein-Westfalens künftig vermehrt Starkregenereignisse zu erwarten sind. Auch erlauben die Stundensummen in der vorliegenden Auswertungsform keine genaue Aussage darüber, wie viele Starkregenereignisse sich zu der jeweiligen Stundenzahl aufsummieren.

Insgesamt ist die Zeitreihe sehr großen Schwankungen ausgesetzt. Im Mittel waren über die gesamte Zeitreihe jährlich 14,3 % der Siedlungsgebiete in NRW über eine Stunde von Starkregen der Warnstufe 3 und höher betroffen (Abbildung 109). Die höchste Nieder-

schlagssumme bei einem Starkregenereignis wurde in NRW in den vergangenen Jahren in Münster gemessen: Dort fielen am 28. Juli 2014 in wenigen Stunden 292 l/m^2 Niederschlag. Das ist mehr als das Vierfache der durchschnittlichen Niederschlagsmenge im Monat Juli im Raum Münster und sorgte für erhebliche Überschwemmungen. Es bleibt bis zur Aktualisierung der Zeitreihe abzuwarten, wie stark sich das großräumige Starkregenereignis im Juli 2021 im südlichen Nordrhein-Westfalen auf die Werte im Jahr 2021 auswirkt (vgl. Exkurs Indikator 17.2 „Elementarschäden“).

Bisher lassen sich keine signifikanten Veränderungstrends der durch Starkregen der Stufe 3 betroffenen Siedlungsfläche über die Zeitreihe feststellen, weder für die Gesamtanzahl noch für die einzelnen Klassen. Das Jahr 2007 weist mit knapp 30 % den größten Anteil betroffener Siedlungsgebiete auf. Weite Teile des Ruhrgebiets waren 2007 von Starkregenereignissen betroffen. Auch das Jahr 2014 zeigt mit ca. 26 % betroffener Siedlungsfläche einen hohen Wert auf. Das rekordartige Starkregenereignis im Juli 2014 führte zu flächendeckenden Überschwemmungen im Münsterland und Teilen des Ruhrgebiets.

Maßnahmen zum Schutz gegen Starkregen

In Siedlungsbereichen müssen Flächen geschaffen werden, die im Starkregenfall das Wasser aufnehmen (Schwammstadt), um so den Siedlungsbereich vor großflächigen Überschwemmungen zu schützen. Daneben sollte versucht werden, das Wasser bei Starkregenereignissen aus dem Siedlungsbereich herauszuhalten, um das Kanalnetz nicht zu überlasten und es damit nicht zu Überflutungen kommen zu lassen.

Das heißt, es ist wichtig, dass es über das Siedlungsgebiet verteilte unversiegelte Flächen gibt, die zum einen zur Versickerung genutzt werden können, zum anderen aber auch als kurzzeitige Überflutungsflächen zur Verfügung stehen. Für diese Zwecke können beispielsweise Erholungs- und Freizeitflächen multifunktional genutzt werden.

Sind Überflutungen unvermeidbar, sollten Informationen vorliegen über potenzielle Überflutungsbereiche (natürliche und/oder bauliche Senken), kritische Objekte und Infrastrukturen, sowie spezielle Risikobereiche mit Gefahr für Menschenleben (Unterführungen, Tiefgaragen, Keller), die geschützt werden müssen. Kommt es zu Überflutungen, müssen potenzielle Fließwege bekannt sein, ggf. gesichert und durch bauliche Maßnahmen oder mobile Systeme so umgebaut werden, dass eine gezielte Abflussleitung zu Bereichen, die das Wasser versickern und/oder zwischenspeichern können, sichergestellt wird.

Neben den genannten Erholungs- und Freizeitflächen können hierfür auch städtische Plätze, öffentliche und private Stellplatzflächen als sogenannte Wasserplätze multifunktional zur Zwischenspeicherung genutzt werden. Wichtig ist, dass durch diese temporäre Überflutung kein neues beziehungsweise weiteres Gefahrenpotenzial entsteht.



Beim Objektschutz sind nicht nur kommunale und andere öffentliche Träger gefordert ihre Gebäude zu schützen, sondern auch die privaten Hauseigentümer sind zur Starkregenvorsorge aufgefordert. Sie können bereits während des Baus mit entsprechenden Maßnahmen für einen wirksamen Gebäudeschutz sorgen. Dazu zählen eine bauliche Umrandung oder Abschirmung von Lichtschächten und Kellerfenstern, eine Sicherung von Hof-/Hauseinfahrten durch Bodenschwellen oder mobile Schutzsysteme und der Einbau von Rückstauklappen zur Sicherung der Gebäude vor Rückstau und Wasseraustritt aus dem Kanalnetz.

Darüber hinaus können am Gebäude und/oder Grundstück Maßnahmen durchgeführt werden, die der Versickerung und Verzögerung des Abflusses dienen. Generell wirkt hier jede unversiegelte Fläche positiv. Auch kann das Wasser aus Regenrinnen gezielt einer Versickerungsmulde zugeführt oder in der klassischen Regentonnen gesammelt und so vom Kanalnetz abgekoppelt werden und dieses entlasten. Eine besonders hohe Wirkung erzielen Dachbegrünungen, da dort im Bodensubstrat Wasser gespeichert wird (vgl. Exkurs Indikator 13.3 „Öffentliche und private Grünflächen“).



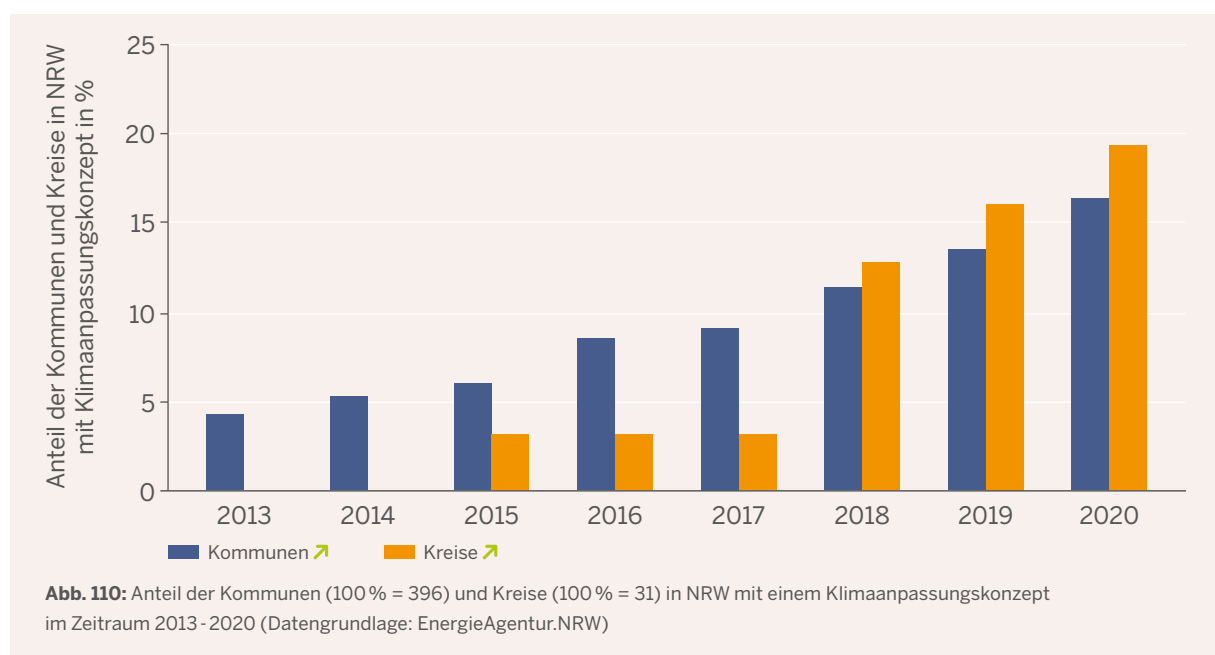
13.5 Klimaanpassungskonzepte in Kommunen und Kreisen



Immer mehr Klimaanpassungskonzepte in NRW

Um sich auf die Folgen des Klimawandels strategisch vorzubereiten, haben bereits einige Kommunen und Kreise in Nordrhein-Westfalen sogenannte „Klimaanpassungskonzepte“ erarbeitet. Diese Konzepte werden in der Regel integriert, das heißt unter Zusammenarbeit diverser Fachämter, erstellt. Das Vorhandensein eines Klimaanpassungskonzepts auf Ebene der Kommunen oder Kreise kann somit als Anzeiger für ein bestehendes Bewusstsein zum Thema Klimawandel und Klimaanpassung gewertet werden. Zwar gibt es Kommunen/Kreise, die sich mit dem Thema Klimaanpassung auseinanderset-

zen und sogar Maßnahmen umsetzen, nicht aber über ein Klimaanpassungskonzept (sondern ggf. über fachspezifische Pläne, wie Gefahrenabwehrpläne oder Starkregengefahrenkarten) verfügen. Letztere können allerdings mangels einer vollständigen Datenlage hier nicht dargestellt werden. Selbstverständlich ist klar, dass das Bestehen eines Klimaanpassungskonzepts zwar Anzeiger für ein fachübergreifendes Bewusstsein, nicht aber ein Garant für tatsächlich stattfindende Maßnahmen zur Klimaanpassung sein kann.



Die Anzahl der Klimaanpassungskonzepte in NRW-Kommunen steigt seit Beginn der Zählung 2013 statistisch signifikant an (Abbildung 110). Auch in den Kreisen ist ein steigender Trend feststellbar. 2020 verfügten 16,4 % der Kommunen in NRW, also 65 von insgesamt 396 Kommunen, über ein Klimaanpassungskonzept. Auf Kreisebene sind es sechs von 31 Kreisen (19,4 %).

Die Abbildung 110 umfasst alle Kommunen in NRW, die ein Konzept zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels besitzen. Dies umfasst sowohl geförderte Konzepte als auch Konzepte, die Kommunen einzig aus Eigenmitteln finanziert haben. Des Weiteren sind hier auch kombinierte „Integrierte Klimaschutz- und Klimaanpassungskonzepte“ berücksichtigt. Bis zum Herbst des Jahres 2018 war es möglich, dass sich Kommunen über die Kommunalrichtlinie der NKI (Nationale Klimaschutz Initiative) des BMU ein „Klimaschutz-

Teilkonzept zur Klimafolgenanpassung“ anteilig fördern lassen konnten. Der überwiegende Teil der in Abbildung 110 aufgeführten Konzepte entstammt diesem Förderprogramm.

Die stetige Zunahme von Klimaanpassungskonzepten in den Kommunen und Kreisen NRWs lässt auf ein steigendes Bewusstsein gegenüber den Erfordernissen und Handlungsoptionen zur Klimaanpassung in NRW schließen. Waren es 2013 noch 17 Kommunen und kein Kreis, die ein Klimaanpassungskonzept hatten, so sind es heute jede sechste Kommune bzw. jeder fünfte Kreis, die über ein Klimaanpassungskonzept verfügen. Trotz dieser positiven Entwicklung besteht nach wie vor Sensibilisierungs- und Unterstützungsbedarf, um das Bewusstsein um die Integrationserfordernisse der Klimaanpassung in kommunale und regionale Entscheidungsprozesse weiter zu steigern.

Bund fördert wieder kommunale Anpassungskonzepte

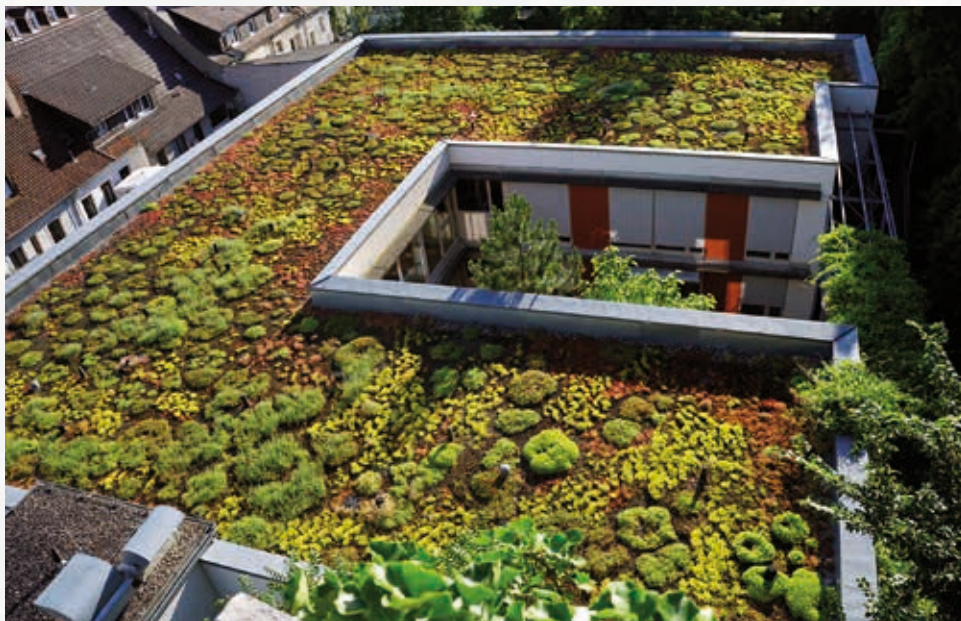
Mit der Veröffentlichung der Novellierung des DAS-Programmes im September 2021 wird die Erstellung von kommunalen Klimaanpassungskonzepten ab Ende 2021 wieder förderfähig sein. Dabei werden analog zum Vorgehen im Klimaschutz zunächst KlimaanpassungsmanagerInnen für zwei Jahre gefördert, die in diesem Zeitraum ein Nachhaltiges Anpassungskonzept (Erstvorhaben) erstellen sollen. Im Rahmen eines Anschlussvorhabens, welches über drei weitere Jahre gefördert wird, sollen die KlimaanpassungsmanagerInnen die Umsetzung dieser Konzepte begleiten. Ergänzend dazu wird zukünftig in diesem Rahmen auch die Förderung einer ausgewählten Klimaanpassungsmaßnahme möglich sein.

Die Förderung des Anschlussvorhabens ist auch für bereits früher erstellte Klimaanpassungskonzepte möglich, welche in anderem Rahmen oder in Eigenregie entstanden sind. Mit Start dieser Förderung ist zu erwarten, dass viele weitere Kommunen, auch aus Nordrhein-Westfalen, die Möglichkeit wahrnehmen werden in den Prozess der Klimafolgenanpassung einzusteigen, wodurch die Anzahl der Kommunen mit Klimaanpassungskonzept (und ManagerIn) in NRW weiter stetig zunehmen wird. Insbesondere Landkreise werden mit der neuen Förderung dazu aufgerufen hier aktiv zu werden.



14. Bauen und Wohnen

Der Gebäudebestand in Nordrhein-Westfalen ist in vielfältiger Weise vom Klimawandel betroffen: Lang anhaltende Hitzewellen im Sommer, zunehmender Starkregen und Überschwemmungen sowie Extremwetter mit Hagel und Sturmböen können die Substanz und Funktionsfähigkeit von Gebäuden beeinträchtigen. Wichtig ist daher, die Gebäude resilienter zu gestalten und gleichzeitig die Wohn- und Aufenthaltsqualität zu erhalten oder zu verbessern.



Auswirkungen des Klimawandels

Infolge der zunehmenden Anzahl warmer Temperaturkentage (Indikator 1.4 „warme Kentage“) wächst die Hitzebelastung der Menschen in Wohn- und Arbeitsstätten. Erschwerend kommt hinzu, dass Wohn- und Bürogebäude aufgrund der meist begleitenden verkürzten nächtlichen Abkühlung nur bedingt auskühlen können. Das führt zu einer Beeinträchtigung der Funktionalität der Gebäude und zu einer Verringerung der Aufenthaltsqualität.

Daneben können Extremereignisse zu Schäden an Gebäuden führen. Trockenheit führt zum Absinken des Grundwasserspiegels und des Bodenwassergehaltes. Infolge treten häufig Sackungsprozesse auf, die zu Gebäude- und Bauwerksschäden führen können.

Auch durch Stark-/Extremregen (Indikatoren 2.4 „Niederschlagsextreme“ und 13.4 „Starkregen in Siedlungsgebieten“) können – wie aktuell im Sommer 2021 in der Eifel und im Ruhrgebiet passiert (vgl. Exkurs Indikator 17.2 „Elementarschäden“) – nicht nur Schäden an Gebäuden und an der Infrastruktur entstehen, sondern auch Menschen zu Tode kommen. Starkregenerereignisse in versiegelten städtischen Bereichen lösen oftmals „urbane Sturzfluten“ aus und führen zu überlasteten Entwässerungssystemen. Die zunehmenden Windgeschwindigkeiten führen zu höheren Schäden an Bauwerken, wie beispielsweise Dachschäden, und gleichzeitig steigt das Gefährdungspotenzial für Bewohnerinnen und Bewohner sowie anderer Personen im Umfeld dieser Bauwerke (UBA 2019a).

Indikatoren-Kernaussagen:

- Die Zahl der Tage, an denen geheizt werden muss, nimmt ab.
- Die Zahl der Tage, an denen gekühlt werden muss, nimmt zu.


Tab. 16: Übersicht der Indikatoren zum Handlungsfeld 14 „Bauen und Wohnen“

Indikator	Einheit	räumlicher Bezug	Zeitreihe
14.1 Jahresheizgradtage	Kelvin x Tag	Essen-Bredeney	2010 - 2020
	Kelvin x Tag	Köln-Stammheim	2010 - 2020
	Kelvin x Tag	Köln/Bonn	2010 - 2020
	Kelvin x Tag	Lennestadt-Theten	2010 - 2020
14.2 Jahreskühlgradtage	Kelvin x Tag	Essen-Bredeney	1935 - 2020
	Kelvin x Tag	Köln-Stammheim	1946 - 2020
	Kelvin x Tag	Köln/Bonn	1958 - 2020
	Kelvin x Tag	Lennestadt-Theten	1963 - 2020

steigender Trend

fallender Trend

Trend mit Trendumkehr: zuerst fallend, dann steigend

Trend mit Trendumkehr: zuerst steigend, dann fallend

kein Trend



günstige Entwicklung

ungünstige Entwicklung

keine Bewertung der Entwicklung möglich oder gleichzeitig günstige und ungünstige Entwicklungsaspekte vorhanden

	Mittelwert Zeitreihe	Trend Zeitreihe	Änderung Zeitreihe	Mittelwert der Klimanormalperioden						Querbezüge zu anderen Handlungsfeldern
				1941-1970	1951-1980	1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2020	
	3.194	↘	-620	-	-	-	-	-	-	16 (S. 262), 18 (S. 276)
	2.842	~	-	-	-	-	-	-	-	
	3.118	↘	-592	-	-	-	-	-	-	
	3.765	↘	-540	-	-	-	-	-	-	
	55	↻	+43	-	40	44	53	61	73	9 (S. 184), 12 (S. 224), 13 (S. 230), 16 (S. 262), 18 (S. 276)
	87	↻	+72	-	65	69	77	91	114	
	81	↗	+69	-	-	64	73	85	100	
	57	↗	+45	-	-	-	53	62	69	



14.1 Jahresheizgradtage

I

Wärmere Temperaturen verkürzen die Heizperiode

Die rapide ansteigenden Mitteltemperaturen global und auch in Nordrhein-Westfalen sorgen nicht nur für extremere Hitzewellen, sondern auch für insgesamt wärmere Winter (Indikatoren 1.2 „Durchschnittliche Jahreszeitenlufttemperatur“ und 1.3 „Temperaturkenntage kalt“). Zumindest bei den Energiever-

bräuchen für das Heizen wirken sich die wärmeren Winter positiv aus. Durch den Impact-Indikator der Jahresheizgradtage kann für ausgewählte Messstationsstandorte berechnet werden, in welchen Jahren hohe oder niedrige Heizbedarfe aufgetreten sind.

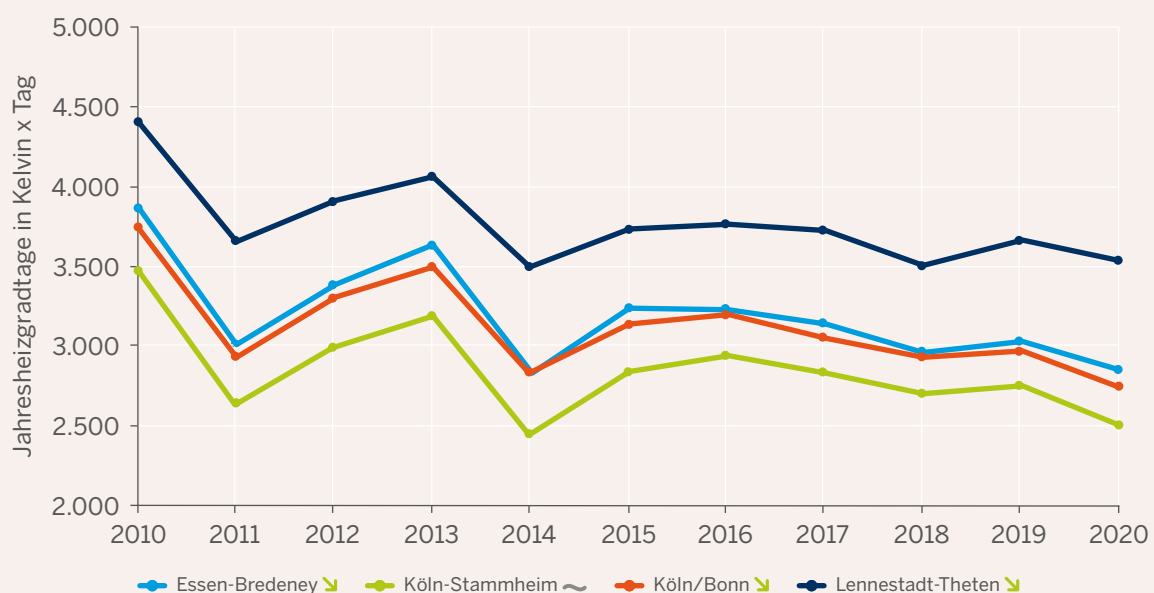


Abb. 111: Jahressummen der monatlichen Heizgradtage an den Klimastationen Essen-Bredeney, Köln/Bonn, Köln-Stammheim und Lennestadt-Theten für den Zeitraum 2010 - 2020 (Datengrundlage: DWD)

Der Indikator „Jahresheizgradtage“ stellt die pro Jahr aufsummierten monatlichen Heizgradtage nach VDI 3807 dar. Die Heizgradtage beziehen sich auf die Raumtemperatur 20 °C. Die Heizgradtage werden als Temperaturdifferenz zwischen der Raumtemperatur und der Tagesmitteltemperatur berechnet. Dabei werden nur die Tage gezählt, an denen das Tagesmittel der Außentemperatur kleiner als 15 °C (Heiztag) beträgt. Die Heizgradtage werden als Jahressumme in der Einheit Kelvin x Tag angegeben (DWD 2019).

In Abbildung 111 sind die Zeitreihen der Jahressummen der Jahresheizgradtage von vier verschiedenen Beispielstationen aus Nordrhein-Westfalen dargestellt. Die Trendberechnung zeigt für die Stationen Essen-Bredeney, Köln/Bonn und Lennestadt-Theten signifikant fallende Trends. Auffällig sind besonders die Jahre 2011, 2014 und 2020, die bei allen Stationen jeweils einen lokalen Tiefstwert darstellen. Die signifikant nega-

tiven Trends bei den Jahressummen der Heizgradtage haben zur Folge, dass Energie für Wärme eingespart wird. Dennoch liegt gerade bei der Wärmeversorgung noch erhebliches Einsparpotenzial bei den Treibhausgasemissionen. Entlang einer linearen Trendgeraden von 2010 bis 2020 sind die Jahressummen der Heizgradtage in Essen-Bredeney um rund 620 Heizgradtage abgesunken, wenn man Anfangs- und Endwert der Trendgeraden vergleicht. An der Station Köln/Bonn liegt der Rückgang bei rund 592 Heizgradtagen und bei der Station Lennestadt-Theten liegt ein Rückgang um rund 540 Heizgradtagen vor. Die Winter von 2010 und 2013 stechen am Anfang der Zeitreihe deutlich heraus. Besonders kalte Winter bleiben auch im Zeitalter rasanter Temperaturanstiege auch gerade als Folge des Klimawandels wahrscheinlich. Durch den sich abschwächenden Jetstream können jederzeit in der Heizperiode intensive Kälteeinbrüche auftreten.

Vergleicht man die Zeitreihen der vier Stationen miteinander, so sticht die Station Köln-Stammheim mit der geringsten Anzahl an Jahresheizgradtagen heraus. Hier macht sich die recht zentrale städtische Lage in Köln bemerkbar. Dem Gegenüber ist die Anzahl an Jahresheizgradtagen im ländlichen Lennestadt-Theten, gelegen im Sieger- und Sauerland, erwartungsgemäß am höchsten. Die Messreihen aus Köln/Bonn und der etwas höher gelegenen Station in Essen-Bredeney liegen dazwischen, was an einer ähnlichen Lage im Außenbereich liegt. Die Mittelwerte 2010 - 2020 sind ein weiterer Beleg für die unterschiedlichen, standortbedingten Wärmebedarfe der jeweiligen Stationen. So hat Essen-Bredeney einen Mittelwert von rund 3.194 Jahresheizgradtagen, Köln/Bonn rund 3.118, Köln-Stammheim rund 2.842 und Lennestadt-Theten rund 3.765 Jahresheizgradtage.





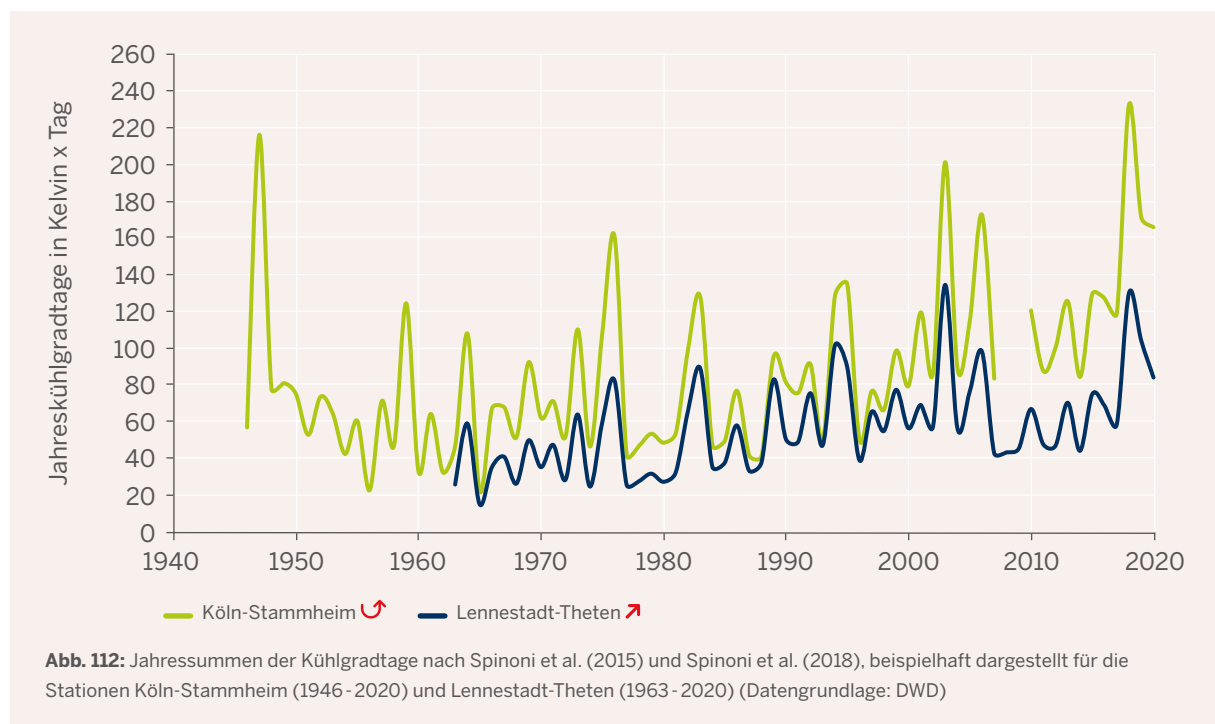
14.2 Jahreskühlgradtage

I

Hitzewellen werden häufiger und intensiver,
der Bedarf nach Klimatisierung steigt

Durch die anthropogene Erderwärmung sind analog zu den stark angestiegenen Jahresmitteltemperaturen auch die Anzahlen der warmen Temperaturkenn-tage (Indikatoren 1.2 „Durchschnittliche Jahreszei-enlufttemperatur“ und 1.4 „Temperaturkenn-tage warm“) gestiegen. Dies gilt für die Heißen Tage ($T_{\max} \geq 30^\circ\text{C}$), Sommertage ($T_{\max} \geq 25^\circ\text{C}$) und

die Tropennächte ($T_{\min} \geq 20^\circ\text{C}$). Angesichts des derzeit stattfindenden starken Erwärmungstrends wird der Kühlbedarf in den Gebäuden vor allem in Ballungsgebieten weiter ansteigen. Mithilfe der Jahreskühlgradtage als Impact-Indikator kann eine Aussage über die Veränderung des Kühlbedarfs gemacht werden.



Um die zeitliche Entwicklung des Kühlenergiebedarfs während der Sommermonate abschätzen zu können, wird die fiktive Größe der Jahreskühlgradtage eingesetzt. Die Berechnung der Jahreskühlgradtage erfolgt nach dem Ansatz von Spinoni et al. (2015) und Spinoni et al. (2018) und basiert auf dem Schwellenwert bzw. einer Basistemperatur von 22°C . Die Höhe der Über-

schreitung dieser Temperatur wird für alle Tage eines Jahres in gewichteter Form aufsummiert (Jahreskühlgradtage). Genau wie bei den bereits in Indikator 14.1 dargestellten Jahresheizgradtagen werden die Jahreskühlgradtage in Kelvin x Tag als Einheit angegeben. Die in Abbildung 112 dargestellten Zeitreihen zeigen aus Gründen der Übersichtlichkeit zwei von vier als Indikator

verwendeten Stationsauswertungen. Alle vier Zeitreihen sind unter www.klimafolgenmonitoring.nrw.de einsehbar.

Abbildung 112 stellt die Entwicklung der Jahreskühlgradtage der urbanen Station Köln-Stammheim für den Zeitraum 1946 - 2020 sowie der ländlichen, im Mittelgebirge gelegenen Station Lennestadt-Theten für den Zeitraum 1963 - 2020 dar. Über den gesamten Zeitraum liegt der Mittelwert der Jahreskühlgradtage hier bei rund 57 Kelvin x Tag. In Köln-Stammheim liegt der Mittelwert der gesamten Zeitreihe bei rund 87 Kelvin x Tag, also deutlich höher. Die Lage in der größten Stadt NRWs und der gleichzeitig wärmesten Region in NRW (Indikator 1.1 „Durchschnittliche Jahreslufttemperatur“), der Niederrheinischen Bucht, wirkt sich somit mit deutlich höheren Werten bei den Jahreskühlgradtagen aus. Die

hier dargestellten Zeitreihen der Jahreskühlgradtage weisen statistisch signifikant zunehmende Trends auf, wobei der von Köln-Stammheim durch die längere Zeitreihe und einiger hoher Werte in den 40-er Jahren quadratisch ausfällt, nämlich zuerst leicht fallend und dann steigend. Zwischen dem Anfangs- und dem Endwert dieser Entwicklung weist die Station Köln-Stammheim einen Anstieg von 72 Kühlgradtagen auf. Entlang der linearen Trendgeraden von Lennestadt-Theten stiegen die Kühlgradtage im Zeitraum 1963 - 2020 um rund 45 Tage x Kelvin an. Besonders hohe Summen an Kühlgradtagen sind in Jahren mit deutlichen Hitzewellen festzustellen. In der längeren Zeitreihe von Köln-Stammheim sind dies die Jahre 1947, 2003, 2006 und 2018. In der kürzeren Zeitreihe Lennestadt-Theten sind dies die Jahre 1994, 2003, 2006 und 2018.

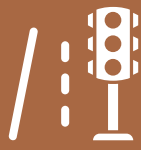
Fördermittel für klimawandelangepasstes Bauen

Um den Folgen des Klimawandels und insbesondere der zunehmenden sommerlichen Überwärmung zu begegnen, werden in den letzten Jahren verstärkt Maßnahmen wie die Ertüchtigung von Dämm- und Sonnenschutzsystemen, aber auch die Begrünung von Gebäuden sowie des Gebäudeumfelds durchgeführt. Viele dieser Maßnahmen dienen dabei nicht nur der Klimaanpassung, sondern auch dem Klimaschutz.

Die Umsetzungsförderung dieser Maßnahmen wird seit einigen Jahren zunehmend in verschiedenen Förderprogrammen des Bundes und des Landes integriert. So werden diese Themen zum Beispiel in der Städtebauförderung als Fördergrundsatz formuliert. Daneben sind aber auch Maßnahmen wie Dach- und Fassadenbegrünungen sowie Begrünungen bzw. Entsiegelungen des Wohnumfelds im Rahmen der Wohnraumförderung Nordrhein-Westfalens förderfähig und werden mit besonderen und erhöhten Förderanreizen unterstützt. Auch wird das Stadtklima positiv über das Förderprogramm „Grüne Infrastruktur“ des Landes Nordrhein-Westfalen beeinflusst. Verschiedene Städte in Nord-

rhein-Westfalen stellen außerdem städtische Förderprogramme (finanziert aus Eigenmitteln) auf, für beispielsweise Dach- und Fassadenbegrünungen (Düsseldorf oder Detmold) oder aber Reduzierungen der Niederschlagswassergebühren für entsiegelte Grundstücksflächen (zum Beispiel Dortmund).

Die bis 2021 gültige KfW-Förderung sowie die neu eingeführte Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) zielt zwar in erster Linie auf die energetische Optimierung von Gebäuden bzw. auf den energieeffizienten Neubau ab. Diese Förderprogramme haben jedoch neben der Reduzierung des CO₂-Ausstoßes immer auch indirekte positive Effekte hinsichtlich der Klimaanpassung – so wirkt sich beispielsweise eine effiziente Dämmung nicht nur günstig auf den Energiebedarf für Heizung und Kühlung aus, sondern sorgt auch unmittelbar für ein kühleres Raumklima an heißen Tagen. Durch die Berücksichtigung von Klimaschutz und Klimaanpassung als Querschnittsthemen in einer Vielzahl von Programmen wird so eine größere Breitenwirkung in der Umsetzung erreicht – mit positiven Wirkungen auch auf das lokale kleinräumige Klima.



15. Verkehr und Verkehrsinfrastruktur

Eine funktionierende Verkehrsinfrastruktur ist für Nordrhein-Westfalen besonders wichtig, da hiervon viele andere gesellschaftliche Bereiche abhängig sind. Der Verkehrssektor ist jedoch verschiedenen witterungsbedingten Risiken ausgesetzt und kann dadurch in seiner Leistungsfähigkeit zeitweilig beeinträchtigt werden.



Indikatoren-Kernaussagen:

- Extremwetterereignisse stellen eine Herausforderung für den Schienenverkehr dar.

Auswirkungen des Klimawandels

Durch die veränderten klimatischen Bedingungen können häufiger Extremwetterereignisse wie Stürme, Starkregen oder Hitze auftreten. Diese können zu Schäden an der Verkehrsinfrastruktur und der Unpassierbarkeit von Verkehrswegen führen, wie beispielsweise durch Überschwemmungen und Unterspülungen von Straßen und Schienen bei Starkregen oder dem Ausdehnen und Aufwölben, dem sogenannten „Blow-Up“, der Fahrbahn durch Hitze.

Zudem besteht die Gefahr eines erhöhten Unfallrisikos, wenn die Konzentrationsfähigkeit der Fahrer bei Hitze oder die Sicht durch Starkregen eingeschränkt ist. Im Winter hingegen könnten die Unfallzahlen bei weniger Tagen mit Schnee und Eis auf den Verkehrswegen zurückgehen.

Verkehrlich bedeutsam ist in NRW zudem der Schienenverkehr, der in verschiedener Hinsicht durch den Klimawandel anfällig ist, wie beispielsweise durch umstürzende Bäume bei Windwurf oder dem Ausfall von Klimaanlagen während Hitzeperioden.

Tab. 17: Übersicht der Indikatoren zum Handlungsfeld 15 „Verkehr und Verkehrsinfrastruktur“

Indikator		Einheit	räumliche Einheit	Zeitreihe	Mittelwert Zeitreihe	Trend Zeitreihe	Änderung Zeitreihe	Querbezüge zu anderen Handlungsfeldern
15.1 Witterungsbedingte Störungen der Schieneninfrastruktur	Blitz	Anzahl	NRW	2018-2020	44	–	–	9 (S. 184), 10 (S. 206), 16 (S. 262), 17 (S. 266), 18 (S. 276), 19 (S. 288)
	Hitze	Anzahl	NRW	2018-2020	109	–	–	
	Böschungsbrand	Anzahl	NRW	2018-2020	44	–	–	
	Vegetation	Anzahl	NRW	2018-2020	55	–	–	
	Winter	Anzahl	NRW	2018-2020	7	–	–	
	Gleisunter-/Gleisüberspülung	Anzahl	NRW	2018-2020	3	–	–	
	sonstiges	Anzahl	NRW	2018-2020	130	–	–	
	gesamt	Anzahl	NRW	2018-2020	393	–	–	



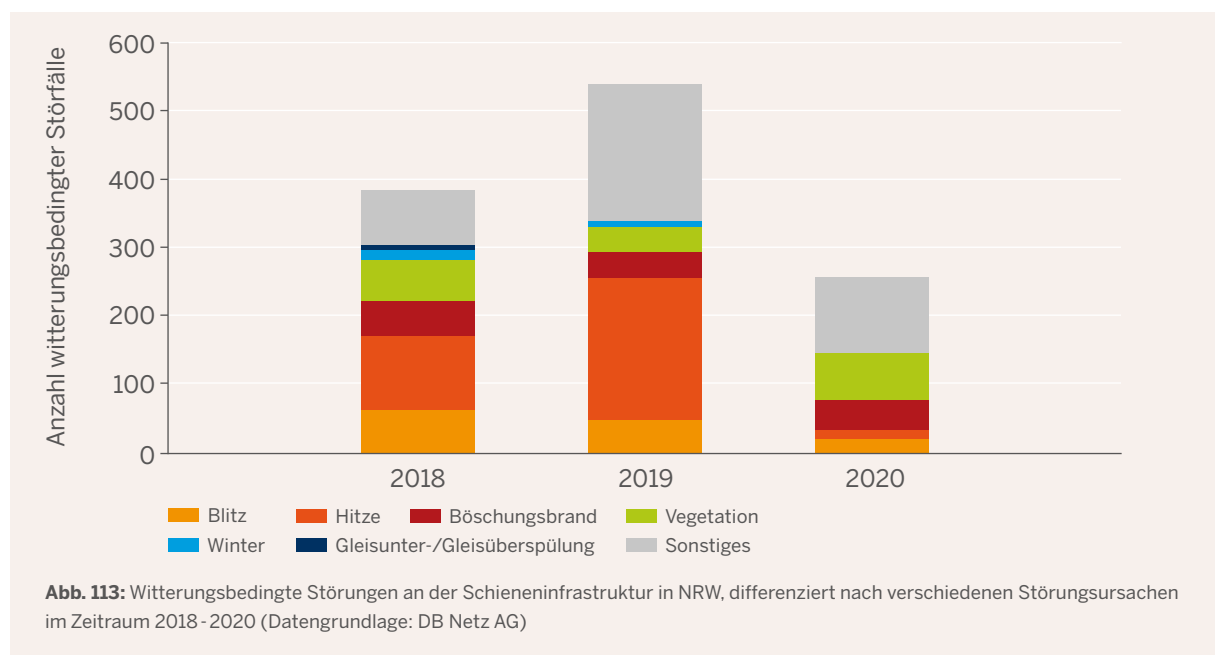
15.1 Witterungsbedingte Störungen der Schieneninfrastruktur

I

Wetterextreme halten die Bahn auf Trab

Die Schiene ist ein wichtiger Verkehrsträger in NRW. Viele Menschen sind auf dem Weg zur Arbeit auf S-Bahn, Regionalverkehr oder Fernzüge angewiesen. Störungen und Zugausfälle können so vor allem für Pendlerinnen und Pendler zum Ärgernis werden. Aufgrund häufigerer Extremwetterereignisse wie Stürme, Hagel sowie Hitze und Trockenheit könnte es künftig vermehrt zu witterungsbedingten Beeinträchtigungen im Schienenverkehr kommen. Umge-

stürzte Bäume auf dem Gleisbett, Störungen der Oberleitung oder der Ausfall von Klimaanlagen sind hier als mögliche Störungen zu nennen. Böschungsbrände in den Sommermonaten können zu kurzfristigen Sperrungen der Gleise für Löscharbeiten führen. Hochwasser und Starkregen können Gleise unter- oder überspülen. Und auch Blitzschläge sowie winterliche Witterungsbedingungen können Probleme für den Schienenverkehr mit sich bringen.



Der vorliegende Indikator nimmt die witterungsbedingten Störungen an der Schieneninfrastruktur in den Fokus. Hierfür wird zwischen verschiedenen Störungsursachen unterschieden. Die Ursache Blitz meint einen Blitzeinschlag in die Oberleitung, in einen Bahnüber-

gang oder in Leit- und Sicherungstechnik. Durch länger anhaltende Hitzeperioden kann sich thermisch bedingt die Gleislage ändern. Zusätzlich kann es auch zu Ausfällen bei der Leit- und Sicherungstechnik kommen. Böschungsbrände sind überwiegend eine Folge von

hitzebedingter Trockenheit. Die Ursache Vegetation beinhaltet sturmbedingte Störungen durch Äste oder ganze Bäume auf den Gleisen oder in der Oberleitung. Im Winter kann es zu Ausfällen durch Schneeverwehungen, zu kältebedingten Störungen von Leit- und Sicherungstechnik oder Eiszapfenbildung an baulichen Anlagen kommen. Ebenso sind in der kalten Jahreszeit Störungen durch Eis und Schnee an Bahnübergängen, Spurrillen, Weichen oder Oberleitungen möglich. Starkniederschläge oder langanhaltende Niederschläge können Gleisunter-/Gleisüberspülungen verursachen. Unter Sonstiges werden sonstige witterungsbedingte Störungen von Gleisen, Oberleitungen, Leit- und Sicherungstechnik, Weichen oder Fahrzeugen gezählt. Auch Bauarbeiten, die durch witterungsbedingte Störungen erforderlich wurden, oder kritische Wettersituationen, die den sicheren Zugverkehr verhindern, zählen dazu.

Aus der noch kurzen Zeitreihe lassen sich zwar noch keine Trends ablesen, sie zeigt aber deutlich, dass sich Extremwetterlagen auf die Anzahl witterungs-

bedingter Störungen auswirken (Abbildung 113). Die Hitzewellen der Jahre 2018 und 2019 resultierten in einer größeren Anzahl hitzebedingter Störungen sowie Böschungsbränden. Dabei ist zu beachten, dass Störungen an Fahrzeugen wie beispielsweise Ausfälle von Klimaanlagen in diesem Indikator nicht enthalten sind, da sich die Daten nur auf Störungen an der Infrastruktur beziehen.

Auch auf Blitzschläge und Sturmereignisse (Störungsursache Vegetation) waren in den vergangenen Jahren viele Ausfälle zurückzuführen. Starkregen- und Hochwasserereignisse (Gleisunter- bzw. Gleisüberspülung) sowie winterliche Witterungsverhältnisse waren hingegen seltener für Störungen ursächlich. Im Mittel gab es über die Zeitreihe jährlich 392 witterungsbedingte Störungen in NRW.

Vorbereitung auf zukünftige Extremereignisse

Große Teile der Anlagen und Stationen der Deutschen Bahn liegen unter freiem Himmel und sind deshalb besonders anfällig für Änderungen der Witterung und Extremereignisse. Zusammen mit dem Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung wurde eine Studie zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Deutsche Bahn durchgeführt. Ergebnis der Studie ist, dass sich die Bahn auf extreme Wetterlagen einstellen muss, um die Pünktlichkeit ihrer Fahrten gewährleisten zu können. Die Studie benennt hierzu eine Fünf-Punkte-Strategie. Diese beinhaltet mehr Grünschnitt entlang der Trassen, Schutz für Leit- und Sicherheitstechnik, hitzeresistente Technik an Fahrzeugen, baulichen Schutz in Risikobereichen und weiterhin die Reduktion des CO₂-Ausstoßes (DB 2021a).

Seit 2018 verfolgt die Deutsche Bahn ein erweitertes Vegetationsmanagement. Nach diesem wird eine vegetationsfreie Zone eingerichtet, die sich

links und rechts sechs Meter ab Gleismitte erstreckt. Zudem wird für einen robusten Waldbestand gesorgt, um das Stürzen der Bäume auf die Oberleitungen zu vermeiden. Über einen Stufenplan wird die Organisation der Mitarbeitenden, Technik und Räumungsfahrzeuge schon bei einer Unwettervorwarnung geregelt. Innerhalb von 24 Stunden müssen die Hauptverbindungsstrecken geräumt und wieder befahrbar sein. Bei spontan eintretenden Unwettern erhält der Schutz der Mitarbeitenden und der Fahrgäste oberste Priorität. Falls die Witterung es zulässt, werden Reisezüge in verminderter Geschwindigkeit bis zum nächsten Bahnhof geleitet, wo die Fahrgäste und Mitarbeitenden versorgt werden. Dazu zählt die Einrichtung von Aufenthaltszügen und das Ausgeben von Hotel- oder Taxigutscheinen. Eine durchgehende Information und Kommunikation mit den Fahrgästen ist in diesem Fall genauso wichtig wie die Betreuung am Bahnhof selbst.



Handlungsfelder Wirtschaft



16. Industrie und Gewerbe



**17. Finanz- und
Versicherungswirtschaft**



18. Energiewirtschaft



19. Tourismuswirtschaft



16. Industrie und Gewerbe

Industrie und Gewerbe können stark von den Folgen des Klimawandels betroffen sein – etwa durch vermehrt auftretende Stürme, Starkniederschläge und Hochwasser. Hinzu kommen in indirekter Weise Auswirkungen des Klimawandels auf Beschaffungswege und Transportketten sowie Risiken im Absatz in globalen Wertschöpfungsketten und der Verfügbarkeit von Arbeitskräften, Rohstoffen und Energie. Neben den Risiken eröffnen sich für die Wirtschaft durch den Klimawandel jedoch auch eine Reihe von Möglichkeiten für die Entwicklung und den Absatz innovativer Produkte. Beispiele hierfür sind energieeffiziente Kühlungstechniken, hitzebeständige Straßenbeläge, klimaangepasste Bauweisen, wassersparende Techniken oder neue Serviceleistungen zur schnellen Information über Gefahren.

Indikatoren-Kernaussagen:

- Die Wasserproduktivität im Verarbeitenden Gewerbe ist in den vergangenen Jahren deutlich gestiegen.
- Ein effizienter Umgang mit der Ressource Wasser rüstet Unternehmen vor den Folgen des Klimawandels, wie zunehmenden wasserrechtlichen Beschränkungen.

Auswirkungen des Klimawandels

Im Handlungsfeld Industrie und Gewerbe lassen sich direkte physische Auswirkungen des Klimawandels, wie durch Extremereignisse verursachte Gebäudeschäden, von indirekten Auswirkungen, wie Produktionsbeeinträchtigungen durch den Ausfall von Zulieferern, unterscheiden.

Durch die veränderten klimatischen Verhältnisse ist zukünftig mit einem vermehrten Auftreten von Extremwetterereignissen zu rechnen. Industrie- und Gewerbebetriebe können dadurch in vielfältiger Weise direkt betroffen sein, vor allem durch Schäden an Infrastruktur, Produktions- und Lagerstätten durch beispielsweise Sturmschäden oder durch Flusshochwasser oder Starkregen ausgelöste Überflutungen. Bei Schäden an Produktionsstätten können möglicherweise Gefahrstoffe freigesetzt werden. Hitzeereignisse können sich ebenfalls negativ auf die Produktivität auswirken, indem zum Beispiel die Konzentrations- und Leistungsfähigkeit der Beschäftigten eingeschränkt wird.

Durch Extremwetter kann es auch zu Ausfällen in der Strom- und Energieversorgung kommen, wenn beispielsweise durch Sturmwurf eine oberirdische Hochspannungsleitung beschädigt oder die Kühlwassernutzung bei zu hohen Wassertemperaturen eingeschränkt wird.



Die Verkehrsinfrastruktur kann ebenfalls durch Extremwetterauswirkungen, wie Hangrutschungen und Überschwemmungen nach Starkregenereignissen oder Behinderungen durch Sturmwurf beeinträchtigt werden. Aber nicht nur Schiene und Straße sind durch Extremwetter gefährdet, auch bei der Schiffbarkeit kann es durch Hoch- oder Niedrigwasserereignisse zu Einschränkungen kommen. Diese Beeinträchtigung der Verkehrswege kann dazu führen, dass es zu Ausfällen in der Lieferkette kommt, die sich wiederum auf die Produktion auswirken können oder die Auslieferung der Waren unmöglich macht.

Tab. 18: Übersicht der Indikatoren zum Handlungsfeld 16 „Industrie und Gewerbe“

Indikator		Einheit	räumliche Einheit	Zeitreihe	Mittelwert Zeitreihe	Trend Zeitreihe	Änderung Zeitreihe	Querbezüge zu anderen Handlungsfeldern
16.1 Wasserproduktivität des Verarbeitenden Gewerbes	Wasserproduktivität	dimensionsloser Index [-]	NRW	1998 - 2016	136	↗	+ 74	4 (S. 82)
	Wassereinsatz			1998 - 2016	80	↘	- 37	
	Bruttowertschöpfung			1998 - 2016	105	~	-	

- ↗ steigender Trend
- ↘ fallender Trend
- ~ kein Trend

- ↗ ↘ ↖ ↙ ↕ günstige Entwicklung
- ↗ ↘ ↖ ↙ ↕ keine Bewertung der Entwicklung möglich oder gleichzeitig
- ↗ ↘ ↖ ↙ ↕ günstige und ungünstige Entwicklungsaspekte vorhanden



16.1 Wasserproduktivität des Verarbeitenden Gewerbes



Nutzbares Wasser wird knapper –
Effizienz zahlt sich aus!

Infolge des Klimawandels werden Trocken- und Hitzeperioden zukünftig öfter, intensiver und länger auftreten, sodass vor allem während dieser Perioden die Temperaturen in Fließgewässern ansteigen werden und gleichzeitig mit einer Abnahme des Abflusses zu rechnen ist. Bei hohen Gewässertemperaturen kann es zu Beschränkungen der Kühlwasser-einleitungen für Industrie- und Gewerbebetriebe

kommen. Situationen, in denen die Rückführung von gebrauchtem Kühlwasser und/oder die Entnahme von Kühlwasser nur noch eingeschränkt möglich ist, könnten künftig häufiger auftreten. Hohe Wasserbedarfe im produzierenden Gewerbe sind daher aus Perspektive der Klimaanpassung negativ zu bewerten, wohingegen ein effizienter Umgang mit der Ressource Wasser eine geringere Anfälligkeit bewirkt.

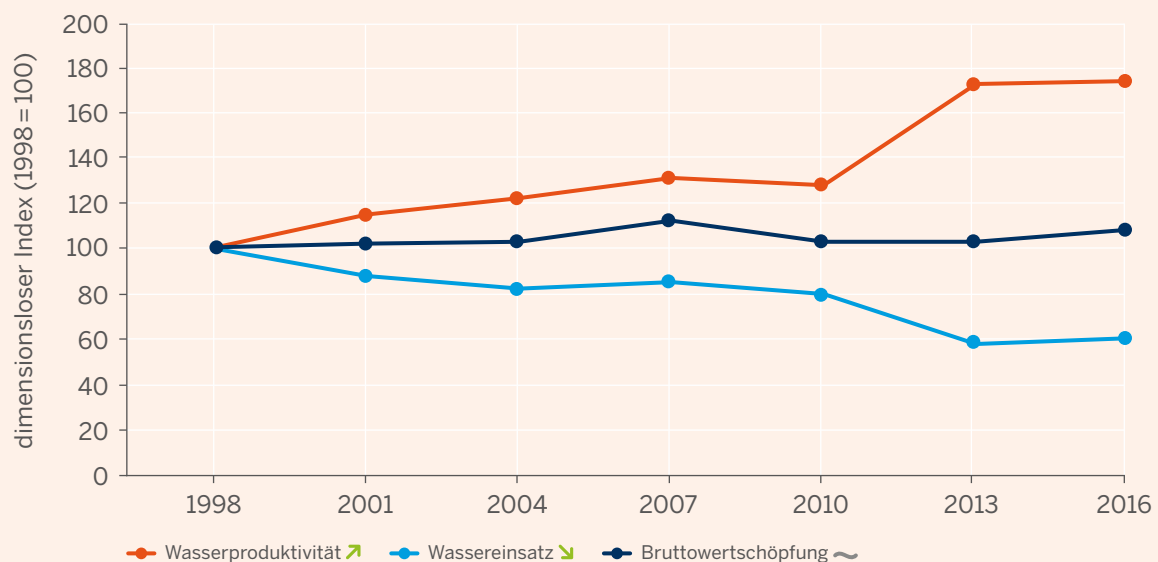


Abb. 114: Wasserproduktivität, Wassereinsatz und Bruttowertschöpfung des Verarbeitenden Gewerbes in NRW, ausgehend von einem dimensionslosen Index, der sich auf das Jahr 1998 als Referenz bezieht, für den Zeitraum 1998-2016 (Datengrundlage: Statistische Ämter des Bundes und der Länder (Umweltökonomische Gesamtrechnung der Länder))

Die Wasserproduktivität beschreibt das Verhältnis aus Bruttowertschöpfung und Wassereinsatz. Je geringer der Wassereinsatz bei der Wertschöpfung ist, desto wassereffizienter ist der jeweilige Wirtschaftsbereich.

Im Verarbeitenden Gewerbe erklärt sich der Wasserbedarf vor allem aus dem Einsatz von Kühlwasser innerhalb der Produktionsprozesse. Während der Wassereinsatz in den vergangenen Jahren statistisch signifikant zurückgegangen ist, wurde die Wasserproduktivität statistisch signifikant erhöht – und zwar deutlich (Abbildung 114). Im Zeitraum 1998 - 2016 stieg sie um mehr als 75 % an. Die Bruttowertschöpfung blieb dabei ungefähr konstant.

Für die gestiegene Wasserproduktivität gibt es mehrere Erklärungen. Im Verarbeitenden Gewerbe konnte zum einen durch den Einsatz technischer Methoden und Verbesserungen ein effizienterer Umgang mit der Ressource Wasser erreicht werden. Zum anderen wirken sich auch veränderte Branchenstrukturen auf die Wasserproduktivität aus. Einige Branchen, wie etwa die Papierindustrie, die chemische Industrie, das Ernährungsgewerbe oder die Textilgewerbe sind deutlich wasserintensiver als andere. Eine höhere Wasserproduktivität kann daher – zumindest teilweise – auf Verschiebungen in der Branchenstruktur innerhalb des Verarbeitenden Gewerbes zurückzuführen sein.

Effizienzagentur NRW – Unterstützung für Unternehmen auf dem Weg zur ressourceneffizienten Wertschöpfung

Die Verringerung des Wassereinsatzes im Produktionsprozess stellt einen von vielen möglichen Bausteinen einer ressourcenschonenden Wertschöpfung dar. Im Hinblick auf eine klimaangepasste Produktionsweise ist dieser Baustein besonders relevant. Ressourceneffizienz umfasst jedoch weitere Aspekte. Aber wie können Unternehmen mittels Ressourcenschonung einen Beitrag zur Nachhaltigkeit leisten, der sich auch wirtschaftlich auszahlt?

Um produzierende Unternehmen auf dem Weg zu einer wirtschaftlichen Steigerung der Ressourceneffizienz zu begleiten, hat das Land NRW die Effizienzagentur NRW ins Leben gerufen. Das Angebot der Effizienzagentur NRW richtet sich gezielt

an Industrie- und Handwerksbetriebe. Neben der Ermittlung von Einsparpotenzialen berät die Effizienzagentur auch zu Fragen der Finanzierung von Ressourceneffizienz-Maßnahmen und informiert über das Thema in Veranstaltungen, Schulungen und Netzwerken im Auftrag des Landes NRW.





17. Finanz- und Versicherungs- wirtschaft

Durch die bestmögliche Berücksichtigung klimarelevanter Risiken im Rahmen ihrer Finanz- oder Versicherungsgeschäfte tragen Finanz- und Versicherungsdienstleister dazu bei, diese zu erkennen und zu bewerten. Um einen optimalen Schutz vor klimawandelbedingten Risiken für Bürgerinnen und Bürger sowie Unternehmen oder auch Kommunen zu erreichen, gilt es jeweils, präventive Schutzmaßnahmen mit erschwinglichen Versicherungsleistungen ausgewogen zu kombinieren.





Auswirkungen des Klimawandels

Durch die klimatischen Veränderungen wird es voraussichtlich zu häufigeren Hochwasser- oder Extremwetterereignissen kommen. Dies hat zum einen eine erhöhte Nachfrage nach Versicherungen für diese Naturgefahren zur Folge, zum anderen wird sich auch die Risikobewertung von Versicherungen gegenüber Naturgefahren verändern und werden Versicherungsprämien möglicherweise steigen. Die Einführung einer Pflichtversicherung könnte den öffentlichen Druck der Versicherten, Präventionsmaßnahmen durchzuführen, senken und damit die Umsetzung solcher Maßnahmen hemmen. Hier werden Versicherungsunternehmen die Versicherbarkeit von Schäden und das erforderliche Maß an Prävention durch die Versicherten den Klimawandelbedingungen anpassen.

Nicht nur ein direkt durch ein Extremwetterereignis geschädigtes Unternehmen ist durch Produktionsausfall und Folgeschäden betroffen, sondern die gesamte Wertschöpfungskette. Weitere Unternehmen und letztlich auch Verbraucherinnen und Verbraucher sind auf Zulieferungen angewiesen und erleiden beim Ausbleiben von Lieferungen Produktionsausfälle oder andere Nachteile. Darüber hinaus ist durch das möglicherweise höhere Risiko gegenüber Extremwetterschäden eine veränderte Risikoeinschätzung der Investoren/Banken bei der Vergabe von Krediten oder anderer Investitionen möglich, sodass Unternehmen bei der Kapitalbeschaffung beeinträchtigt werden könnten.

Indikatoren-Kernaussagen:

- In der Wohngebäude- und in der erweiterten Elementarschadenversicherung sind höhere Schadenaufwände zu erwarten.
- Aktuelle Tendenzen der Schadenaufwände bestätigen die erwartete Steigerung (noch) nicht.
- Der Anteil an Wohngebäuden mit erweiterter Elementarschadenversicherung steigt, allerdings nur langsam.


Tab. 19: Übersicht der Indikatoren zum Handlungsfeld 17 „Finanz- und Versicherungswirtschaft“

Indikator		Einheit	räumliche Einheit	Zeitreihe	
17.1 Schadenaufwand in der Wohngebäudeversicherung	Wohngebäudeversicherung-Sturm/Hagel, Schadenhäufigkeit	%	NRW	1999 - 2019	
	Wohngebäudeversicherung-Sturm/Hagel, Schadensatz	‰	NRW	1999 - 2019	
17.2 Elementarschäden	Wohngebäudeversicherung-Elementarschäden, Schadenhäufigkeit	%	NRW	2002 - 2019	
	Wohngebäudeversicherung-Elementarschäden, Schadensatz	‰	NRW	2002 - 2019	
17.3 Versicherungsdichte Elementarschadenversicherung		%	NRW	2014 - 2020	

steigender Trend

fallender Trend

Trend mit Trendumkehr: zuerst fallend, dann steigend

Trend mit Trendumkehr: zuerst steigend, dann fallend

kein Trend



günstige Entwicklung

ungünstige Entwicklung

keine Bewertung der Entwicklung möglich oder gleichzeitig günstige und ungünstige Entwicklungsaspekte vorhanden



	Mittelwert Zeitreihe	Trend Zeitreihe	Änderung Zeitreihe	Querbezüge zu anderen Handlungsfeldern
	7,8	~	-	14 (S. 248), 16 (S. 262)
	0,14	~	-	
	0,7	~	-	14 (S. 248), 16 (S. 262)
	0,05	~	-	
	40,7	↗	13,1	11 (S. 216), 14 (S. 248)



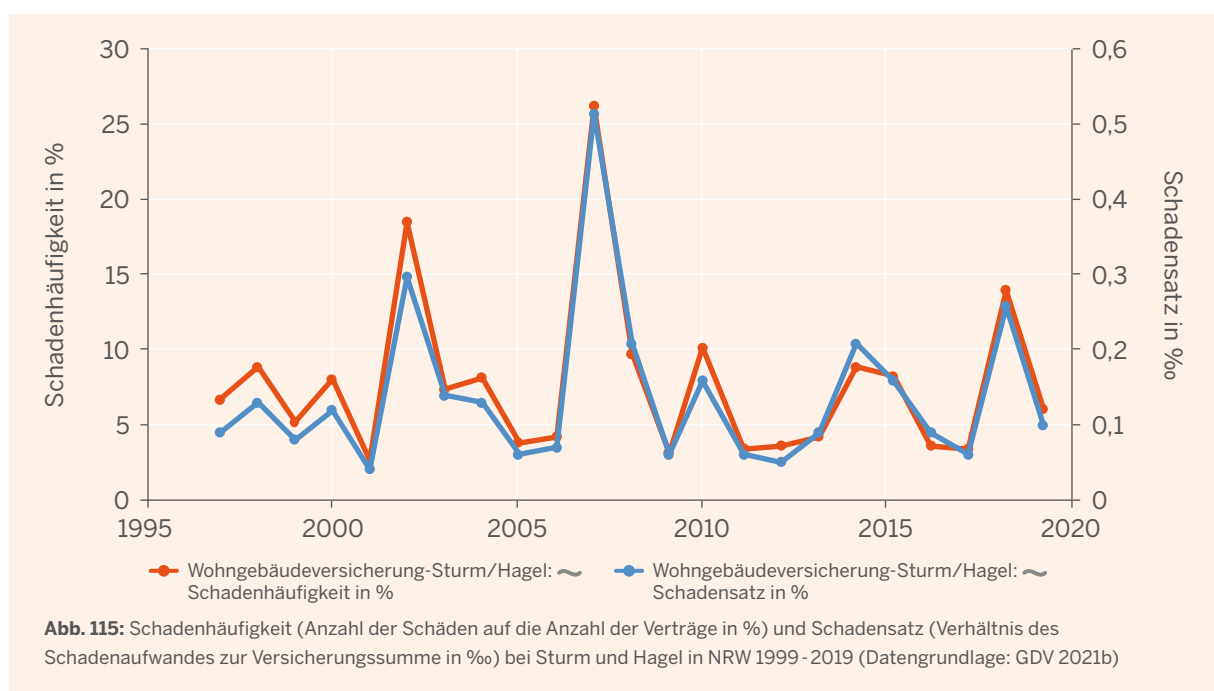
17.1 Schadenaufwand in der Wohngebäudeversicherung

I

Steigende Schäden durch Sturm und Hagel

Infolge des Klimawandels werden häufigere und stärkere Unwetter erwartet. Zukünftig dürfte es vermehrt zu Starkregenereignissen und Stürmen kommen, die sich auf die Versicherungswirtschaft auswirken. Die Indizien für einen Zusammenhang zwischen Klimawandel und steigenden Schäden durch Wetterextreme scheinen sich mehr und mehr zu verfestigen, insbesondere bei Hagel und Gewit-

tern (Rädler et al. 2019; Rädler et al. 2018; Sander et al. 2013). Kenngrößen wie Schadenhäufigkeit und Schadensatz zeigen auf, welchen Einfluss Sturm- oder Hagelereignisse auf Versicherer haben. Aber auch weitere Faktoren sind hier relevant: Inwiefern Wohngebäude wetterfest und widerstandsfähig errichtet werden, beeinflusst die Höhe der Schadenssummen im Schadenfall.



Der Indikator „Schadenaufwand in der Wohngebäudeversicherung“, präsentiert in Abbildung 115, basiert analog zum Indikator 17.2 „Elementarschäden“ auf zwei Kenngrößen: Die Schadenhäufigkeit gibt an, wie viele Schadenfälle im Verhältnis zur Anzahl der Versicherten

aufgetreten sind. Der Schadensatz hingegen beschreibt, wie groß die Summe der für Schäden geleisteten Zahlungen im Verhältnis zu den versicherten Werten in der Wohngebäudeversicherung gewesen ist.

Im Durchschnitt wurden in NRW im Zeitraum 1999 bis 2019 bei 7,8 % der Versicherten Schäden durch Sturm und Hagel gemeldet (Schadenhäufigkeit), wobei sich der Schadensatz auf 0,14 ‰ der Versicherungssumme der betreffenden Verträge belief. Beide Zeitreihen zeigen bisher keine signifikanten Trends.

In den Jahren 2002, 2007 und 2018 ereigneten sich besonders schwerwiegende Unwetter (Orkane

Jeanett im Oktober 2002, Kyrill im Januar 2007 sowie Friederike im Januar 2018). In den Zeitreihen werden solche Ereignisse als Spitzen erkennbar (Abbildung 115). Der Orkan Kyrill war mitursächlich dafür, dass die Schadenhäufigkeit im Jahr 2007 mit 26,5 % den höchsten Wert im gesamten Betrachtungszeitraum erreichte. Dies gilt auch für den Schadensatz mit 0,52 ‰ im Jahr 2007.

Hagel – Wann wird es gefährlich?

Bei Hagel gilt die Faustregel: Je größer die Hagelkörner, desto größer die Schäden. Größere Hagelkörner sind nämlich nicht nur schwerer als kleinere, sie erreichen auch höhere Geschwindigkeiten (Abbildung 116). Daher haben sie insgesamt eine höhere kinetische Energie, die letztlich heftigere Zerstörungen verursacht. Während Hagelkörner mit einem Durchmesser von 1 cm eine Geschwindigkeit von ca. 50 km/h erreichen, schlagen Körner mit einem Durchmesser von 5 cm mit ca. 110 km/h auf. Letztere können Fahrzeuge irreparabel beschädigen und Ziegeldächer zerstören, 1 cm-große Hagelkörner verletzen „lediglich“ Feldfrüchte, wie Getreide, oder führen zu Schäden an Bäumen. Ab einem

Korndurchmesser von 6 cm wird Hagel dann auch für den Menschen zu einer ernsthaften Verletzungsgefahr, ab 8 cm besteht Gefahr für Leib und Leben. Hagelkörner mit einer solchen Größe erreichen Geschwindigkeiten von ca. 140 km/h (GDV 2019).

Das größte in Deutschlands jemals „gemessene“ Hagelkorn hatte übrigens einen Durchmesser von 14,1 cm. Es ging 2013 auf der Schwäbischen Alb nieder (GFZ 2021). Zur Messung von Hagelkorndurchmessern greifen Forscher auf unkonventionelle Methoden zurück. Sie bestimmen die Größe von Hagelkörnern über die Auswertung von Bildern und Videos. Testweise kommen mittlerweile auch Styroporplatten bei der Erfassung von Korngrößen zum Einsatz.

Hagelkorngröße	Geschwindigkeit	mögliche Schäden
ab 1 cm	ca. 50 km/h	Verletzungen an Getreiden, Früchten, Schäden an Bäumen
ab 2 cm	ca. 70 km/h	Löcher in Plexiglas, Bruch von Gewächshäusern und Oberlichtern
ab 3 cm	ca. 90 km/h	Verletzungsgefahr für Kleintiere, Bruch von Schiefer, Tonziegeln und Fensterscheiben, sichtbare Dellen an Fahrzeugen
ab 5 cm	ca. 110 km/h	Irreparable Schäden an Fahrzeugen, Zerstörung von Ziegel- und Schindeldächern bis auf die Dachsparren, Bruch von Metallfensterrahmen
ab 6 cm	ca. 120 km/h	Ernsthafte Verletzungsgefahr für Menschen, Zerspringen von Betonziegeln, ernsthafte Schäden an Außenhüllen von Großflugzeugen, Auseinanderreißen kleiner Baumstämme
ab 8 cm	ca. 140 km/h	Lebensgefahr für Menschen, Abplatzen von Betonwänden, Schädigung von Backsteinhäusern

Abb. 116: Gefahren durch Hagel (Quelle: GDV 2019)



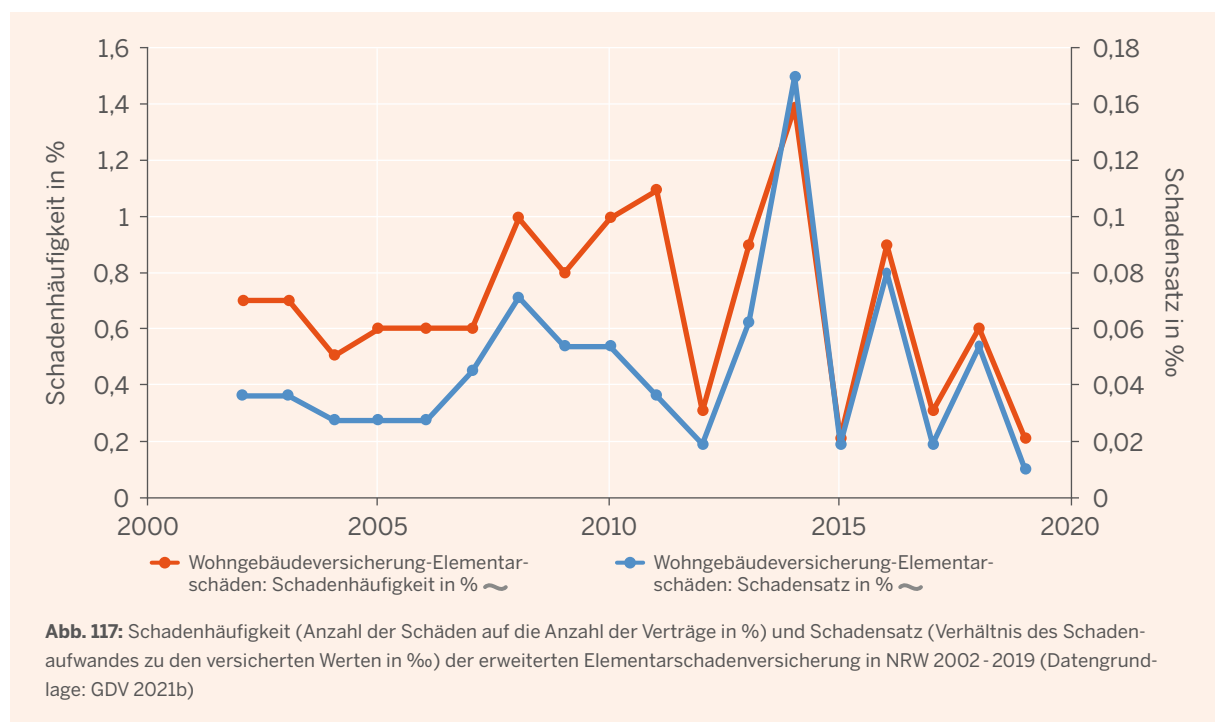
17.2 Elementarschäden

I

Erhöhte Schäden durch Starkregen und Hochwasser

Neben Sturm und Hagel können auch Starkregen und Hochwasser zu schweren Schäden an Gebäuden führen. Durch das in Häuser und Wohnungen von außen eindringende Wasser, den Rückstau aus der Kanalisation oder durch Schlamm, Öl und andere Stoffe, die das Wasser im Gebäude verteilt, können massive Schäden entstehen. Weitere Gefahrenquellen stellen Erdbeben, Erdsenkungen oder winterliche Schneelasten infolge intensiver Schneefälle

dar. Insbesondere für Starkregen und Hochwasser wird im Zuge des Klimawandels ein häufigeres Auftreten erwartet. Diese können über die erweiterte Elementarschadenversicherung abgesichert werden. Bei ausreichender Versicherungsdichte kann die erweiterte Elementarschadenversicherung ergänzend zur Wohngebäudeversicherung Auskunft über eine mögliche Zunahme von Schäden durch klimawandelbedingte Extremwetterereignisse geben.



Der in Abbildung 117 dargestellte Indikator „Elementarschäden“ basiert analog zum Indikator 17.1 „Schadenaufwand in der Wohngebäudeversicherung“ auf zwei Kenngrößen. Die Schadenhäufigkeit gibt an, wie viele Schadenfälle im Verhältnis zur Anzahl der Versicherten aufgetreten sind. Der Schadensatz hingegen beschreibt, wie groß die Summe der für Schäden geleisteten Zahlungen im Verhältnis zu den versicherten Werten in der erweiterten Elementarschadenversicherung ist.

Die Zeitreihe zeigt in den Jahren 2002 bis 2019 eine durchschnittliche Schadenhäufigkeit von rund 0,7 % und einen Schadensatz von 0,05 ‰ auf (Abbildung 117). Bisher ist jedoch noch kein signifikanter Trend zu erkennen, jedoch besteht eine leicht fallende

Tendenz. Diese Tendenz lässt sich möglicherweise mit den generell trockeneren letzten Jahren in Verbindung bringen. Für die Schadenhäufigkeit wie auch für den Schadensatz sind einige Schwankungen in der Zeitreihe vorhanden. Vor allem 2008, 2011 und 2014 treten als extreme Jahre hervor, in denen die Schäden mit Starkregenereignissen und Überflutungen zusammenhängen. So kam es beispielsweise im Jahr 2014 zu großen Schäden durch das Sturmtief Ela, das während der Pfingsttage über weite Teile Nordrhein-Westfalens hinweg zog. So sind auch für das Jahr 2021 durch die Flutkatastrophe, ausgelöst durch das Tiefdruckgebiet „Bernd“, sehr hohe Werte zu erwarten. In anderen Jahren wie 2012, 2015, 2017 und 2019 halten sich die Schäden hingegen in Grenzen.

Hochwasserkatastrophe durch Tiefdruckgebiet „Bernd“

Im Juli 2021 richtet das Tiefdruckgebiet „Bernd“ mit seinen enormen Starkregenmassen eine Flutkatastrophe im Süden NRWs und im Westen von Rheinland-Pfalz sowie in Teilen von Bayern und Sachsen an. Das Unwetter führte zum Tod von mehr als 160 Menschen. Gleichzeitig wurden ganze Ortschaften und Infrastrukturen zerstört.

Der Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) berichtet beispielsweise von 250.000 Schadenfällen, davon bis zu 50.000 beschädigten oder zerstörten Kraftfahrzeugen. Der versicherte Schaden für die Kfz-Versicherer liegt bei rund 450 Millionen Euro (GDV 2021d).

Der GDV beziffert die versicherten Schäden in der Sach-Elementarversicherung, die vom 13. bis einschließlich 18. Juli 2021 durch das Tiefdruckgebiet „Bernd“ verursacht wurden, auf 6,5 Milliarden Euro (GDV 2021d). Mit Stand Ende September wurden bereits 1,5 Milliarden Euro an die Versicherten ausbezahlt. Kunden in Nordrhein-Westfalen erhielten über 900 Millionen Euro, in Rheinland-Pfalz rund 500 Millionen Euro. Die übrigen Beträge gingen in weitere Bundesländer, vor allem nach Bayern und Sachsen (GDV 2021a). Insgesamt dürfte das Jahr 2021 laut GDV mit Stürmen, Überschwemmung, Starkregen und Hagel zum schadenträchtigsten Jahr werden. Bereits im Juni hatten Starkregen und Hagel bundesweit einen geschätzten versicherten Schaden von 1,7 Milliarden Euro verursacht (GDV 2021c).





17.3 Versicherungsdichte

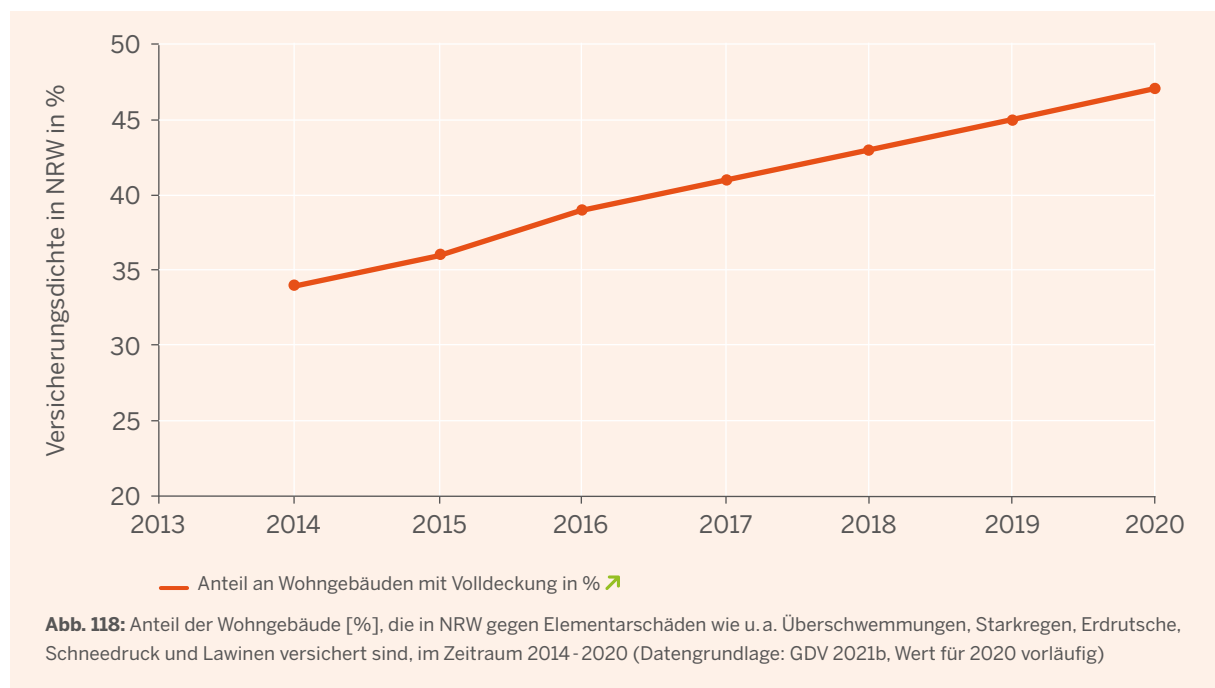
Elementarschäden



Absicherungen gegen Elementarschäden nehmen zu

Aufgrund des Klimawandels werden Extremwetterereignisse voraussichtlich zunehmen. Insbesondere durch Stürme und Hochwasser könnten Häuser und Wohnungen künftig stärker gefährdet sein. Während der Abschluss einer Wohngebäudeversicherung gegenüber Sturm und Hagel in Deutschland heute fast eine Selbstverständlichkeit darstellt, hat sich der Abschluss von erweiterten Elementarschadenver-

sicherungen (eEV) für den Fall von Schäden durch Starkregen und Hochwasser noch nicht in der Breite durchgesetzt. Um ausreichend große Risikogemeinschaften zu bilden, die erschwingliche Versicherungsprämien sicherstellen, ist eine hohe Versicherungsdichte jedoch auch in der erweiterten Elementarschadenversicherung wichtig.



Wer sein Haus nicht nur gegen Sturm- und Hagelschäden versichern möchte, benötigt zusätzlich eine Elementarschadenversicherung. Diese deckt Schäden ab, die infolge von Starkregen, Hochwasser, Schneedruck und Erdbeben entstehen. Auch Schadensereignisse, die nicht mit dem Klimawandel in Verbindung stehen, wie Erbeben, Erdsenkungen und Vulkanausbrüche sind üblicherweise in Elementarschadenversicherungen enthalten.

Der Indikator zeigt den Anteil der Wohngebäude, die in NRW gegen Elementarschäden versichert sind. Die Versicherungsdichte nahm in den vergangenen Jahren von weniger als 35 % in 2014 bis ca. 47 % in 2020 signifikant zu (Abbildung 118). Nordrhein-Westfalen liegt im Hinblick auf die Versicherungsdichte in der erweiterten Elementarschadenversicherung im bundesweiten Durchschnitt. Zum ersten Mal konnte im Jahr 2020 mit 47 % der bundesweite Mittelwert von 46 % leicht übertroffen werden (vorläufige Werte, GDV 2021b).

Elementarschadenversicherungen für Wohngebäude – in Deutschland unterschiedlich stark verbreitet

Die Dichte der Elementarschadenversicherung variiert stark zwischen den verschiedenen Bundesländern. So sind in Baden-Württemberg 94 % der Gebäude auch gegen Elementarschäden versichert, in Bremen nur 22 % (GDV 2021b). Diese starken Unterschiede begründen einerseits darauf, dass in Baden-Württemberg bis 1994 eine Pflicht für Elementarschadenversicherungen bestand. Andererseits haben mittlerweile zehn Bundesländer Informationskampagnen zu den Gefahren von Elementarschäden gestartet oder bereits durchgeführt. Dadurch konnte die Versicherungsdichte gesteigert werden. Es bleibt abzuwarten, inwiefern durch das Hochwasserereignis im Juli 2021 infolge des Tiefs „Bernd“ im Süden Nordrhein-Westfalens und im Westen von Rheinland-Pfalz ein Anstieg der Elementarschadenversicherungsdichte stattfinden wird. Laut dem Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) deutet die aktuelle Entwicklung darauf hin, dass es im Nachgang der Ereignisse im Juli 2021 zu einem deutlichen Anstieg in der Nachfrage nach Elementarschadenversicherungen kommt.





18. Energiewirtschaft

Auch der Energiesektor ist anfällig für die Folgen des Klimawandels. Extremwetterereignisse beeinträchtigen beispielsweise Freileitungen, lange Hitzeperioden schränken die Verfügbarkeit von Kühlwasser für konventionelle Kraftwerke ein. Gerade in unserem industrie- und einwohnerstärksten Bundesland Nordrhein-Westfalen hat die Energieversorgungssicherheit einen sehr hohen Stellenwert.



Auswirkungen des Klimawandels

Durch die veränderten klimatischen Bedingungen können häufiger Extremwetterereignisse wie Stürme oder Starkregen auftreten. Insbesondere Freileitungen sind durch Extremereignisse wie Stürme oder Schneelasten gefährdet, Starkregenereignisse können zu Schäden an Schaltanlagen und Kabeln führen. Aber auch thermische Kraftwerke und weitere Infrastrukturen können beispielsweise durch Überschwemmungen bei Starkregen beeinträchtigt werden.

Insbesondere während Hitzeperioden kann es zu Einschränkungen der Kühlwasserverfügbarkeit kommen, da die Flüsse einen zu geringen Wasserstand aufweisen oder nicht weiter aufgeheizt werden dürfen. Auch bei Hochwasser kann es zu Einschränkungen bei der Kühlwasserentnahme kommen. Darüber hinaus können auch regenerative Erzeugungsanlagen durch den Klimawandel beeinträchtigt werden, beispielsweise Windenergieanlagen durch Abschaltung bei Sturm, Wasserkraftanlagen durch die saisonale Verschiebung der Niederschläge sowie Photovoltaikanlagen durch Schäden durch Hagelereignisse. Gleichzeitig wird sich der

Energiebedarf vor allem im Sommer für Kühlzwecke erhöhen, während im Winter ein Rückgang des Energiebedarfs für Heizzwecke zu erwarten ist. Es wird aber insgesamt damit gerechnet, dass der Strombedarf zukünftig steigen wird, während der Primärenergieverbrauch voraussichtlich zurückgehen wird.



Indikatoren-Kernaussagen:

- Die Versorgungssicherheit bzw. die Versorgungsqualität sind in NRW sehr hoch. Extremwetterereignisse können dennoch zu Unterbrechungen der Stromversorgung führen.
- Extremwetter wie Dürre, Hitze, Starkregen und Sturm führen zeitweise zu verminderter Stromproduktion in thermischen Kraftwerken.
- NRW produziert immer weniger Strom in thermischen Kraftwerken, dadurch wird auch immer weniger Kühlwasser gebraucht.



Tab. 20: Übersicht der Indikatoren zum Handlungsfeld 18 „Energiewirtschaft“

Indikator		Einheit	räumliche Einheit	Zeitreihe	
18.1 Witterungsbedingte Netzunterbrechungen	Niederspannung	%	NRW	2007 - 2020	
	Mittelspannung	%	NRW	2007 - 2020	
18.2 Witterungsbedingte Nichtverfügbarkeit der Stromversorgung für Endverbrauchende	atmosphärische Einwirkungen und höhere Gewalt	min	NRW	2006 - 2020	
	sonstige ungeplante Unterbrechungen	min	NRW	2006 - 2020	
18.3 Witterungsbedingt geminderte Stromproduktion thermischer Kraftwerke		GWh	NRW	1995 - 2020	
18.4 Wassereffizienz thermischer Kraftwerke	Brutto-Stromerzeugung	GWh	NRW	2012 - 2019	
	Kühlwasserentnahme	Mio. m ³	NRW	2012 - 2019	
	Wassereffizienz	kWh/m ³	NRW	2012 - 2019	

steigender Trend

fallender Trend

Trend mit Trendumkehr: zuerst fallend, dann steigend

Trend mit Trendumkehr: zuerst steigend, dann fallend

kein Trend



günstige Entwicklung

ungünstige Entwicklung

keine Bewertung der Entwicklung möglich oder gleichzeitig günstige und ungünstige Entwicklungsaspekte vorhanden

	Mittelwert Zeitreihe	Trend Zeitreihe	Änderung Zeitreihe	Querbezüge zu anderen Handlungsfeldern
	0,2	↘	-0,2	15 (S. 256), 16 (S. 262), 17 (S. 266)
	3,3	↻	-5,5	
	2,9	~	–	9 (S. 184), 15 (S. 256), 16 (S. 262), 17 (S. 266)
	10,8	~	–	
	116	↗	+ 219	4 (S. 82), 15 (S. 256), 16 (S. 262), 17 (S. 266)
	135.443	↘	- 50.916	4 (S. 82)
	1.491	↘	- 736	
	92	~	–	



18.1 Witterungsbedingte Netzunterbrechungen

I

Extremwetter erhöhen Risiko für Stromausfälle

Da Extremwetterereignisse infolge des Klimawandels künftig häufiger und intensiver auftreten können, wird auch von einem Anstieg witterungsbedingter Unterbrechungen der Stromversorgung ausgegangen. Vor allem oberirdische Leitungen sind anfällig für die Einflüsse extremer Stürme und Orkane sowie schwerer Schnee- und Eislasten. Überschwemmungen

können zu Schäden an der unterirdischen Energieinfrastruktur führen. Ohne Strom funktionieren nahezu auch alle anderen Infrastrukturen nicht, wie beispielsweise die Versorgung von Wärme mit Gas, Wasserversorgung und Abwasser, Telekommunikation und Verkehr.

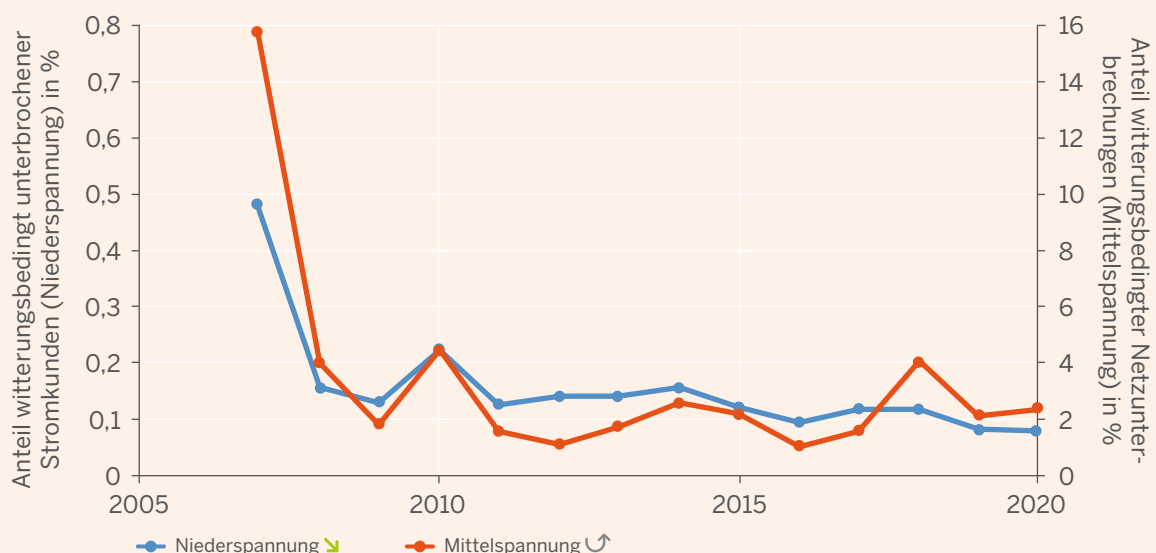


Abb. 119: Anteil witterungsbedingt unterbrochener Stromkunden im Niederspannungsbereich mit einer Dauer von mehr als 3 min sowie Anteil witterungsbedingter Netzunterbrechungen im Mittelspannungsbereich durch atmosphärische Einwirkungen und höhere Gewalt in NRW im Zeitraum 2007 - 2020 (Datengrundlage: BNetzA)

Die Unterbrechungen in der Stromversorgung werden in Deutschland von der Bundesnetzagentur (BNetzA) in einer jährlichen Störungsstatistik erfasst. In die Statistik gehen alle Versorgungsunterbrechungen im Nieder- und Mittelspannungsnetz ein. Für den Indikator „Witterungsbedingte Netzunterbrechungen“ wird für die Niederspannung der Anteil der unterbrochenen Stromkunden mit einer Dauer von mehr als drei Minuten durch atmosphärische Einwirkungen (zum Beispiel Wind und Sturm bis Stärke 9 der Beaufortskala (Bft), Hochwasser, Hagel, Regen, Gewitter, Schnee, Eis oder Eisregen; Kälte oder Hitze) und Höhere Gewalt (zum Beispiel schwere Stürme ab 10 Bft und außergewöhnliche Hochwasser) dargestellt. Bei der Mittelspannung wird der Anteil der Netzunterbrechungen gezeigt, der durch atmosphärische Einwirkungen und Höhere Gewalt verursacht wurde.

Deutschland und Nordrhein-Westfalen haben eine im internationalen Vergleich hohe Versorgungssicherheit. Auch der Anteil witterungsbedingter Netzunterbrechungen ist in NRW relativ gering. Im Niederspannungsnetz waren über die Zeitreihe im Durchschnitt

0,2 % der Stromkunden mindestens drei Minuten von der Stromversorgung unterbrochen (Abbildung 119). Jedoch haben große Unwetterereignisse wie beispielsweise der Sturm Kyrill im Jahr 2007 einen großen Einfluss auf den Anteil der Netzunterbrechungen. Diese waren im Jahr 2007 deutlich erhöht. Im Niederspannungsbereich lässt sich dadurch ein statistisch signifikant fallender Trend nachweisen. Für das Jahr 2021 ist durch die im Juli durch extreme Starkregen ausgelöste Sturzfluten im Süden Nordrhein-Westfalens ebenfalls mit deutlich erhöhten Werten zu rechnen.

Für das Mittelspannungsnetz lässt sich ein durchschnittlicher Anteil der witterungsbedingt unterbrochenen Bemessungsscheinleistung von 3,3 % berechnen. Auch hier ist der Sturm Kyrill im Jahr 2007 deutlich in seinen Auswirkungen auf die Stromversorgung erkennbar. Für die Zeitreihe des Mittelspannungsnetzes ist ein quadratischer Trend nachweisbar, der zunächst aufgrund des enorm hohen 2007-Wertes stark fällt und dann wegen eines höheren Wertes in 2018 wieder leicht ansteigt.





18.2 Witterungsbedingte Nichtverfügbarkeit der Stromversorgung für Endverbrauchernde

I

Stromversorgung für Endverbrauchernde auch unter bisherigen Klimawandelbedingungen sicher

Aufgrund zunehmender Extremwetterereignisse infolge des Klimawandels könnte eine wetterbedingte Nichtverfügbarkeit der Stromversorgung künftig nicht nur häufiger, sondern auch länger auftreten. Insbesondere für die Mittelspannung, aber auch für die Niederspannung sind wetterbedingte Stromaus-

fälle von Bedeutung. Durch die Orkane Kyrill im Jahr 2007 und Xynthia im Jahr 2010 kam es in NRW durch Schäden an Stromnetzen teilweise zu längeren Wartezeiten für Endverbrauchernde, bis die Stromversorgung wiederhergestellt war.

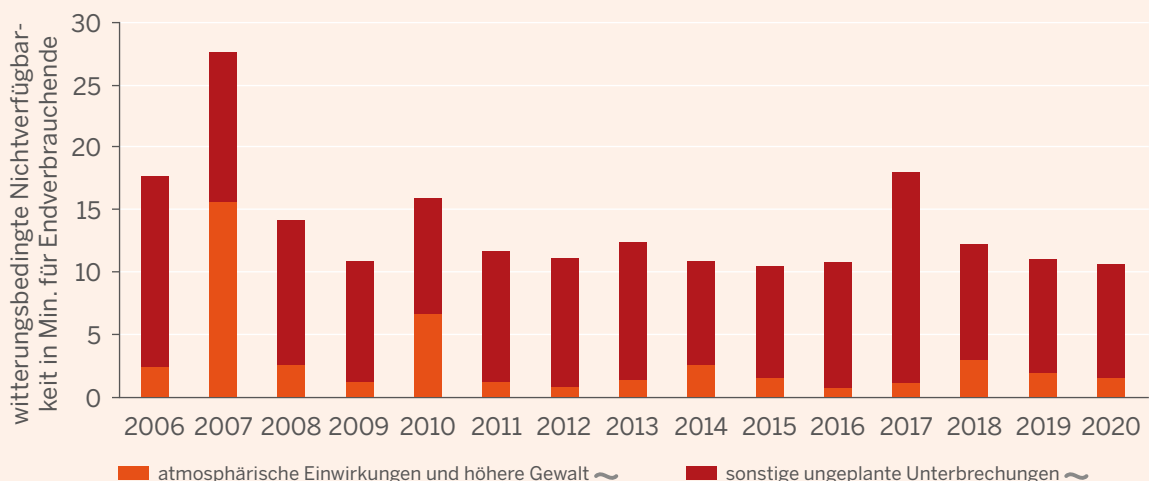


Abb. 120: Witterungsbedingte Nichtverfügbarkeit der Stromversorgung für Endverbrauchernde in Minuten durch entweder atmosphärische Einwirkungen und höhere Gewalt oder durch sonstige ungeplante Unterbrechungen bezogen auf den Zeitraum von 2006 - 2020 in NRW (Datengrundlage: BNetzA)

Abbildung 120 stellt die witterungsbedingte Nichtverfügbarkeit der Stromversorgung durch atmosphärische Einwirkungen (zum Beispiel Wind und Sturm bis 9 Bft; Hochwasser, Hagel, Regen, Gewitter, Schnee, Eis oder Eisregen; Kälte oder Hitze) und höhere Gewalt (zum Beispiel schwere Stürme ab 10 Bft und außergewöhnliche Hochwasser) dar. Um diese Zahlen besser einordnen zu können, sind ebenso die sonstigen ungeplanten Unterbrechungszeiten (zum Beispiel Einwirkungen Dritter, Rückwirkungsstörungen, defekte Betriebsmittel, altersbedingte Ausfälle) in der Stromversorgung dargestellt.

Im Mittel waren die Endverbraucher im Zeitraum 2006-2020 jährlich knapp 14 Minuten von der Stromversorgung getrennt. Davon wurden drei Minuten durch atmosphärische Einwirkungen verursacht. Für die Nichtverfügbarkeit der Stromversorgung durch atmosphärische Einwirkungen und höhere Gewalt, für die ein Zu-



sammenhang zum Klimawandel vorliegen könnte, liegt bisher kein signifikanter Trend vor.

In der Zeitreihe der Dauer witterungsbedingter Unterbrechungen (atmosphärische Einwirkungen und Höhere Gewalt) spiegeln sich Extremwetterereignisse wie der Orkan Kyrill wider. Dieser führte zu längeren witterungsbedingten Unterbrechungen im Jahr 2007. Generell bildet die Zeitreihe die hohe Versorgungssicherheit in Deutschland und NRW ab.

Stromausfälle im Januar 2007 – Auswirkungen und Schäden durch Orkan Kyrill

Dass Wetterextreme einen Einfluss auf die Stromversorgung haben, zeigte sich besonders deutlich im Januar des Jahres 2007. Der Orkan Kyrill, der seinen Höhepunkt am 17. und 18. Januar erreichte, traf Deutschland mit Windgeschwindigkeiten von mehr als 200 km/h (DWD 2007). Die Auswirkungen und Schäden des Orkans waren beträchtlich. Und: Sie betrafen auch die Stromversorgung.

So kam es in ganz Deutschland zu Stromausfällen. Weil Bäume oder Äste in Freileitungen stürzten und Hochspannungsmasten dem Orkan teilweise nicht standhalten konnten, waren mehrere hunderttausend Haushalte zeitweise ohne Strom. In Nordrhein-Westfalen fiel beispielsweise in Duisburg und Wuppertal in weiten Teilen der Stadtgebiete der Strom aus. Während Duisburg am 18. Jan-

uar um 18 Uhr Stromausfall in der Innenstadt und Rumeln-Kaldenhausen meldete (Grupe 2007), gingen in Wuppertal kurze Zeit später die Lichter aus (Westdeutsche Zeitung 2017). Allerdings konnten Techniker der Stadtwerke über Ersatzleitungen die Stromversorgung zeitnah wiederherstellen. In Sachsen-Anhalt hingegen fiel der Strom wegen Schäden im Hochspannungsnetz fast flächendeckend über mehrere Stunden aus (Welt 2007).

Um Stromleitungen gegen Stürme sowie Schnee- und Eislasten zu schützen, ist die unterirdische Verlegung (Verkabelung) eine wirksame Maßnahme. Als Planungsgrundsatz der Bundesfachplanung ist im Höchst- und Hochspannungsnetz seit 2015 für neue Leitungen der Vorrang der Erdverkabelung gesetzlich verankert (UBA 2019a).



18.3 Witterungsbedingt **geminderte Stromproduktion** **thermischer Kraftwerke**

I

Extremwetterereignisse führen zu verminderter Stromproduktion in thermischen Kraftwerken

Obwohl der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromversorgung in Deutschland stetig zunimmt, spielen thermische Kraftwerke noch eine wichtige Rolle im deutschen Energieversorgungssystem. Dies gilt besonders für Nordrhein-Westfalen, wo die Energieerzeugung überwiegend auf der Verstromung von Braun- und Steinkohle basiert. Aufgrund ihrer Funktionsweise sind thermische Kraftwerke auf die Abfuhr von Prozesswärme durch Kühlung angewiesen. Die Stromproduktion thermischer Kraftwerke

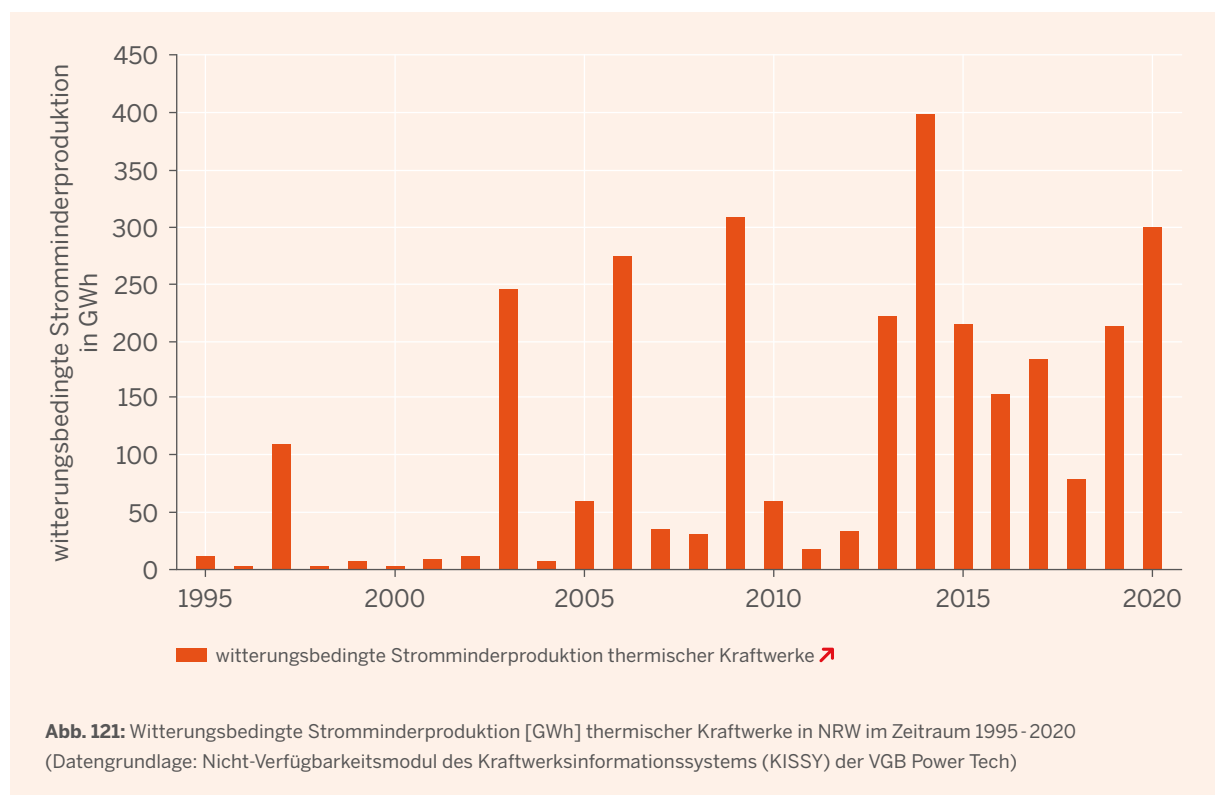
kann durch den Klimawandel eingeschränkt werden, wenn Wassertemperaturen wegen Hitze und Trockenheit ansteigen und die Einleitung von Kühlwasser in die Gewässer durch wasserrechtliche Auflagen begrenzt wird. Gleichzeitig können Starkregenereignisse die Stromproduktion beeinflussen, wenn sie beispielsweise den Feuchtegehalt gelagerter Braunkohle erhöhen oder physische Schäden an Anlagen verursachen.



In Nordrhein-Westfalen basiert die Stromerzeugung zu großen Teilen auf der Verstromung fossiler Energieträger. Thermische Kraftwerke sind daher von hoher Bedeutung für die Versorgungssicherheit in NRW. Die witterungsbedingte Stromminderproduktion thermischer Kraftwerke gibt an, wieviel elektrische Arbeit in diesen Kraftwerken aufgrund witterungsbedingter Einflüsse nicht erzeugt werden konnte. Dabei wurden die Witterungseinflüsse Hitze, Trockenheit sowie Sturm- und Starkregenereignisse berücksichtigt.

dem jährlichen Stromverbrauch einer kleineren Kommune in NRW. Die Datenreihe weist einen statistisch signifikant ansteigenden Trend auf. Die Stromminderproduktion in thermischen Kraftwerken, die auf Witterungsbedingungen zurückzuführen ist, nimmt demnach zu. Gleichzeitig ist der Anteil der Energiegewinnung aus thermischen Kraftwerken am Strommix in Nordrhein-Westfalen rückläufig (hier nicht dargestellt) und wird zukünftig an Relevanz verlieren.

Über den gesamten Zeitraum der Datenaufzeichnungen lässt sich eine durchschnittliche witterungsbedingte Stromminderproduktion von 116 GWh pro Jahr berechnen (Abbildung 121). Das entspricht in etwa





18.4 Wassereffizienz

thermischer Kraftwerke

R

Stromerzeugung und Kühlwasserentnahme nehmen ab

In heißen und trockenen Sommern kann es hinsichtlich der Verfügbarkeit von Kühlwasser für thermische Kraftwerke zu Einschränkungen kommen. Wenn die Wassertemperaturen der Gewässer wegen Hitze und Trockenheit steigen, verschlechtert sich der Wirkungsgrad der Kühlsysteme und Kraftwerke. Zudem greifen bei niedrigen Wasserständen und erhöhten Wassertemperaturen wasserrechtliche Auflagen, die durch Einschränkungen in der Kühl-

wasserentnahme bzw. der Einleitung von Kühlwasser in die Gewässer dazu führen können, dass Kraftwerksbetreiber die Stromproduktion drosseln oder sogar ganz einstellen müssen. Daher ist es wichtig, den Kühlwasserbedarf so weit wie möglich zu verringern bzw. durch den Einsatz von Kreislaufkühlsystemen dazu beizutragen, dass die Wassereffizienz thermischer Kraftwerke gesteigert wird.

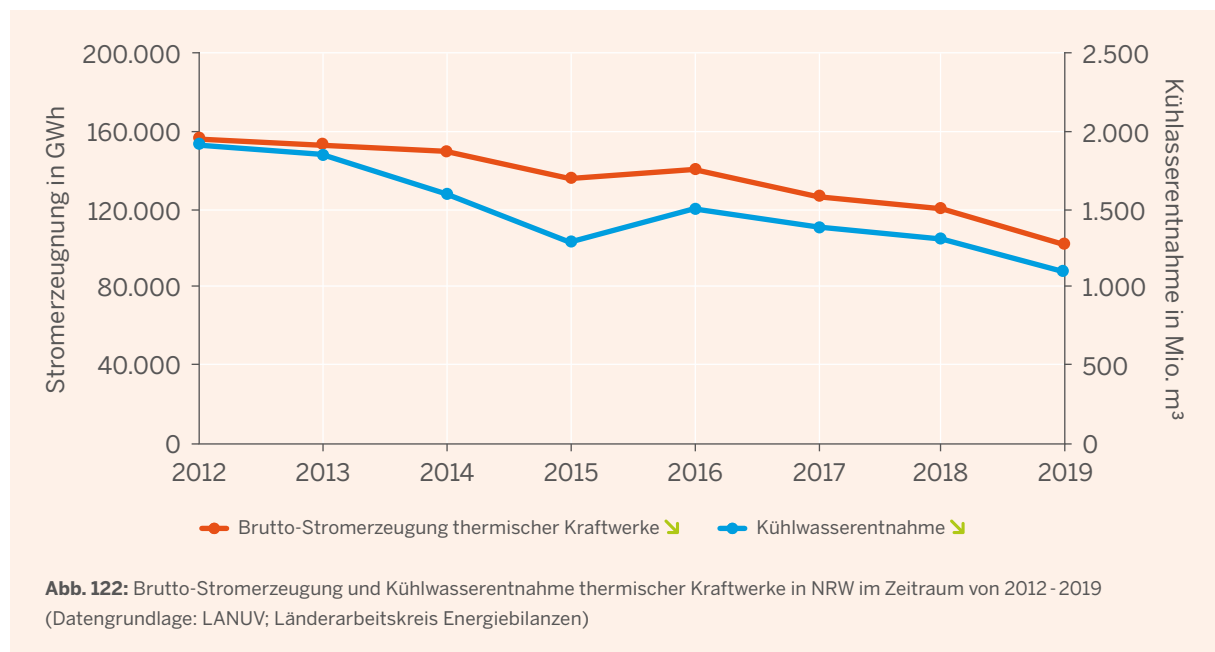


Abbildung 122 zeigt, dass die Brutto-Stromerzeugung thermischer Kraftwerke in NRW ebenso wie die Kühlwasserentnahme über den Zeitraum 2012 - 2019 rückläufig sind. Dies liegt an der zunehmenden Stilllegung von Kraftwerksblöcken. Die Wassereffizienz der sich noch im Betrieb befindlichen thermischen Kraftwerke scheint in der Tendenz leicht anzusteigen, was bedeutet, dass pro erzeugte Kilowattstunde erzeugten Stroms weniger Kubikmeter Kühlwasser benötigt werden (Abbildung 123). Die Trendberechnung zeigt bisher allerdings keine Signifikanz.

Abgesehen von der weiteren Stilllegung von Kraftwerken kann zukünftig für die weitere Entwicklung der Wassereffizienz von Bedeutung sein, welche Kraftwerksblöcke mit welchen Durchlaufkühlsystemen zuerst vom Netz gehen. Kraftwerke mit Durchlaufkühlsystem haben nämlich einen wesentlich höheren Kühlwasserbedarf als Kraftwerksblöcke, die über einen Kühlturm verfügen und so verwendetes Kühlwasser rückkühlen.

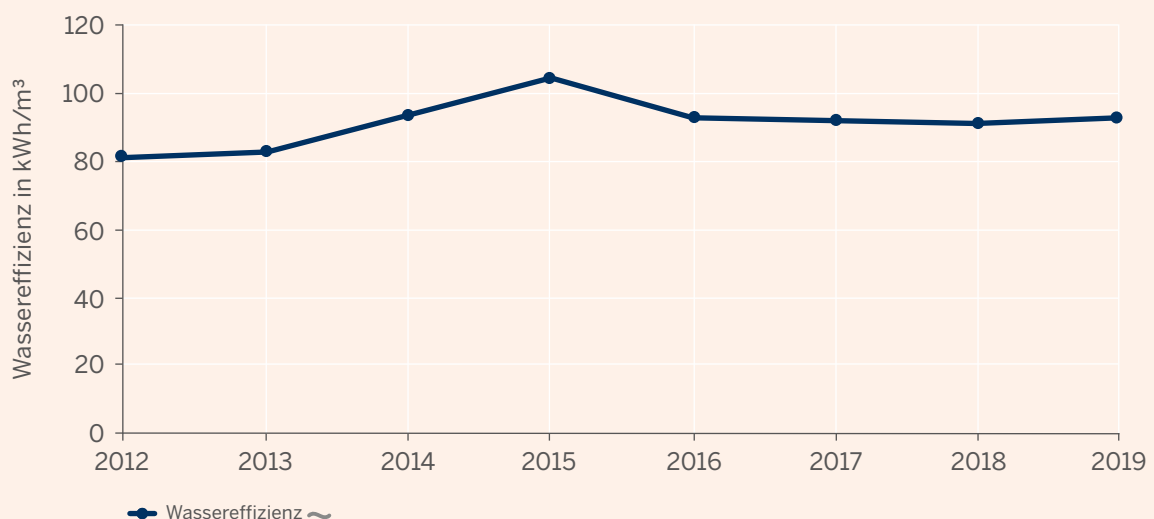


Abb. 123: Wassereffizienz thermischer Kraftwerke [kWh/m³] als Quotient aus Brutto-Stromerzeugung und Kühlwasserentnahme thermischer Kraftwerke in NRW im Zeitraum von 2012 - 2019 (Datengrundlage: LANUV; Länderarbeitskreis Energiebilanzen)



19. Tourismuswirtschaft

Der Klimawandel wirkt sich auf die Tourismusbranche in NRW unmittelbar aus. Wie die letzten Jahre gezeigt haben, verändern sich durch den Klimawandel Landschaften. Insbesondere in den Wäldern sind die Folgen der Trockenheit und der Hitze der vergangenen Jahre deutlich zu sehen. Die Landschaften sind häufig auch eine wesentliche Grundlage für den Tourismus in einer Region. Chancen durch stabilere Wetterlagen und steigende Temperaturen stehen Risiken durch häufiger auftretende Starkregenereignisse und Stürme, großen Problemen durch Trockenheit oder aber dem Verlust von Schneesicherheit entgegen. Für Wintersportangebote ist in NRW das nahegelegene Sauerland ein beliebtes Reiseziel. Die Höhenlagen bieten Angebote zum Skifahren, Rodeln oder Winterwandern. Die wärmeren Temperaturen wirken sich jedoch unmittelbar auf das Schneeangebot aus und könnten zukünftig immer häufiger zu Umsatzeinbußen führen. Das Kapitel Tourismuswirtschaft konzentriert sich im Folgenden auf den Bereich des Wintertourismus und nimmt dazu beispielhaft das sauerländische Winterberg und dessen Umgebung in den Blick.





Auswirkungen des Klimawandels

Die klimatischen Veränderungen, insbesondere die höheren Temperaturen, bewirken einen Rückgang der Schneetage, der Schneemenge und der natürlichen Schneesicherheit im Allgemeinen. Technische Beschneigungsmöglichkeiten können indes schneearme oder schneefreie Perioden überbrücken. Für die Produktion sind jedoch bestimmte Temperatur- und Feuchteverhältnisse nötig (OECD 2007). Ein Rückgang von Frosttagen kann die passenden Bedingungen für Beschneigungsmöglichkeiten erschweren und damit auch die Wintersportaktivitäten entsprechend beeinträchtigen.

Positive Effekte bringt der Klimawandel – auch im Sauerland – beispielsweise durch eine Verlängerung der Reisezeit für klassische Sommertourismusaktivitäten in den Herbst hinein bzw. schon ab dem Frühjahr oder auch durch Ganzjahresaktivitäten (zum Beispiel Wandern in den Mittelgebirgen). Die Mittelgebirge sind auch in den wärmeren Monaten eine touristische Alternative. Das Klima dort ist frischer und die heißen Temperaturen lassen eine touristische Aktivität eher zu, als beispielsweise in den Ballungsgebieten.

Indikatoren-Kernaussagen:

- Die Anzahl der Tage mit guten Naturschneebedingungen für den Wintersport ist in der Region Winterberg rückläufig.
- Trotz dieser Bedingungen steigen die Übernachtungszahlen in Winterberg an – sowohl im Winter als auch im Sommer.



Tab. 21: Übersicht der Indikatoren zum Handlungsfeld 19 „Tourismuswirtschaft“

Indikator		Einheit	räumliche Einheit	Zeitreihe	Mittelwert Zeitreihe	Trend Zeitreihe	
19.1 Schneedecke für den Wintersport	Schneedecke $\geq 15\text{cm}$	Tage im Jahr	Kahler Asten	1969/1970 - 2020/2021	72	~	
		Tage im Jahr	Willingen/Hochsauerland	2002/2003 - 2020/2021	27	↘	
		Tage im Jahr	Winterberg	1970/1971 - 2007/2008	48	~	
19.2 Übernachtungen in Wintersportorten	Übernachtungen im Winter	Anzahl im Jahr	Winterberg	2004/2005 - 2019/2020	498.316	↗	
	Übernachtungen im Sommer	Anzahl im Jahr	Winterberg	2004/2005 - 2019/2020	495.247	↗	
	Übernachtungen Gesamt	Anzahl im Jahr	Winterberg	2004/2005 - 2019/2020	993.562	↗	
	Saisonalität der Übernachtungen*	dimensionslos [-]	Winterberg	2004/2005 - 2019/2020	1,01	~	

* Saisonalität der Übernachtungen = Verhältnis zwischen Anzahl der Übernachtungen im Sommer zum Winter

↗ steigender Trend

↘ fallender Trend

↶↷ Trend mit Trendumkehr: zuerst fallend, dann steigend

↷↶ Trend mit Trendumkehr: zuerst steigend, dann fallend

~ kein Trend



↗ ↘ ↶ ↷ günstige Entwicklung

↗ ↘ ↶ ↷ ungünstige Entwicklung

↶ ↷ ↶ ↷ keine Bewertung der Entwicklung möglich oder gleichzeitig günstige und ungünstige Entwicklungsaspekte vorhanden



		Mittelwert der Klimanormalperioden			
	Änderung Zeitreihe	1970/1971 - 1999/2000	1980/1981 - 2009/2010	1990/1991 - 2019/2020	Querbezüge zu anderen Handlungsfeldern
	-	74	72	-	11 (S. 216), 15 (S. 256)
	-39	-	-	-	
	-	49	48	-	
	+ 214.739	-	-	-	11 (S. 216), 13 (S. 230), 15 (S. 256)
	+ 149.886	-	-	-	
	+ 336.228	-	-	-	
	-	-	-	-	



19.1 Schneedecke für den Wintersport

I

Die Anzahl der Tage mit guten natürlichen Bedingungen für den Wintersport ist rückläufig

Aufgrund der steigenden Temperaturen infolge des Klimawandels ist damit zu rechnen, dass die Schneemenge und die Anzahl der Schneetage in NRW zukünftig weiter abnehmen werden (Indikatoren 1.3 „Temperaturkentage kalt“ und 2.7 „Schneetage“). Hieraus können negative wirtschaftliche Folgen für den Skitourismus in den Mittelgebirgen NRWs entstehen, wenn der durch natürlichen Schneemangel bedingte Attraktivitätsverlust nicht durch techni-

sche Eingriffe oder alternative touristische Angebote ausgeglichen werden kann. Jeder Skiliftbetrieb bringt eine Wertschöpfungskette von einem großen Ausmaß in Bewegung. Arbeitsplätze hängen direkt und indirekt von einem erfolgreichen Skibetrieb ab und so erstreckt sich die Wertschöpfung vom Sessellift über die Gastronomie und Beherbergung bis zum Einzelhandel und im weiteren Verlauf bis zum Handwerk und zur Dienstleistungsbranche.

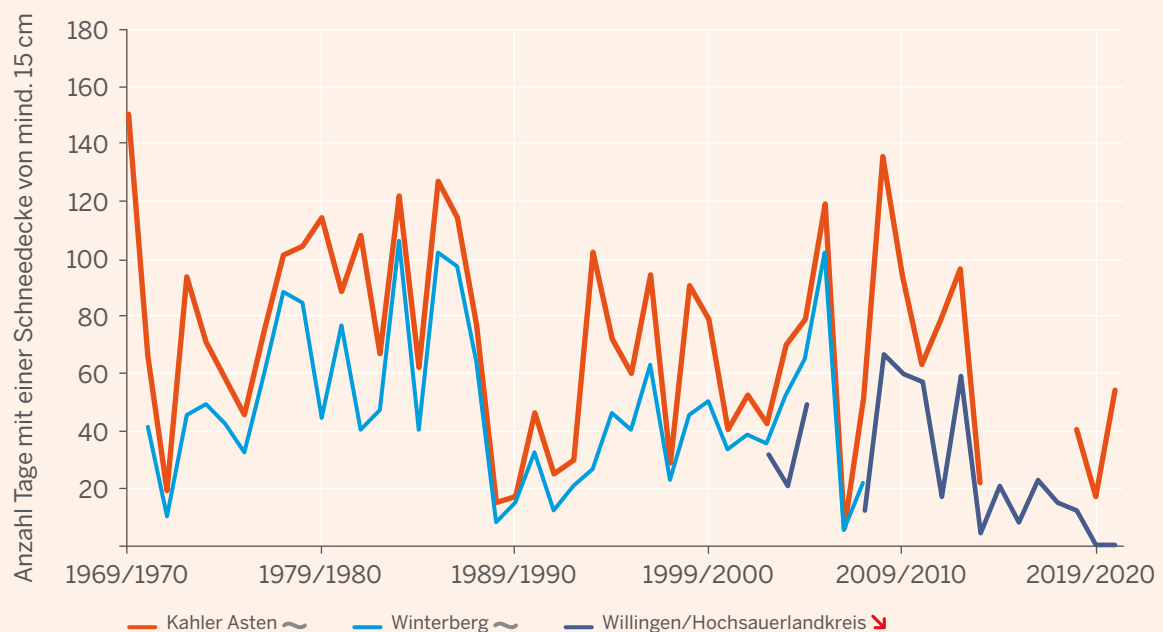


Abb. 124: Anzahl von Tagen mit einer Schneedecke von mindestens 15 cm während des Winters (November - April) an insgesamt drei Beobachtungsstationen im Sauerland um Winterberg und Schmallenberg herum von 580 m bis 838 m ü. NN im Zeitraum 1969/1979 - 2020/2021 (Datengrundlage: DWD)

Für den Wintersport sind in den Mittelgebirgen Schneedecken von 15 bis 20 cm notwendig. Unter diesen Bedingungen können alpine und nordische Angebote je nach Lage in guter Qualität vorgehalten werden (Borgmann 2021).

Um die Veränderungen der Schneehöhen für den Wintersport zu erfassen, werden die Skigebiete um Winterberg und Schmallenberg betrachtet (Abbildung 124). Mit Tagesdaten zu den Schneehöhen können Aussagen zu Schwankungen und Trends getroffen werden. Insgesamt wurden drei Beobachtungsstationen mit täglichen Schneehöhen für die Skigebiete um Winterberg und Schmallenberg untersucht. Alle untersuchten Stationen befinden sich im Höhenbereich des alpinen Skigebietes um Winterberg und Schmallenberg von 580 m bis 838 m über dem Meeresspiegel. Betrachtet wurde der Zeitraum Winter 1969/70 bis Winter 2020/2021. Die drei ausgewählten Stationen weisen leider jeweils verschiedene Ausfalljahre auf, die beiden Stationen Kahler Asten und Winterberg insbesondere am Ende der Zeitreihe. Möchte man einen möglichst langen Zeit-



raum betrachten, sind derzeit die Werte der Station Kahler Asten am aussagekräftigsten. Diese Zeitreihe der Anzahl der Tage mit einer Schneedecke von mindestens 15 cm zeigt sehr große Schwankungen seit den 70er Jahren. Jahre mit mehr als 100 Tagen wechseln sich – auch schon in der Vergangenheit – mit Jahren mit weniger als 20 natürlichen Schneetagen ab. Auf Basis dieser Zeitreihe zeigt sich bisher kein signifikanter Trend.



Wintersportarena Sauerland: Eine Region bietet dem Klimawandel die Stirn

Die Wintersport-Arena Sauerland ist der größte Skiverbund nördlich der Alpen und lockt jedes Jahr mit einer Skisaison von Dezember bis März zahlreiche Wintersportler an. Die attraktiven Skigebiete und 500 km Loipen bieten ein breites Spektrum an Wintersportmöglichkeiten.

In der Wintersport-Arena Sauerland gibt es 130 Liftanlagen und 300 Hektar Pisten. Mit der Wintersportarena haben sich die Skigebiete der Kreise Hochsauerland, Willingen, Siegerland-Wittgenstein und Olpe zusammengeschlossen, um gemeinsam den Wintersportlern ein breites Angebot bieten zu können. Um eine Skisaison von Dezember bis März mit durchschnittlich 80 bis 140 Wintersporttagen pro Saison sicherzustellen, sind viele der Pisten technisch beschneibar. Die Beschneigung funktioniert bei einer Wassertemperatur von ca. 3 °C, wobei die Beschneigung ebenfalls von der Lufttemperatur und -feuchtigkeit abhängig ist. Für das Sauerland ergibt sich bei einer Luftfeuch-

tigkeit von in der Regel über 90 % eine Lufttemperaturgrenze von -2 °C, welche zur technischen Beschneigung benötigt wird. Auf 83 Abfahrten herrschen so selbst dann gute Skibedingungen, wenn der Naturschnee auf sich warten lässt.

Durch die Professionalisierung des Wintersports (Pistenpflege, Beschneigung, Umrüstung auf Sessellifte etc.) liegt die Zahl der Skitage in den größeren Skigebieten heute stark über dem Angebot in den 70ern und 80ern (Abbildung 125). Die Zahl der Wintersporttage ist derzeit also nicht mehr so stark abhängig von der Witterung und kaum von der natürlichen Schneelage (Borgmann 2021). Wenngleich also ein Rückgang der natürlichen Schneemenge infolge des Klimawandels unbestreitbar ist, kann die Zahl der Wintersporttage so konstant hoch gehalten werden. Die Wintersportarena Sauerland setzt unter diesen Aspekten auf eine Wintersportmöglichkeit in den nächsten zwei bis drei Jahrzehnten.

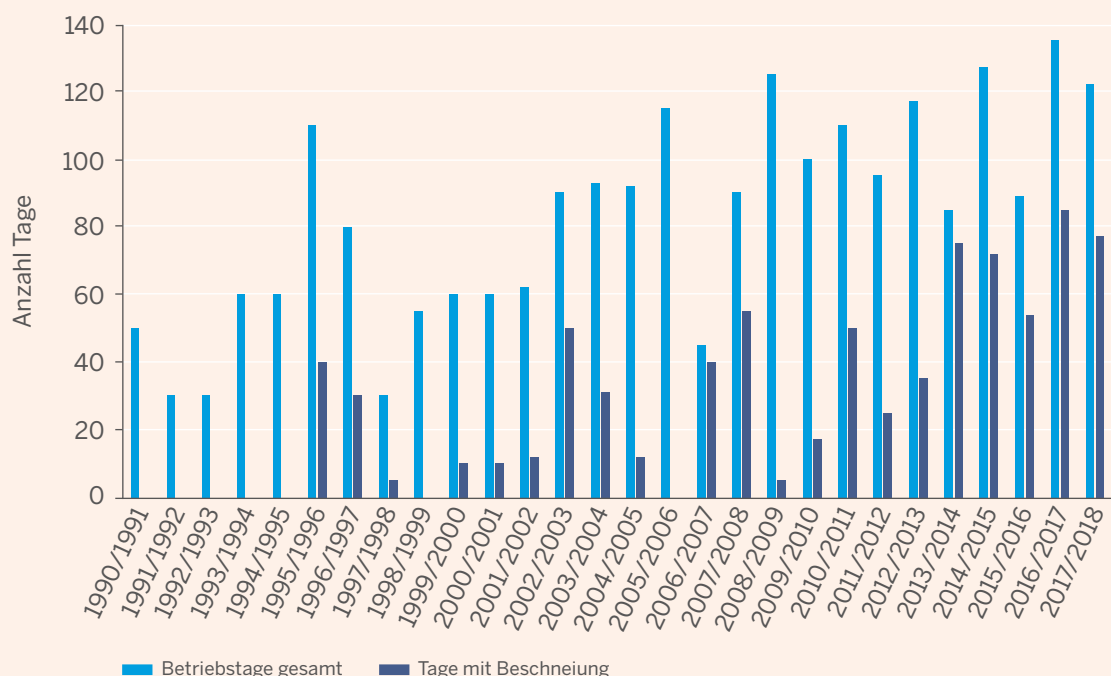


Abb. 125: Maximale Betriebstage (mindestens eine geöffnete Liftanlage) der Wintersport-Arena Sauerland und Tage mit Beschneigung im Zeitraum 1990/1991 bis 2017/2018 (Datengrundlage: Winterberg Touristik und Wirtschaft GmbH)



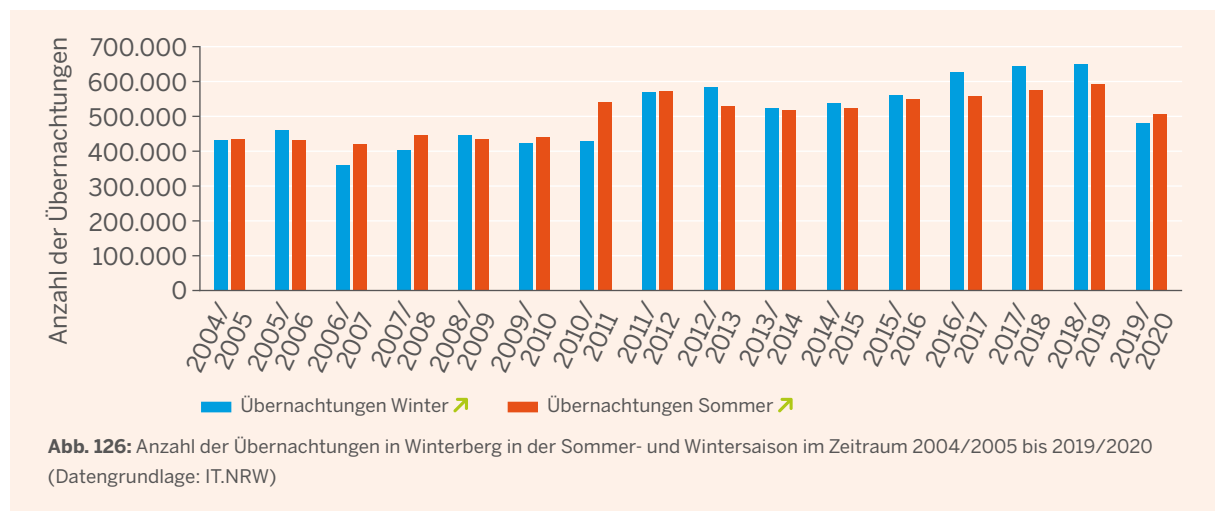
19.2 Übernachtungen in Wintersportorten



Ganzjahrestourismus mit steigenden Übernachtungszahlen im Sommer und Winter

Durch den Klimawandel wird sich die natürliche Schneesaison immer weiter verkürzen. Folglich könnten die Übernachtungszahlen in Wintersportorten sinken. Schwankungen zwischen schneereichen und schneearmen Wintern erschweren zudem eine langfristige Planung und können massive Ausfälle in den Übernachtungszahlen einzelner Jahre mit sich bringen.

Der Trend der warmen Winter könnte in Zukunft auch dazu führen, dass Urlauber von vornherein „schneesichere“ Gebiete bevorzugen und die Wintersportorte in NRW nicht mehr in Betracht ziehen. Durch die steigenden Temperaturen können sich für Wintersportorte aber vor allem in den wärmeren Monaten auch Chancen im Sommertourismus ergeben.



Bei Betrachtung der Anzahl der touristischen Übernachtungen in Winterberg ist festzustellen, dass diese seit Aufzeichnungsbeginn sowohl im Sommer als auch im Winter bis hin zu Rekordwerten im Jahr 2018/2019 statistisch signifikant ansteigen (Abbildung 126). Doch anders als mit Blick auf die verschlechterten natürlichen Bedingungen für den Wintersport vermutet, steigt allgemein die Anzahl der Übernachtungen in Winterberg an – sowohl in der Winter- als auch in der Sommersai-

son. Dies spricht dafür, dass es Winterberg trotz der erschwerten Bedingungen gelingt, weiterhin eine attraktive Tourismusdestination zu sein und sich mit den vorhandenen Angeboten zu einem Ganzjahresziel weiterentwickelt hat. Die Saison 2019/2020 war allerdings coronabedingt deutlich von Rückgängen bei den Übernachtungen betroffen. Hier wird abzuwarten sein, inwiefern sich die Pandemie auf die Übernachtungszahlen der folgenden Jahre auswirken wird.

Abkürzungsverzeichnis

ABAG	Allgemeine Bodenabtragsgleichung	FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
ALB	Automatisiertes Liegenschaftsbuch	FIS	Fachinformationssystem
ALKIS	Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem	FSK50	Forstliche Standortkarte im Maßstab 1:50.000
Anz.	Anzahl	FZ Jülich	Forschungszentrum Jülich
ASB	Allgemeine Siedlungsbereiche	GDV	Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.
ASP	Afrikanische Schweinepest	GIB	Bereiche für gewerbliche und industrielle Nutzungen
BauGB	Baugesetzbuch	GIW	Gleichwertiger Wasserstand
BEG	Bundesförderung für effiziente Gebäude	HSW	Höchster Schifffahrtswasserstand
BEW	Bildungszentrum für die Ver- und Entsorgungswirtschaft	IKSR	Internationale Kommission zum Schutz des Rheins
Bft	Beaufort	IM NRW	Ministerium des Innern des Landes Nordrhein-Westfalen
BHKG	Gesetz über den Brandschutz, die Hilfeleistung und den Katastrophenschutz	IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change, Weltklimarat
BK50	Bodenkarte für NRW im Maßstab 1:50.000	ISB	Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr der RWTH Aachen
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung	IT.NRW	Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft	KFAM	Klimafolgen und Anpassungsmonitoring
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit	KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
BNE	Bildung für Nachhaltige Entwicklung	KISSY	Nicht-Verfügbarkeitsmodul des Kraftwerksinformationsdienstes der VGB Power-Tech
BNetzA	Bundesnetzagentur	KIAnG	Klimaanpassungsgesetz Nordrhein-Westfalen
CO₂	Kohlenstoffdioxid	KNP	Klimanormalperiode
DAS	Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel	LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
DB	Deutsche Bahn	LIPP	Stationskürzel für die Messstation Bad Lippspringe
DGM10	Digitales Geländemodell Gitterweite 10 m	LMSS	Stationskürzel für die Messstation Ludger-Mintrop-Stadtklima-Station in Bochum
DPSIR	Driving forces, Pressures, States, Impacts and Responses. Modell zur Darstellung von Umweltbelastungen und Umweltschutzmaßnahmen	LUQS	Luftqualitätsüberwachungssystem des Landes Nordrhein-Westfalen
DWD	Deutscher Wetterdienst	mGROWA	Wasserhaushaltsmodell
EAN	European Article Number	mGROWA+ NRW 2021	Projekt: Regionalisierte Quantifizierung der diffusen Stickstoff- und Phosphoreinträge in das Grundwasser und die Oberflächengewässer Nordrhein-Westfalens
eEV	erweiterte Elementarschadenversicherung	mHM	mesoskaliges hydrologisches Modell
Einw.	EinwohnerInnen	mNHN	Meter über Normalhöhennull
ELWAS	elektronisches wasserwirtschaftliches Verbundsystem: Wasserinformationssystem des Landes Nordrhein-Westfalen		
EPS	Eichenprozessionsspinner		
EU	Europäische Union		
ExUS	Extremwertstatistische Untersuchung von Starkniederschlägen in NRW		

MOEN	Stationskürzel für die Messstation Mönchengladbach	VGB	Wilhemstraße in Aachen PowerTech - internationaler Interessenverband von Unternehmen aus der Elektrizitäts- und Wärmeversorgungsbranche
MULNV	Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen	VKTU	Stationskürzel für die Messstation Turiner Straße in Köln
nFK	nutzbare Feldkapazität	WasEG	Gesetz über die Erhebung eines Entgelts für die Entnahme von Wasser aus Gewässern (Wasserentnahmeentgeltgesetz des Landes Nordrhein-Westfalen)
NKI	Nationale Klimaschutzinitiative des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU)	WMO	World Meteorological Organization
NRW	Nordrhein-Westfalen	WRRL	Wasserrahmenrichtlinie
O₃	Ozon	WSV	Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes
ÖFS	Ökologische Flächenstichprobe	WWJ	Wasserwirtschaftsjahr
OGewV	Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung)		
PET	physiologische Äquivalenttemperatur		
PID	Polleninformationsdienst		
PKW	Personenkraftwagen		
RADOLAN	Radar-Online-Aneichung		
RCP	representative concentration pathway, repräsentativer Konzentrationspfad zur Beschreibung von Szenarien basierend auf dem veränderten Strahlungsantrieb ggü. vorindustrieller Zeit		
ReKliEs-De	Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland		
RGS	Stationskürzel für die Messstation Rudolf-Geiger-Freilandklima-Station in Bochum		
RUB	Ruhr-Universität Bochum		
SMI	Soil Moisture Index, Bodenfeuchteindex		
SPI	Standardized Precipitation Index, Standardisierter Niederschlagsindex		
SWR	Südwestrundfunk		
Tereno	Terrestrial Environmental Observatories		
THI	temperature-humidity index, luftfeuchte-korrigierter Hitzestressindex		
THW	Bundesanstalt Technisches Hilfswerk		
UBA	Umweltbundesamt		
UFZ	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung		
UHI	Urban Heat Island		
UHII	Urban Heat Island Intensity		
UTC	Coordinated Universal Time, koordinierte Weltzeit		
VACW	Stationskürzel für die Messstation		

Literaturverzeichnis

an der Heiden, M., Muthers, S., Niemann, H., Buchholz, U., Grabenhenrich, L. & Matzarakis, A. (2019):

Schätzung hitzebedingter Todesfälle in Deutschland zwischen 2001 und 2015.

In: Bundesgesundheitsblatt 62 (5), S. 571-579.

DOI: 10.1007/s00103-019-02932-y.

an der Heiden, M., Muthers, S., Niemann, H., Buchholz, U., Grabenhenrich, L. & Matzarakis, A. (2020):

Heat-Related Mortality. In: Deutsches Ärzteblatt international 117 (37), S. 603-609. DOI: 10.3238/arztebl.2020.0603.

Arnold, W., Ruf, T., Reimoser, S., Tataruch, F.,

Underscheka, K. & Schober, F. (2004): Nocturnal hypometabolism as an overwintering strategy of red deer (*Cervus elaphus*). *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* 286: R 174 – R 181.

Arrhenius, Svante (1896): On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. In: *Philosophical Magazine and Journal of Science (Series 5, Volume 41)*, S. 237-276. http://www.rsc.org/images/Arrhenius1896_tcm18-173546.pdf (07.10.2021).

Bezirksregierung Arnsberg (o.J.): Umgestaltung der Ruhr in Witten und Wette.

https://www.bra.nrw.de/system/files/media/document/file/umgestaltung_ruhr_witten_wetter_0.pdf (25.10.2021).

BfG – Bundesanstalt für Gewässerkunde (2019):

Das Niedrigwasser 2018. https://www.bafg.de/DE/05_Wissen/04_Pub/04_Buecher/niedrigwasser_2018_dokument.pdf?__blob=publicationFile (09.06.2021).

Bissolli, P., Deutschländer, T., Imbery, F., Haeseler, S., Lefebvre, C., Blahak, J., Fleckenstein, R., Breyer, J., Rocek, M., Kreienkamp, F., Rösner, S. & Schreiber, K.-J. (2019): Hitzewelle Juli 2019 in Westeuropa –

neuer nationaler Rekord in Deutschland. https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondere-ereignisse/temperatur/20190801_hitzerekord_juli2019.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (07.10.2021).

BLE – Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (2021):

Waldbrandstatistik. https://www.ble.de/DE/BZL/Daten-Berichte/Wald/wald_node.html (07.10.2021).

BMEL – Bundesministerium für Ernährung und

Landwirtschaft (2021): Afrikanische Schweinepest (ASP): Informationen zu Fällen in Deutschland.

<https://www.bmel.de/DE/themen/tiere/tiergesundheit/tierseuchen/asp.htm> (07.10.2021).

Bogena, H. R., Montzka, C., Huisman, J. A., Graf, A., Schmidt, M., Stockinger, M., von Hebel, C., Hendricks-Franssen, H.J., van der Kruk, J., Tappe, W., Lücke, A., Baatz, R., Bol, R., Groh, J., Pütz, T., Jakobi, J., Kunkel, R., Sorg, J. & Vereecken, H.

(2018): The TERENO-Rur Hydrological Observatory: A Multiscale Multi-Compartment Research Platform for the Advancement of Hydrological Science. In: *Vadose Zone Journal* 17 (1), S. 180055. DOI: 10.2136/vzj2018.03.0055.

Bohmanova, J., Misztal, I. & Cole, J. B. (2007):

Temperature-humidity indices as indicators of milk production losses due to heat stress. In: *Journal of dairy science* 90 (4), S. 1947-1956. DOI: 10.3168/jds.2006-513.

Borgmann, W. (2021): Auskunft von Winfried

Borgmann, Geschäftsführer Winterberg Touristik und Wirtschaft GmbH, E-Mail vom 16.06.2021.

Bräsicke, N. (2013): Ökologische Schäden, gesundheitliche Gefahren und Maßnahmen zur Eindämmung des Eichenprozessionsspinners im Forst und im urbanen Grün. Veranstaltung des Julius Kühn-Institutes und des Bundesinstitutes für Risikobewertung zum Thema „Prozessionsspinner 2012 – Fakten, Folgen, Strategien“.

Quedlinburg: Julius Kühn-Inst. Bundesforschungsinst. für Kulturpflanzen (Julius-Kühn-Archiv, 440). <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:3:2-68608> (06.09.2021).

Cohen, J., Screen, J. A., Furtado, J. C., Barlow, M., Whittleston, D., Coumou, D., Francis, J., Dethloff, K., Entekhabi, D., Overland, J. & Jones, J. (2014):

Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. In: *Nature Geosci* 7 (9), S. 627-637. DOI: 10.1038/ngeo2234.

Coumou, D., Di Capua, G., Vavrus, S., Wang, L. & Wang, S. (2018): The influence of Arctic amplification on mid-latitude summer circulation. In: Nature communications 9 (1), S. 2959. DOI: 10.1038/s41467-018-05256-8.

DAFV – Deutscher Angelfischerverband e.V.

(2018): Zu viel C, zu wenig O. Unsere heimischen Fische kommen an ihre Grenzen. <https://www.dafv.de/referate/gewaesser-und-naturschutz/item/228-zu-viel-c-zu-wenig-o-unsere-heimischen-fische-kommen-an-ihre-grenzen> (25.10.2021).

Dai, A., Luo, D., Song, M. & Liu, J. (2019): Arctic amplification is caused by sea-ice loss under increasing CO₂. In: Nature communications 10 (1), S. 121. DOI: 10.1038/s41467-018-07954-9.

Damialis, A., Traidl-Hoffmann, C. & Treudler, R.

(2019): Climate Change and Pollen Allergies. In: Biodiversity and Health in the Face of Climate Change, Bd. 18. Cham: Springer International Publishing, S. 47 - 66.

DB – Deutsche Bahn (2021a): Extremwetter. <https://www.deutschebahn.com/pr-hamburg-de/DB-Themenwelten/Extremwetter-6161346> (25.10.2021).

DB – Deutsche Bahn (2021b): Klimaschutz. <https://gruen.deutschebahn.com/de/strategie/strategie-klimaschutz> (25.10.2021).

Destatis – Statistisches Bundesamt (2021): Güterverkehrsstatistik der Binnenschifffahrt. Dezember 2020. https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Gueterverkehr/Publikationen/Downloads-Schifffahrt/binnenschifffahrt-monat-2080400201124.pdf?__blob=publicationFile (25.10.2021).

DIN 19708 (2005): Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mithilfe der ABAG, Normenausschuss Wasserwesen im DIN, Berlin.

Don, A., Flessa, H., Marx, K., Poeplau, C., Tiemeyer, B. & Osterburg, B. (2018): Die 4-Promille-Initiative „Böden für Ernährungssicherung und Klima“ – Wissenschaftliche Bewertung und Diskussion möglicher Beiträge in Deutschland. Thünen Working Paper 112. https://literatur.thuenen.de/digibib_extern/dn060523.pdf (07.10.2021).

DWD – Deutscher Wetterdienst (2007):

Beschreibung und klimatologische Bewertung des Orkantiefs „Kyrill“. https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/stuerme/20070118_orkan_kyrill.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (10.07.2021)

DWD – Deutscher Wetterdienst (2016): Gefährliche Wetterereignisse und Wetterschäden in Deutschland 2016. https://rcccm.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2016/20161208_schadenrueckblick.html (07.10.2021).

DWD – Deutscher Wetterdienst (2017): Erst fröhlich warm und trocken, dann Schnee und Spätfröste. https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2017/20170428_deutschlandwetter_april.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (07.10.2021).

DWD – Deutscher Wetterdienst (2018): Gefährliche Wetterereignisse und Wetterschäden in Deutschland 2018. https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2018/20181213_schadensrueckblick2018_news.html (07.10.2021).

DWD – Deutscher Wetterdienst (2019): Historische monatliche Gradtage nach VDI 3807 für Deutschland -Datensatzbeschreibung. Offenbach a. Main (08.06.2021).

DWD – Deutscher Wetterdienst (2020a): DWD Climate Data Center (CDC), Zeitreihen für Gebietsmittel für Bundesländer und Kombinationen von Bundesländer. https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/regional_averages_DE/monthly/air_temperature_mean/ (07.10.2021)

DWD – Deutscher Wetterdienst (2020b): DWD-Stationen Duisburg-Baerl und Tönisvorst jetzt Spitzenreiter mit 41,2 Grad Celsius. https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2020/20201217_annulierung_lingen_news.html (07.10.2021).

DWD – Deutscher Wetterdienst (2020c):

Standardized Precipitation Index (SPI).
<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=102248&lv3=603324> (25.10.2021).

DWD – Deutscher Wetterdienst (2020d):

Warnkriterien. https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/kriterien/warnkriterien.html?nn=605882 (07.10.2021).

DWD – Deutscher Wetterdienst (2021a):

Datensatzbeschreibung – Monatliche Raster der mittleren Bodenfeuchte unter Gras und sandigem Lehm. Deutscher Wetterdienst DWD.
https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/monthly/soil_moist/BE-SCHREIBUNG_gridsgermany_monthly_soil_moist_de.pdf (07.10.2021).

DWD – Deutscher Wetterdienst (2021b): Glossar.

Klima-Michel-Modell. <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=-101334&lv3=101438> (07.10.2021).

DWD – Deutscher Wetterdienst (2021c): Spätfrost.

<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=102248&lv3=622782> (07.10.2021).

Elhaus, D., Winterrath, T., Auerswald & K., Fischer, F. (2019): Klimawandel und Bodenerosion – Neue Erkenntnisse zur Regenerosivität und Konsequenzen für die Abschätzung der Erosionsgefährdung.

In: Bodenschutz 24 (4), S. 136 - 141.

Energieagentur NRW (2021): Aktion holz+pellets:

Klima, Wald und Schadholz
<https://www.aktion-holzpellets.de/wissen/schadholz/> (07.10.2021).

FAZ – Frankfurter Allgemeine Zeitung (2018):

Dutzende Verletzte bei Brand in Siegburg. In FAZ.
<https://www.faz.net/aktuell/gesellschaft/siegburg-viele-verletzte-bei-brand-ice-strecke-gesperrt-15727162.html#void> (07.10.2021).

Finger, R., Dalhaus, T., Allendorf, J. & Hirsch, S. (2018):

Determinants of downside risk exposure of dairy farms. In: European Review of Agricultural Economics 45 (4), S. 641 - 674. DOI: 10.1093/erae/jby012.

Fransen, J. J. (2013): Leitfaden zur Eindämmung des Eichenprozessionsspinners. Übersetzung aus dem Niederländischen. Hrsg: Niederländische Behörde für Lebensmittelsicherheit und Verbraucherschutz. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/417/dokumente/leitfaden_eps_nl_deutsch.pdf (07.10.2021).

GD NRW – Geologischer Dienst NRW (2020):

Forstliche Standortkarte im Maßstab 1:50.000 (FSK50). WMS Dienst: www.geoportal.nrw/?wms=https://www.wms.nrw.de/gd/fsk050.

GDV – Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (2018): Aschau in Bayern hält mit

115 Stunden Deutschlands Starkregenrekord.
<https://www.gdv.de/de/medien/aktuell/aschau-ist-deutschlands-starkregen-hochburg-33570> (07.10.2021).

GDV – Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (2019): Hagelregister, Schäden durch Hagel.

<https://www.gdv.de/de/themen/schaeden-durch-hagel-51366> (07.10.2021).

GDV – Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (2021a): Flutkatastrophe: Bereits

1,5 Milliarden Euro an Versicherte ausgezahlt.
<https://www.gdv.de/de/medien/aktuell/flutkatastrophe--bereits-1-5-milliarden-euro-an-versicherte-ausgezahlt--70736> (04.11.2021)

GDV – Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (2021b): Serviceteil zum Natur-

gefahrenreport 2021.
<https://www.gdv.de/resource/blob/71296/4682dd50c4ffdedb048e56020213f35e/download-serviceteil-naturgefahren-report-data.pdf> (21.10.2021)

GDV – Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (2021c): Teuerstes Naturgefahren-

jahr überhaupt – Schaden- und Unfallversicherer rutschen in die roten Zahlen. <https://www.gdv.de/de/medien/aktuell/teuerstes-naturgefahren-jahr-ueberhaupt---schaden--und-unfallversicherer-rutschen-in-die-roten-zahlen--70148> (04.11.2021)

GDV – Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (2021d): Versicherungsschäden

durch Flutkatastrophe bei rund sieben Milliarden Euro. <https://www.gdv.de/de/medien/aktuell/versicherungsschaeden-durch-flutkatastrophe-bei-rund-sieben-milliarden-euro-69800>

GFZ Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum (2021): Earth System

Knowledge Platform. Rekord-Hagelkorn in Reutlingen gefunden. <https://www.eskp.de/naturgefahren/rekord-hagelkorn-in-reutlingen-gefunden-935341/> (07.10.2021).

Graham, R. M., Cohen, L., Petty, A. A., Boisvert, L. N., Rinke, A., Hudson, S. R., Nicolaus, M. & Granskong, M.A. (2017): Increasing frequency and duration of

Arctic winter warming events.
In: *Geophys. Res. Lett.* 44 (13), S. 6974 - 6983.
DOI: 10.1002/2017GL073395.

Grunewald, K., Richter, B., Meinel, G., Herold, H. & Syrbe, R.-U. (2016): Vorschlag bundesweiter Indikatoren zur Erreichbarkeit öffentlicher Grünflächen. Bewertung der Ökosystemleistung „Erholung in der Stadt“. In: *Naturschutz und Landschaftsplanung* 48 (7), 2016, 218 - 226.

Grupe, D. (2007): Duisburg im Sturm ohne Strom.
In: *Rheinische Post Online*, 18.01.2007.
https://rp-online.de/nrw/staedte/duisburg/im-sturm-ohne-strom_aid-11400943 (07.10.2021).

Haftenberger, M., Laußmann, D., Ellert, U., Kalcklösch, M., Langen, U., Schlaud, M., Schmitz, R. & Thamm, M. (2013): Prävalenz von Sensibilisierungen gegen Inhalations- und Nahrungsmittelallergene: Ergebnisse der Studie zur Gesundheit Erwachsener in Deutschland (DEGS1). In: *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz* 56 (5 - 6), S. 687 - 697.
DOI: 10.1007/s00103-012-1658-1.

Hansen, J., Sato, M., Kharecha, P., von Schuckmann, K., Beerling, D. J., Cao, Marcott, J.J., Masson-Delmotte, V., Prather, M. J., Rohling, E.J., Shakun, J., Smith, P., Lacis, A., Russell, G., & Ruedy, R. (2017): Young people's burden. Requirement of negative CO₂ emissions. In: *Earth Syst. Dynam.* 8 (3), S. 577 - 616. DOI: 10.5194/esd-8-577-2017.

Hellberg-Rode, G. (2004): Bodendichte – hypersoil uni-muenster.de. Zentrum für Didaktik der Biologie, Westfälische Wilhelms-Universität Münster. <https://hypersoil.uni-muenster.de/0/05/01.htm> (07.10.2021).

Herrmann, F. & Wendland, F. (2021a): mGROWA Simulationen für NRW. Klimatologische Simulation 1961 - 2020. Stand zum Wasser- und Dürremonitor.

Herrmann, F., Wolter, T. & Wendland, F. (2021b):

Projektionen der Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserneubildung in NRW. Jülich Forschungszentrum.

Hofmann, R. R. (1985): Digestive Physiology of the Deer – Their Morphophysiological Specialisation and Adaption. *Biology of the Deer Production*. The Royal Society of New Zealand, Bulletin, 22: 393 - 407.

Hofmann, R., R. (1989): Evolutionary Steps of ecophysiological adaption and diversification of ruminants: a comparative view of their Digestive System. *Öcologia* 78, S. 443 - 457.

Holzbau Deutschland (2021): Kalamitätsholz konstruktiv nutzen. https://www.holzbau-deutschland.de/aktuelles/presseinformation/ansicht/detail/kalamitaetsholz_konstruktiv_nutzen/ (07.10.2021).

Hübener, H., Bülow, K., Fooker, C., Früh, B., Hoffmann, P., Höpp, S., Keuler, K., Menz, C., Mohr, V., Radtke, K., Ramthun, H., Spekat, A., Steger, C., Toussaint, F., Warrach-Sagi, K. & Woldt, M. (2017):

ReKliEs-De – Ergebnisbericht.
<https://reklies.hlnug.de/fileadmin/tmpl/reklies/dokumente/ReKliEs-De-Ergebnisbericht.pdf> (10.07.2021).

IKSR – Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (2006): Vergleich der Wärmeeinleitungen 1989 und 2004 entlang des Rheins. IKS-R-Bericht Nr. 151d.

IKSR – Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (2013): Darstellung der Entwicklung der Rheinwassertemperaturen auf der Basis validierter Temperaturmessungen von 1978 bis 2011. IKS-R-Bericht Nr. 209.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2007): Climate Change 2007 – The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2019): Climate Change and Land. An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Summary for Policymakers.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2021): Climate Change 2021.

The Physical Science Basis – Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 2021.

IM NRW – Ministerium des Innern des Landes

Nordrhein-Westfalen (2020): Gefahrenabwehr in

Nordrhein-Westfalen. Jahresbericht 2019.

<https://www.im.nrw/system/files/media/document/file/gab2019-0412.pdf> (07.10.2021).

IT.NRW – Information und Technik Nord-

rhein-Westfalen (2017): NRW (ge)zählt: Landwirt-

schaft in Nordrhein-Westfalen. Ergebnisse der Agrarstrukturhebung 2016.

<https://webshop.it.nrw.de/gratis/Z249%20201754.pdf> (07.10.2021).

IT.NRW – Information und Technik Nordrhein-

Westfalen (2020): Exportmenge von Rohholz ist

in NRW im ersten Halbjahr 2020 um 57,5 %

gestiegen. [https://www.it.nrw/exportmenge-](https://www.it.nrw/exportmenge-von-rohholz-ist-nrw-im-ersten-halbjahr-2020-um-575-prozent-gestiegen-100938)

[von-rohholz-ist-nrw-im-ersten-halbjahr-2020-um-575-prozent-gestiegen-100938](https://www.it.nrw/exportmenge-von-rohholz-ist-nrw-im-ersten-halbjahr-2020-um-575-prozent-gestiegen-100938) (07.10.2021).

IT.NRW – Information und Technik Nordrhein-

Westfalen (2021): Nadelholzeinschlag im Jahr 2020

mehr als verdoppelt – 96,8 Prozent war Schad-

holz. [https://www.it.nrw/exportmenge-von-](https://www.it.nrw/exportmenge-von-rohholz-ist-nrw-im-ersten-halbjahr-2020-um-575-prozent-gestiegen-100938)

[rohholz-ist-nrw-im-ersten-halbjahr-2020-um-575-prozent-gestiegen-100938](https://www.it.nrw/exportmenge-von-rohholz-ist-nrw-im-ersten-halbjahr-2020-um-575-prozent-gestiegen-100938) (07.10.2021).

Jansen, E., Hesselbjerg Christensen, J., Dokken, T., Nisancioglu, K. H., Vinther, B. M., Capron, E., Guo, C., Jensen, M.F., Langen, P.L., Pedersen, R.A., Yang, S., Bentsen, M., Kjær, H.A., Sadatzki, H., Sessford, E. & Stendel, M. (2020): Past perspectives on the

present era of abrupt Arctic climate change.

In: *Nature Clim Change* 10 (8), S. 714 - 721.

DOI: 10.1038/s41558-020-0860-7.

Kleinbauer, I., Dullinger, S., Klingenstein, F., May, R., Nehring, S. & Essl, F. (2010): Ausbreitungspotenzial

ausgewählter neophytischer Gefäßpflanzen unter Klimawandel in Deutschland und Österreich.

BfN-Skripten 275.

Klose, M. (2019): Serie „Wasser ist Leben“ – Rhein stellt Industrie in Wesseling vor Herausforderungen. *Kölner Stadt-Anzeiger* (online) vom 14.9.2019. <https://www.ksta.de/region/rhein-erft/wesseling/serie--wasser-ist-leben--rhein-stellt-industrie-in-wesseling-vor-herausforderungen-33166616> (09.06.2021)

Köppen, W. (1936): Das geographische System der Klimate. In: *Handbuch der Klimatologie*. I, Teil C, Gebrüder Borntraeger, Berlin 1936.

Kotera, Y., Richardson, M. & Sheffield, D. (2020):

Effects of Shinrin-Yoku (Forest Bathing) and Nature Therapy on Mental Health: a Systematic Review and Meta-analysis. In: *Int J Ment Health Addiction*. DOI: 10.1007/s11469-020-00363-4.

Kühnau, C., Böhm, J., Reinke, M., Böhme, C. &

Bunzel, A. (2016): Doppelte Innenentwicklung –

Perspektiven für das urbane Grün – Empfehlungen für Kommunen. Broschüre des Bundesamtes für Naturschutz (BfN). https://www.bfn.de/fileadmin/BfN/planung/siedlung/Dokumente/DOPI_Brosch.pdf (07.10.2021).

Landesregierung Nordrhein-Westfalen (2018):

Hitzeperiode dauert an. Umweltministerium er-

wartet kritische Wassertemperaturen für Flüsse und Fische. [https://www.land.nrw/de/pressemit-](https://www.land.nrw/de/pressemitteilung/hitzeperiode-dauert-umweltministerium-erwartet-kritische-wassertemperaturen-fuer)

[teilung/hitzeperiode-dauert-umweltministerium-](https://www.land.nrw/de/pressemitteilung/hitzeperiode-dauert-umweltministerium-erwartet-kritische-wassertemperaturen-fuer)

Landesregierung Nordrhein-Westfalen (2021a):

Afrikanische Schweinepest: Gefahr der Einschleppung nach Nordrhein-Westfalen weiterhin

hoch. [https://www.land.nrw/de/pressemit-](https://www.land.nrw/de/pressemitteilung/afrikanische-schweinepest-gefahr-der-einschleppung-nach-nordrhein-westfalen)

[teilung/afrikanische-schweinepest-gefahr-der-](https://www.land.nrw/de/pressemitteilung/afrikanische-schweinepest-gefahr-der-einschleppung-nach-nordrhein-westfalen)

Landesregierung Nordrhein-Westfalen (2021b):

Hochwasserschutz wichtiger Baustein der Klima-

folgenanpassung. [https://www.land.nrw/de/](https://www.land.nrw/de/pressemitteilung/hochwasserschutz-wichtiger-baustein-der-klimafolgenanpassung)

[pressemitteilung/hochwasserschutz-wichtiger-](https://www.land.nrw/de/pressemitteilung/hochwasserschutz-wichtiger-baustein-der-klimafolgenanpassung)

Landesregierung Nordrhein-Westfalen (2021c):

Wald, Wetter und Klimawandel: Waldbrandgefahr

im Frühling – Lichtblicke bei Borkenkäfer Befall.

[https://www.land.nrw/de/pressemitteilung/](https://www.land.nrw/de/pressemitteilung/wald-wetter-und-klimawandel-waldbrandgefahr-im-fruehling-lichtblicke-bei%20)

[wald-wetter-und-klimawandel-waldbrandgefahr-](https://www.land.nrw/de/pressemitteilung/wald-wetter-und-klimawandel-waldbrandgefahr-im-fruehling-lichtblicke-bei%20)

LANUV – Landesamt für Natur, Umwelt und Ver-

braucherschutz Nordrhein-Westfalen (2010):

„Klima und Klimawandel in Nordrhein-Westfalen –

Daten und Hintergründe“. LANUV-Fachbericht 27.

[https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/](https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/30027.pdf)

[3_fachberichte/30027.pdf](https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/30027.pdf) (07.10.2021).

LANUV – Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2013):

Klimawandelgerechte Metropole Köln – Abschlussbericht. LANUV-Fachbericht 50. https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/30050.pdf (15.11.2021).

LANUV – Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2015):

Kühlleistung von Böden. Leitfaden zur Einbindung in stadtklimatische Konzepte in NRW. https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/4_arbeitsblaetter/arbla29/LANUV-Arbeitsblatt%2029_web.pdf (07.10.2021).

LANUV – Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2016):

Klimawandel und Klimafolgen in Nordrhein-Westfalen – Ergebnisse aus den Monitoringprogrammen. LANUV-Fachbericht 74. https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/fabe74.pdf (07.10.2021).

LANUV – Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2018):

Klimaanalyse NRW. LANUV-Fachbericht 86. https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/Fachbericht_86-Klimaanalyse_web-gesichert.pdf (07.10.2021).

LANUV – Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2020):

Wieder ein warmer und trockener Sommer – Auswirkungen auf den Wasserhaushalt in NRW. Das hydrologische Sommerhalbjahr 2020. https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/wasser/pdf/SommerWWJ_2020.pdf (08.10.2021).

LANUV – Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2021a):

FIS Klimaanpassung Nordrhein-Westfalen. Dürre. <https://www.lanuv.nrw.de/klima/klimaanpassung-in-nrw/fis-klimaanpassung-nordrhein-westfalen/duerre> (25.10.2021).

LANUV – Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2021b):

FIS Klimaanpassung Nordrhein-Westfalen. Gründachkataster NRW. <https://www.lanuv.nrw.de/klima/klimaanpassung-in-nrw/fis-klimaanpassung-nordrhein-westfalen/gruendachkataster> (07.10.2021).

LANUV – Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2021c):

Flächenentwicklung in Nordrhein-Westfalen – Berichtsjahre 2017 - 2019. https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/boden/pdf/20211007_LANUV_Bericht_zur_FI%C3%A4chenentwicklung_2017_-_2019.pdf (21.10.2021).

LANUV – Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2021d):

Kooperationsprojekt GROWA+ NRW 2021. LANUV-Fachbericht 110. https://www.lanuv.nrw.de/landesamt/veroeffentlichungen/publikationen/fachberichte?tx_cartproducts_products%5Bproduct%5D=1063&cHash=15a66b506b84666393384591e58fd616 (25.10.2021).

LANUV – Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (o.J.):

ExUS 2020 – Ganzheitliche Analyse der Niederschlagsentwicklung in Nordrhein-Westfalen. Fortschreibung und Erweiterung der Studie ExUS 2010 (unveröff.).

LB Wald und Holz NRW – Landesbetrieb Wald und Holz NRW (2019): Praxisleitfaden Fichten-

Borkenkäfer. Erkennen – Bekämpfen – Vorbeugen. https://www.wald-und-holz.nrw.de/fileadmin/Publikationen/Broschueren/190308_Praxisleitfaden_Fichten_Borkenkaefer_02_Auflage.pdf (07.10.2021).

LB Wald und Holz NRW – Landesbetrieb Wald und Holz (2020): Satellitenbilder helfen bei

Waldbrandbekämpfung. <https://www.wald-und-holz.nrw.de/en/waldblatt/ueberregional/2012-satellitenbilder-helfen-bei-waldbrand-bekaempfung> (07.10.2021).

LB Wald und Holz NRW – Landesbetrieb Wald und Holz (2021): Waldbrand. Umsichtiges Verhalten

verhindert Katastrophen. <https://www.wald-und-holz.nrw.de/wald-in-nrw/waldbrand> (07.10.2021).

Lenton, T. M., Rockström, J., Gaffney, O., Rahmstorf, S., Richardson, K., Steffen, W. &

Schellnhuber, H.J. (2019): Climate tipping points – too risky to bet against. In: Nature (575), S. 592 - 595. <https://www.nature.com/magazine-assets/d41586-019-03595-0/d41586-019-03595-0.pdf> (07.10.2021).

LUBW – Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2012):

Auswirkungen des Klimawandels auf die Regenwürmer Baden-Württembergs – Literaturstudie zur Bedeutung von Regenwürmern und den möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf Arten und Populationen der Regenwürmer. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjK-4K7bstvZAhUC-6QKHVY7BmlQFnoECAIQ-AQ&url=https%3A%2F%2Fpudi.lubw.de%2Fdetailseite%2F-%2Fpublication%2F43264-Literaturstudie_zur_Bedeutung_von_Regenw%25C3%25BCrmern_und_den_m%25C3%25B6glichen_Auswirkungen_des_Klimawandels_auf_A.pdf&usg=AOvVaw2ee8aheWmi3o6XvzWDZc7W (21.10.2021).

Mann, M. E., Rahmstorf, S., Kornhuber, K., Steinman, B. A., Miller, S. K. & Coumou, D. (2017):

Influence of Anthropogenic Climate Change on Planetary Wave Resonance and Extreme Weather Events. In: Scientific reports 7, S. 45242. DOI: 10.1038/srep45242.

Meyer, M. (2018): Quantitative Bewertung von Umweltindikatoren. Handbuch zur fachgerechten Bedienung der Anwendung. Hg. v. Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH. Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH. Osnabrück (GWS DISCUSSION PAPER SERIES).

Minasny, B., Malone, B. P., McBratney, A. B., Angers, D. A., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., Chen, Z.-S., Chengg, K., Das, B. S., Fielda, D. J., Gimona, A., Hedley, C. B., Young Hong S., Mandal, B., Marchant, B. P., Martin, M., McConkey, B. G., Mulder, V. L., O'Rourke, S., Richer-de-Forges, A. C., Odeh, I., Padarian, J., Paustian, K., Pan, G., Poggio, L., Savin, I., Stolbovoy, V., Stockmann, U., Sulaeman, Y., Tsui, C.-C., Vågen, T.-G., van Wesemael, B. & Winowiecki, L. (2017): Soil carbon 4 per mille Geoderma. 292: 59-86.

MKULNV – Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (2015a):

Klimaschutzplan Nordrhein-Westfalen. Klimaschutz und Klimafolgenanpassung. Düsseldorf. https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/Broschueren/klimaschutzbericht_nrw_151201.pdf (07.10.2021).

MKULNV – Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (2015b):

Wald und Waldmanagement im Klimawandel – Anpassungsstrategie für Nordrhein-Westfalen. https://www.wald-und-holz.nrw.de/fileadmin/Klimawandel/Dokumente/Broschuere_Klimaanpassungsstrategie_Wald_NRW.pdf (08.10.2021)

Moon, T. A., Overeem, I., Druckenmiller, M., Holland, M., Huntington, H., Kling, G., Lovecraft, A.L., Miller, G., Scambos, T., Schädel, C., Schuur, E.A.G., Trochim, E., Wiese, F., Williams, D. & Wong, G. (2019):

The Expanding Footprint of Rapid Arctic Change. In: Earth's Future 7 (3): 212-218. DOI: 10.1029/2018EF001088.

MULNV – Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (2019a): Waldbaukonzept

Nordrhein-Westfalen – Empfehlungen für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung. https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/Broschueren/waldbaukonzept_nrw.pdf (08.10.2021).

MULNV – Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (2019b): Waldzustandsbericht

2019 – Bericht über den ökologischen Zustand des Waldes in Nordrhein-Westfalen. https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/Broschueren/waldzustandsbericht_langfassung_2019.pdf (08.10.2021).

MULNV – Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (2020a): Überwachung,

Bekämpfung und Beseitigung des Eichenprozessionsspinners (EPS) Ein Praxisleitfaden für die Städte und Gemeinden in Nordrhein-Westfalen. https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/Broschueren/eps_leitfaden_web_bf.pdf (08.10.2021).

MULNV – Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (2020b): Waldzustandsbericht

2020 – Bericht über den ökologischen Zustand des Waldes in Nordrhein-Westfalen. https://www.wald-und-holz.nrw.de/fileadmin/Wald_in_NRW/waldzustandsbericht_2020_langfassung.pdf (08.10.2021).

MULNV – Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (2020c): Wiederbewaldungskonzept Nordrhein-Westfalen – Empfehlungen für eine nachhaltige Walderneuerung auf Kalamitätsflächen. https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/Broschueren/wiederbewaldungskonzept_nrw.pdf (08.10.2021).

Munich RE (2021): Schäden durch Spätfrost und der Klimawandel – Nur scheinbar ein Widerspruch. <https://www.munichre.com/topics-online/de/climate-change-and-natural-disasters/climate-change/spring-frost-losses-climate-change-2018.html> (26.04.2021).

NASA – Goddard Institute for Space Studies (2021): Data.GISS: GISS Surface Temperature Analysis: Analysis Graphs and Plots. https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v4/customize.html (08.10.2021).

Nehring, S., Kowarik, I., Rabitsch, W. & Essl, F. (2013): Naturschutzfachliche Invasivitätsbewertungen für in Deutschland wild lebende gebietsfremde Gefäßpflanzen. BfN-Skripten 352.

Neuhaus, P., Fiener, P. & Botschek, J. (2010): Einfluss des globalen Klimawandels auf die räumliche und zeitliche Variabilität der Niederschlagsintensität in NRW. Abschlussbericht, Projekt im Auftrag des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. Geographisches Institut der Universität zu Köln und Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz der Universität Bonn. <https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/klima/pdf/Abschlussbericht-Regenerosivitaet.pdf> (08.10.2021).

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce (2021): Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/#mlo_full (21.10.2021).

OECD – Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (2007): Klimawandel in den Alpen. Anpassung des Wintertourismus und des Naturgefahrenmanagements. <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/9789264016071-de.pdf?expires=1617876488&id=id&accname=ocid77011922&checksum=0ECE-B2EAA88BDE440706B01664411D2C> (08.10.2021).

Ohmura, A. (2009): Observed decadal variations in surface solar radiation and their causes. In: *J. Geophys. Res.*, 114, D00D05, DOI: 10.1029/2008JD011290.

Petoukhov, V., Petri, S., Rahmstorf, S., Coumou, D., Kornhuber, K. & Schellnhuber, H. J. (2016): Role of quasiresonant planetary wave dynamics in recent boreal spring-to-autumn extreme events. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 113 (25): 6862–6867. DOI: 10.1073/pnas.1606300113.

Petrak, M. & Steubing, L. (1985): Inhaltsstoffe und Beäusungsintensität ausgewählter Nahrungspflanzen des Rothirsches (*Cervus elaphus* Linné, 1758) in der Eifel. *Z. Jagdwiss.* 31, S. 73–82.

Petrak, M. (1993): Nischenbreite und Nischenüberlappung bei der Nahrungswahl von Rothirsch (*Cervus elaphus* Linné, 1758) und Reh (*Capreolus capreolus* Linné, 1758) in der Nordwesteifel. *Z. Jagdwiss.* 39, 3, S. 161–170.

Rädler, A. T., Groenemeijer, P., Faust, E. & Sausen, R. (2018): Detecting Severe Weather Trends Using an Additive Regressive Convective Hazard Model (AR-CHaMo). In: *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 57 (3): 569–587. DOI: 10.1175/JAMC-D-17-0132.1.

Rädler, A. T., Groenemeijer, P. H., Faust, E., Sausen, R. & Púčik, T. (2019): Frequency of severe thunderstorms across Europe expected to increase in the 21st century due to rising instability. In: *npj Clim Atmos Sci* 2 (1): 70. DOI: 10.1038/s41612-019-0083-7.

RKI – Robert-Koch-Institut (2004): Epidemiologisches Bulletin (24/2004). https://www.rki.de/DE/Content/Infekt/EpidBull/Archiv/2004/Ausgabenlinks/24_04.pdf?__blob=publicationFile (08.10.2021).

RKI – Robert-Koch-Institut (2021): West-Nil-Fieber im Überblick. https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/W/WestNilFieber/West-Nil-Fieber_Ueberblick.html?jsessionid=2E699028202AEE249-B6A58A3FC5CCF3A.internet091#doc11434928-bodyText2 (08.10.2021).

Robine, J.-M., Cheung, S. L. K., Le Roy, S., van Oyen, H., Griffiths, C., Michel, J.-P. & Herrmann, F. R. (2008): Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. In: *Comptes Rendus Biologies* 331 (2), S. 171–178. DOI: 10.1016/j.crv.2007.12.001.

RP – Rheinische Post (2020): Kreis Viersen legt Konzept für Waldbrandbekämpfung vor
https://rp-online.de/nrw/staedte/viersen/kreis-viersen-legt-konzept-fuer-waldbrandbekämpfung-vor_aid-51460667 (08.10.2021).

RVR – Regionalverband Ruhr (2021): Unsere Feuerwachtürme: Großer Nutzen, weite Blicke.
<https://www.rvr.ruhr/themen/oekologie-umwelt/startseite-rvr-ruhr-gruen/karte-orte-rvr-ruhr-gruen/> (11.05.2021).

Sander, J., Eichner, J. F., Faust, E. & Steuer, M. (2013): Rising Variability in Thunderstorm-Related U.S. Losses as a Reflection of Changes in Large-Scale Thunderstorm Forcing*. In: *Weather, Climate, and Society* 5 (4), S. 317–331.
 DOI: 10.1175/WCAS-D-12-00023.1.

Sandgathe, L. & Martella, V. (2017): 1. Juni 2016 – als das Rheinland unter Wasser stand.
 In: RP online. https://rp-online.de/nrw/panorama/starkregen-in-nrw-am-1-juni-2016-als-duesseldorf-unter-wasser-stand_aid-21135923 (08.10.2021).

Sat, S. (2016): Polizei-Notruf war nach Blitzeinschlag nicht erreichbar. In: *waz*. <https://www.waz.de/staedte/bochum/polizei-notruf-war-nach-blitzeinschlag-nicht-erreichbar-id11872718.html>/
<https://www.derwesten.de/staedte/bochum/polizei-notruf-war-nach-blitzeinschlag-nicht-erreichbar-id11872718.html> (18.02.2021).

Schulte-Kellinghaus, S., Weller, A. & Wolff, I. (2020): Erweiterung der Forstlichen Standortkarte von Nordrhein-Westfalen auf der Grundlage von Klimaprojektionen und zur Entwicklung von Karten zur Eignung von Baumarten und Waldentwicklungstypen – Projektbericht.
https://www.gd.nrw.de/zip/bo_dk_forst-standortkarten_projektbericht-2020.pdf (08.10.2021).

Simon, O., Lang, J. & Petrak, M. (2008): Rotwild in der Eifel: Lösungen für die Praxis aus dem Pilotprojekt Monschau-Elsenborn Klitten, Lutra.

Smith, Matthew R. & Myers, S. S. (2018): Impact of anthropogenic CO₂ emissions on global human nutrition. In: *Nature Clim Change* 8 (9), S. 834–839. DOI: 10.1038/s41558-018-0253-3.

Spinoni, J., Vogt, J. & Barbosa, P. (2015): European degree-day climatologies and trends for the period 1951–2011. In: *Int. J. Climatol.* 35 (1): 25–36. DOI: 10.1002/joc.3959.

Spinoni, J., Vogt, Jürgen V., Barbosa, P., Dosio, A., McCormick, N., Bigano, A. & Füssler, H.-M. (2018): Changes of heating and cooling degree-days in Europe from 1981 to 2100. In: *Int. J. Climatol* 38 (3): e191–e208. DOI: 10.1002/joc.5362.

Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim (2017): Bodennahes Ozon.
<https://www.umwelt.niedersachsen.de/download/67676> (08.10.2021).

Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T. M., Folke, C., Liverman, D., Summerhayes, C.P., Barnosky, A.D., Cornell, S.E., Crucifix, M., Donges, J.F., Fetzer, I., Lade, S. J., Scheffer, M., Winkelmann, R. & Schellnhuber, H. J. (2018): Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences*. DOI: 10.1073/pnas.1810141115.

STEB Köln – Stadtentwässerungsbetriebe Köln (2021a): Starkregenkarte.
<https://www.hw-karten.de/index.html?Module=Starkregen#> (08.10.2021).

STEB Köln – Stadtentwässerungsbetriebe Köln (2021b): Starkregen und Sturzfluten.
<https://www.steb-koeln.de/hochwasser-und-ueberflutungsschutz/starkregen-und-sturzfluten/starkregen-und-sturzfluten.jsp> (08.10.2021).

Thünen – Johann Heinrich von Thünen-Institut (2021): Landeswaldinventur Nordrhein-Westfalen 2012–2014: <https://bwi.info/inhalt1.3.aspx?Text=1.07%20Laubwald%20/%20Nadelwald%20in%20der%20Hau.ptbestockung&prRolle=public&prInv=LWINW2014&prKapitel=1.07> (08.10.2021).

UBA – Umweltbundesamt (2011): Wirkungen der Klimaänderungen auf die Böden – Untersuchungen zu Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser.
<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4089.pdf> (08.10.2021).

UBA – Umweltbundesamt (2019a): Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/das_monitoringbericht_2019_barrierefrei.pdf (08.10.2021).

UBA – Umweltbundesamt (2019b): Quantitative Bewertung von Umweltindikatoren. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/quantitative-bewertung-von-umweltindikatoren> (10.08.2021).

UBA – Umweltbundesamt (2020a): Gesundheitsrisiken durch Ozon. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-durch-ozon#gesundheitsrisiken-von-ozon-und-hoher-lufttemperatur> (08.10.2021).

UBA – Umweltbundesamt (2020b): Ozon-Belastung. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/ozon-belastung#uberschreitung-von-schwellenwerten> (08.10.2021).

UFZ – Helmholtz Zentrum für Umweltforschung (2021): Dürremonitor Deutschland www.ufz.de/duerremonitor (25.10.2021).

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change (2015): Adoption of the Paris Agreement – Paris Agreement text English. http://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf (08.10.2021).

Walter, R., Burmeister, J., Wolfrum, S. & Brandhuber, R. (2017): Die Leistungen der Regenwürmer trotz Klimawandel erhalten. In: LfL – Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.): Landwirtschaft im Klimawandel Lösungen, die Geld sparen, Tagungsband zum 15. Kulturlandschaftstag. https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/schriftenreihe/15-kulturlandschaft-2017_lfl-schriftenreihe.pdf#page=31 (08.10.2021).

WDR (2018): Münster rechtfertigt späte Hilfe für den Aasee. <https://www1.wdr.de/nachrichten/westfalen-lippe/fischsterben-muenster-aasee-100.html> (25.10.2021).

Welt (2007): Millionen Europäer haben wegen „Kyrill“ keinen Strom. <https://www.welt.de/vermischtes/article710034/Millionen-Europaeer-haben-wegen-Kyrill-keinen-Strom.html> (08.10.2021).

Westdeutsche Zeitung (2017): Um 18.15 Uhr legte Kyrill Wuppertal lahm. https://www.wz.de/nrw/wuppertal/um-1815-uhr-legte-kyrill-wuppertal-lahm_aid-31583011 (08.10.2021).

Winterrath, T., Brendel, C., Hafer, M., Junghänel, T., Walawender, E., Weigl, E. & Becker, A. (2017):

Erstellung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie. Offenbach am Main (Berichte des Deutschen Wetterdienstes) https://refubium.fu-berlin.de/bitstream/handle/fub188/21892/251_pdf.pdf?sequence=1&isAllowed=y (08.10.2021).

Witsch, K. (2018): Wenn Tankstellen der Sprit ausgeht. Handelsblatt (online) vom 09.11.2018. <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energie/versorgungsengpass-wenn-tankstellen-der-sprit-ausgeht-/23601650.html> (25.10.2021).

Wunderling, N., Donges, J. F., Kurths, J. & Winkelmann, R. (2021): Interacting tipping elements increase risk of climate domino effects under global warming. In: Earth Syst. Dynam. 12 (2), S. 601 - 619. DOI: 10.5194/esd-12-601-2021.

Zeebe, R. E., Ridgwell, A. & Zachos, J. C. (2016): Anthropogenic carbon release rate unprecedented during the past 66 million years. In: Nature Geosci 9 (4), S. 325–329. DOI: 10.1038/ngeo2681.

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1:** Handlungsfelder des Klimafolgen- und Anpassungsmonitorings (KFAM NRW)
- Abb. 2:** Thermopluviogramm für NRW: Abweichung der Jahresmittelwerte für Temperatur und Niederschlag 1881 - 2020 vom Mittel 1991 - 2020 (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 3:** Mittlere Jahresniederschlagssumme und Jahreslufttemperatur in NRW im Zeitraum 1881 - 2020 (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 4:** Mittlere Jahreslufttemperatur in NRW im Zeitraum 1881 - 2020 (Datengrundlage: DWD). Zusätzlich eingetragen sind die Mittelwerte aller Klimanormalperioden; identische Werte werden in derselben Farbe dargestellt (z. B. 1921 - 1950 und 1941 - 1970), ansonsten erstreckt sich die Farbskala von gering/dunkelblau bis hoch/dunkelrot.
- Abb. 5:** Karten der mittleren Jahreslufttemperatur in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 6:** Warming stripes für NRW für den Zeitraum 1881 - 2020 (Datengrundlage: DWD). Die Temperaturspanne in NRW reicht von 7,4 °C im Jahr 1888 (dunkelblau) bis zu 11,1 °C im Jahr 2020 (dunkelrot) (vgl. Abbildung 7).
- Abb. 7:** Mittlere Jahreslufttemperatur in NRW im Zeitraum 1881 - 2020 (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 8:** Mittlere Lufttemperatur der meteorologischen Jahreszeiten in NRW im Zeitraum 1881 - 2020 (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 9:** Karten der mittleren Lufttemperatur im Frühling in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 10:** Karten der mittleren Lufttemperatur im Sommer in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 11:** Karten der mittleren Lufttemperatur im Herbst in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 12:** Karten der mittleren Lufttemperatur im Winter in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 13:** Mittlere Anzahl der Eistage und Frosttage pro Jahr in NRW im Zeitraum 1891 - 2020 (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 14:** Karten der Anzahl der Eistage in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 15:** Karten der Anzahl der Frosttage in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 16:** Mittlere Anzahl der Sommertage und Heißen Tage pro Jahr in NRW im Zeitraum 1891 - 2020 (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 17:** Mittlere Anzahl der Tropennächte pro Jahr in NRW im Zeitraum 1951 - 2020 (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 18:** Karten der Anzahl der Heißen Tage in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 19:** Karten der Anzahl der Sommertage in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 20:** Mittlere Jahresniederschlagssumme in NRW im Zeitraum 1881 - 2020 (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 21:** „Niederschlags-Streifen“ für NRW für den Zeitraum 1881 - 2020 (Datengrundlage: DWD). Die Niederschlagssumme bewegt sich in NRW zwischen 501 mm im Jahr 1959 (hellrosa) bis zu 1.138 mm im Jahr 1966 (dunkelblau) (vgl. Abbildung 20).
- Abb. 22:** Karten der mittleren Jahresniederschlagssumme in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 23:** Mittlere Jahresniederschlagssumme in NRW im Zeitraum 1881 - 2020 (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 24:** Karten der mittleren Niederschlagssumme im Frühling in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Datengrundlage: DWD)

- Abb. 25:** Karten der mittleren Niederschlags-summe im Sommer in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 26:** Karten der mittleren Niederschlags-summe im Herbst in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 27:** Karten der mittleren Niederschlags-summe im Winter in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 28:** Mittlere Anzahl der Starkniederschlags-tage > 10 mm und > 20 mm pro Jahr in NRW im Zeitraum 1951 - 2020 (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 29:** Karten der Anzahl der Starknieder-schlagstage > 10 mm in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Daten-grundlage: DWD)
- Abb. 30:** Karten der Anzahl der Starknieder-schlagstage > 20 mm in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Daten-grundlage: DWD)
- Abb. 31:** Anzahl der Extremniederschlagsereig-nisse der Dauerstufe 60 Minuten pro Jahr in NRW im Zeitraum 1961 - 2018 (Daten-grundlage: ExUS2020)
- Abb. 32:** Mittlere jährliche Anzahl an Starkregen-stunden mit Warnstufe 3 und höher im Zeitraum 2001 - 2020 in NRW (Daten-grundlage: DWD und GDV)
- Abb. 33:** Anzahl der Trockentage pro Jahr an der Station Westerkappeln im Zeitraum 1892 - 2020 (Datengrundlage: DWD). Zusätzlich eingetragen ist die maximale Andauer von aufeinanderfolgenden Trockentagen pro Jahr.
- Abb. 34:** Anzahl der Schneetage pro Jahr am Kahlen Asten im Zeitraum 1955 - 2020 (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 35:** Karten der Schneedeckentage in NRW als Mittel für alle Klimanormalperioden (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 36:** Mittlere Jahressumme der Sonnen-scheindauer in NRW 1951 - 2020 (Daten-grundlage: DWD)
- Abb. 37:** Karten der mittleren Jahressonnen-scheindauer in NRW für alle Klimanormal-perioden (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 38:** Standardisierter Niederschlagsindex (SPI) 12 Monate im Zeitraum Dezember 1881 bis Dezember 2020 im Mittel für NRW (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 39:** Beispielkarte für den Bodenfeuchteindex (SMI) des Gesamtbodens (bis 1,80 m Tiefe) in NRW vom 25.05.2020 (Daten-grundlage: UFZ-Dürremonitor, Helm-holtz-Zentrum für Umweltforschung)
- Abb. 40:** Ausschnitt aus der Dürreempfindlich-keitskarte der forstlichen Standorte für die Großlandschaft Eifel. (Datengrundl-age: Geologischer Dienst NRW)
- Abb. 41:** Mittlere jährliche Summe der poten-ziellen und aktuellen Evapotranspiration in NRW für den Zeitraum 1991 - 2020 (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 42:** Mittlere jährliche klimatische Wasser-bilanz in NRW im Zeitraum 1961 - 2020 sowie das dekadisch gleitende Mittel (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 43:** Mittlere klimatische Wasserbilanz der Jahreszeiten in NRW im Zeitraum 1961 - 2020 sowie die dekadisch gleiten-den Mittel (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 44:** Abflusshöhe in mm für das Einzugs-gebiet der Lahn bis zum Pegel Feudingen/ Lahn dargestellt für das hydrologische Winterhalbjahr und Sommerhalbjahr im Zeitraum 1951 - 2020 (Datengrundlage: LANUV)
- Abb. 45:** Verhältnis der Abflusshöhe zwischen hydrologischem Winter und Sommer im Einzugsgebiet der Lahn bis zum Pegel Feudingen im Zeitraum 1951 - 2020 (Datengrundlage: LANUV)

- Abb. 46:** Anzahl der Hochwassertage des hydrologischen Winterhalbjahres und des hydrologischen Sommerhalbjahres an der Station Feudingen/Lahn im Zeitraum 1951 - 2020 (Datengrundlage: ELWAS)
- Abb. 47:** Anzahl der Niedrigwassertage des hydrologischen Winterhalbjahres und des hydrologischen Sommerhalbjahres an der Station Feudingen/Lahn im Zeitraum 1951 - 2020 (Datengrundlage: ELWAS)
- Abb. 48:** Anzahl an Tagen mit Beschränkungen der Abladetiefe am Niederrhein infolge von Niedrigwasser (Unterschreitung des Gleichwertigen Wasserstandes (GIW)) im Zeitraum 1950 - 2020 (Datengrundlage: Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV))
- Abb. 49:** Anzahl an Tagen mit Einschränkungen oder Sperrungen auf dem Niederrhein infolge von Hochwasser (Überschreitungen des HSW (Marke I und Marke II) im Zeitraum 1950 - 2019 (Datengrundlage: Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV))
- Abb. 50:** Mittlere und maximale Gewässertemperatur des Rheins an der Station Kleve-Bimmen im Zeitraum 1974 - 2020 (Datengrundlage: LANUV)
- Abb. 51:** Grundwasserneubildung und Niederschlag an der Station St. Arnold in Neuenkirchen im Zeitraum 1966 - 2020 (Datengrundlage: LANUV)
- Abb. 52:** Grundwasserstand der Station Bislicher Wald in Hamminkeln für die Wasserwirtschaftsjahre (WWJ) 1951 - 2020 (Datengrundlage: LANUV)
- Abb. 53:** Wasserentnahmemengen nach dem WasEG für Trink- und Brauchwasser im Sektor öffentliche Trinkwasserversorgung 2012 - 2020. Die Daten für 2019 und 2020 sind vorläufig (Datengrundlage: LANUV NRW)
- Abb. 54:** Bodentemperatur in 5 cm und 50 cm Tiefe sowie Lufttemperatur in 2 m Höhe an der Station Essen-Bredeney im Zeitraum 1951 - 2020 (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 55:** Bodenfeuchte als Jahresmittelwerte des volumetrischen Wassergehalts in Vol. % in 5 cm, 20 cm und 50 cm Tiefe an der Station Schöneseeff in im Zeitraum 2010 - 2020 (Datengrundlage: FZ Jülich; www.tereno.net; Bogena et al. 2018)
- Abb. 56:** Modellierter Bodenfeuchte in % nFK für NRW (Quelle: DWD)
- Abb. 57:** Humusvorrat in t/ha im Ober- und Unterboden bis 60 cm Tiefe in den drei am stärksten landwirtschaftlich genutzten Großlandschaften NRWs, Niederrheinisches Tiefland, Niederrheinische Bucht und Westfälische Bucht, basierend auf 15 Messstandorten pro Großlandschaft, sowie als Mittelwert über alle Flächen für die Erfassungsjahre 2009, 2012, 2015 und 2018 (Datengrundlage: Humusmonitoring NRW, LANUV)
- Abb. 58:** Regenerosivität in NRW im Zeitraum 1973 - 2020 (Datengrundlage: Neuhaus et al. 2010 und DWD)
- Abb. 59:** Beispiel „Onsite-Schäden“ auf dem Acker: Erosionsgraben infolge von starkem Niederschlag (Quelle: Geologischer Dienst NRW)
- Abb. 60:** Durchschnittliche tägliche Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche in NRW im Zeitraum 1997 - 2020 (Datengrundlage: LANUV 2021c)
- Abb. 61:** Beginn der phänologischen Jahreszeiten in NRW im Zeitraum 1951 - 2020 (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 62:** Beginn der Apfelblüte an der Station Sankt Hubert in Kempen und letzter Frosttag im Frühling an der Station Tönisvorst (jeweils Tag im Jahr) im Zeitraum 1968 - 2020 (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 63:** Phänologische Uhr für NRW: Sie stellt im inneren Ring die Dauer der phänologischen Jahreszeiten in der Klimanormalperiode 1951 - 1980 und im äußeren Ring für den Zeitraum 1991 - 2020 dar (Datengrundlage: LANUV NRW)
- Abb. 64:** Länge der Vegetationsperiode in NRW im Zeitraum 1951 - 2020 (Datengrundlage: DWD)

- Abb. 65:** Mittlerer Blühbeginn des Buschwildröschens in NRW im Zeitraum 1951 - 2020 (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 66:** Mittlerer Temperatur-Zeigerwert nach Ellenberg und Anteil der Kältezeiger (Ellenberg Temperaturzahl 1 - 4) in NRW im Zeitraum 2006 - 2020 (Datengrundlage: LANUV, ÖFS)
- Abb. 67:** Mittlere Anzahl der klimawandelbegünstigten invasiven Pflanzenarten pro 100 ha in NRW im Zeitraum 2006 - 2020 (Datengrundlage: LANUV, ÖFS)
- Abb. 68:** Karte der Vorkommenswahrscheinlichkeit der Späten Traubenkirsche in NRW. Die Stetigkeit gibt an, in wie viel Prozent aller Biotoptypen pro Quadratkilometer die Art vorkommt. Die Darstellung beruht auf einer Hochrechnung auf Basis der Ökologischen Flächenstichprobe (ÖFS, LANUV, vgl. Indikator 6.5 „Klimasensitive Pflanzenarten“).
- Abb. 69:** Entwicklung des Temperaturindex der Vogelartengemeinschaften in NRW im Zeitraum 2002 - 2020 (Datengrundlage: LANUV, ÖFS)
- Abb. 70:** Jagdstrecke Schwarzwild in NRW im Zeitraum 1951/52 - 2019/20 (Datengrundlage: Jagdstatistik NRW, MULNV)
- Abb. 71:** Mittlere Dauer der Vegetationszeit der Buche und der Eiche in NRW im Zeitraum 2001 - 2020 (Datengrundlage: Forstliches Umweltmonitoring NRW)
- Abb. 72:** Waldfläche in NRW differenziert nach den Bestockungstypen „Laub- und Mischwald“ und „reiner Nadelwald“ im Jahr 2014 in Hektar [ha] (Datengrundlage: Landeswaldinventur 2014, Thünen 2021)
- Abb. 73:** Entwicklung des Kronenzustandes aller Baumarten an der Waldfläche NRW im Zeitraum 1984 - 2020: Prozentuale Verteilung nach Stufe der Kronenverlichtung. Für das Jahr 1996 liegt kein Landesergebnis vor (Datengrundlage: Waldzustandserhebung, MULNV 2020b).
- Abb. 74:** Anzahl der Tage mit Waldbrandgefährdungen nach den Waldbrandindexstufen 1 + 2 und 4 + 5 in NRW im Zeitraum 1961 - 2020 sowie Anzahl der Waldbrände und durch Waldbrand betroffene Fläche in Hektar [ha] im Zeitraum 1991 - 2020 (Datengrundlage: DWD, BLE 2021)
- Abb. 75:** Jahressumme der Buchdrucker-Population aus den Stichproben-Ergebnissen an acht ausgewählten Standorten in NRW im Zeitraum 2014 - 2020. Die Station Hagen fällt ab 2020 aufgrund des Zusammenbruchs der Fichtenbestände aus (Datengrundlage: Borkenkäfermonitoring NRW, Landesbetrieb Wald und Holz NRW).
- Abb. 76:** Schadholaufkommen nach verschiedenen Schadholaufursachen in NRW im Zeitraum 2002 - 2020 (Datengrundlage: IT.NRW 2021)
- Abb. 77:** Mittlerer Beginn der Apfelblüte in NRW im Zeitraum 1951 - 2020 (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 78:** Kalendertag der Aussaat und des Auf Laufens von Mais in NRW im Zeitraum 1968 - 2020 (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 79:** Kalendertag der Aussaat und des Auf Laufens von Winterweizen in NRW im Zeitraum 1951 - 2020 (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 80:** Winterweizenertrag in Dezitonnen pro Hektar im Zeitraum 1981 - 2020 und Abweichung der Winterweizenerträge vom Mittel der Vorjahre in Prozent in Nordrhein-Westfalen (Datengrundlage: BMEL)
- Abb. 81:** Schadensatz (Verhältnis des Schadenaufwandes zur Versicherungssumme) der Hagel- und Elementargefahrenversicherungen im Agrarbereich in Prozent in Nordrhein-Westfalen im Zeitraum 2010 - 2020 (Datengrundlage: Vereinigte Hagelversicherung sowie Münchener & Magdeburger Agrar AG)
- Abb. 82:** Zeitreihe der Überschreitungstage pro Jahr mit einem THI ≥ 75 für drei ausgewählte Stationen (Datenquelle: DWD)

- Abb. 83:** Jährliche Anzahl an Tagen mit Wärmebelastung (Gefühlte Temperatur übersteigt um 12 Uhr (UTC) den Schwellenwert von 32 °C) an den Stationen Düsseldorf und Köln-Bonn im Zeitraum 1971 - 2020 (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 84:** Klima-Michel-Modell und Gefühlte Temperatur (Quelle: DWD)
- Abb. 85:** Jährliche Anzahl an Tropennächten (Lufttemperatur fällt zwischen 18 Uhr und 6 Uhr (UTC) nicht unter den Schwellenwert von 20 °C) an den Stationen Köln Turiner Straße (VKTU) und Aachen Wilhelmstraße (VACW) im Zeitraum 2010 - 2020 (Datengrundlage: LUQS-Messnetz des LANUV)
- Abb. 86:** Jährliche Anzahl an Tagen mit Hitze警告en (gefühlte Temperatur erreicht für zwei Tage in Folge mindestens 32 °C; gleichzeitig wird keine ausreichende nächtliche Auskühlung der Wohnräume mehr gewährleistet) und jährliche Anzahl an Tagen mit Warnung vor extremer Hitze (gefühlte Temperatur überschreitet 38 °C) in Nordrhein-Westfalen im Zeitraum 2005 - 2020. Wenn an einem Tag eine Warnung nur für einzelne Kreise ausgegeben wurde, wird dieser Tag für ganz NRW gezählt (Datengrundlage: DWD).
- Abb. 87:** Anzahl der EinwohnerInnen von NRW, die 2018 und 2050 den jeweiligen thermischen Belastungsklassen ausgesetzt sind (Datengrundlage: Klimaanalyse NRW, LANUV 2018). Für die 2050er Werte liegen keine Werte für die Belastungsklassen sehr günstig, günstig und weniger günstig vor.
- Abb. 88:** Detailausschnitt Klimaanalyse Gesamtbetrachtung (Quelle: LANUV 2018)
- Abb. 89:** Anzahl hitzebedingter Todesfälle (orange) mit 95 %-Konfidenzintervall (schwarz) in Nordrhein-Westfalen im Zeitraum 1992 - 2017 (Datengrundlage: der Heiden et al. 2020)
- Abb. 90:** Anzahl der Tage mit Überschreitung der Informationsschwelle (1-h-Mittelwert $\geq 180 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Anzahl der Tage mit Überschreitung der Alarmschwelle (1-h-Mittelwert $\geq 240 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Anzahl der Tage mit Überschreitung des Zielwerts zum Schutz der menschlichen Gesundheit (8-h Mittelwert $\geq 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$) und Jahresmittel der Ozonkonzentration in Nordrhein-Westfalen im Zeitraum 2000 - 2020 (Datengrundlage: LANUV)
- Abb. 91:** Verteilung des Ozons in der Erdatmosphäre (Quelle: nach Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim 2017)
- Abb. 92:** Länge der Pollensaison in Tagen sowie Tag des Beginns (Beginn der Haselpollensaison nach EAN-Definition) und Endes (Ende der Beifußpollensaison nach EAN-Definition) der Pollensaison an den Messstationen Bad Lippspringe [LIPP] und Mönchengladbach [MOEN] im Zeitraum 1997 - 2020. Negative Werte markieren Werte im Dezember des Vorjahres.
- Abb. 93:** Eichenprozessionsspinner-Vorkommen in Gemeinden und Städten in NRW im Zeitraum 2018 - 2020 (Datengrundlage: Wald und Holz NRW)
- Abb. 94:** Anzahl der Warnungen des Deutschen Wetterdienstes vor warnwürdigem Wetter der Stufen 3 (Unwetterwarnungen) und 4 (Warnung vor extremen Unwetter) nach verschiedenen Ursachen (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 95:** Anzahl der technischen Hilfeleistung der öffentlichen Feuerwehren in der Kategorie Wasser- und Sturmschaden in NRW 2012 - 2020 (Datengrundlage: IM NRW)
- Abb. 96:** Starkregengefährdungskarte in Köln. Zugrunde gelegt wurde ein mittleres Niederschlagsereignis (statistisch 30-jährlich) (Quelle: STEB Köln 2021a)
- Abb. 97:** Anzahl der Brandeinsätze zur Vegetationsbrandbekämpfung in NRW im Zeitraum 2012 - 2020 (Datengrundlage: IM NRW)
- Abb. 98:** Anzahl der klimaanpassungsrelevanten Seminare und Teilnehmendenzahlen beim Bildungszentrum für die Ver- und Entsorgungswirtschaft NRW für den Zeitraum 2016 - 2020 (BEW NRW)

- Abb. 99:** Anzahl Aufrufe des Fachinformationssystems (FIS) Klimaanpassung nach Handlungsfeldern im Zeitraum 2018 - 2020 (Quelle: LANUV NRW)
- Abb. 100:** Das Fachinformationssystem (FIS) Klimaanpassung (Quelle: LANUV NRW)
- Abb. 101:** Regionalplanerisch ausgewiesene Überschwemmungsbereiche in NRW (Datengrundlage: IT.NRW)
- Abb. 102:** Regionalplanerisch ausgewiesener Siedlungsraum in NRW in m² pro EinwohnerIn (Datengrundlage: IT.NRW)
- Abb. 103:** Mittlere und maximale urbane Wärmeinsel-Intensität (UHII) in Kelvin [K] im Sommer (Juni, Juli, August) in Bochum – Differenz zwischen der Ludger-Mintrop-Stadtklima-Station (LMSS) und der Rudolf-Geiger-Freilandklima-Station (RGS) im Zeitraum 1997 - 2020 (Datengrundlage: RUB)
- Abb. 104:** Karte der Verteilung der Klimatope in Bochum und Lage der Messstationen Ludger-Mintrop-Stadtklima-Station (LMSS) und Rudolf-Geiger-Freilandklima-Station (RGS) (Datengrundlage: Geobasis NRW (Topografische Hintergrundkarte), LANUV und RUB)
- Abb. 105:** Erreichbarkeit von öffentlichen Grünflächen in drei verschiedenen Stadtgrößenkategorien in NRW (Datengrundlage: Zensus 2011, ATKIS 2021)
- Abb. 106:** Erreichbarkeit von öffentlichen Grünflächen für die einzelnen Städte in drei verschiedenen Stadtgrößenkategorien in NRW (Datengrundlage: Zensus 2011, ATKIS 2021)
- Abb. 107:** Flächennutzungsarten mit jeweiligem Anteil der Grünflächen in Nettetal, Soest, Oberhausen und Herne mit Stand 2017 - 2018 (Datengrundlage: Geobasis.NRW)
- Abb. 108:** Das Gründachkataster NRW im Fachinformationssystem Klimaanpassung (www.gruendachkataster.nrw.de) (LANUV 2021b)
- Abb. 109:** Anteil der Siedlungsflächen in NRW, die von Starkregen der Warnstufe 3 und höher betroffen sind in Prozent im Zeitraum 2001 - 2020 gegliedert in vier Andauerklassen (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 110:** Anteil der Kommunen (100 % = 396) und Kreise (100 % = 31) in NRW mit einem Klimaanpassungskonzept im Zeitraum 2013 - 2020 (Datengrundlage: Energie-Agentur.NRW)
- Abb. 111:** Jahressummen der monatlichen Heizgradtage an den Klimastationen Essen-Bredeney, Köln/Bonn, Köln-Stammheim und Lennestadt-Theten für den Zeitraum 2010 - 2020 (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 112:** Jahressummen der Kühlgradtage nach Spinoni et al. (2015) und Spinoni et al. (2018), beispielhaft dargestellt für die Stationen Köln-Stammheim (1946 - 2020) und Lennestadt-Theten (1963 - 2020) (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 113:** Witterungsbedingte Störungen an der Schieneninfrastruktur in NRW, differenziert nach verschiedenen Störungsursachen im Zeitraum 2018 - 2020 (Datengrundlage: DB Netz AG)
- Abb. 114:** Wasserproduktivität, Wassereinsatz und Bruttowertschöpfung des Verarbeitenden Gewerbes in NRW, ausgehend von einem dimensionslosen Index, der sich auf das Jahr 1998 als Referenz bezieht, für den Zeitraum 1998 - 2016 (Datengrundlage: Statistische Ämter des Bundes und der Länder (Umweltökonomische Gesamtrechnung der Länder))
- Abb. 115:** Schadenhäufigkeit (Anzahl der Schäden auf die Anzahl der Verträge in %) und Schadensatz (Verhältnis des Schadenaufwandes zur Versicherungssumme in ‰) bei Sturm und Hagel in NRW 1999 - 2019 (Datengrundlage: GDV 2021b)
- Abb. 116:** Gefahren durch Hagel (Quelle: GDV 2019)
- Abb. 117:** Schadenhäufigkeit (Anzahl der Schäden auf die Anzahl der Verträge in %) und Schadensatz (Verhältnis des Schadenaufwandes zu den versicherten Werten in ‰) der erweiterten Elementarschadenversicherung in NRW 2002 - 2019 (Datengrundlage: GDV 2021b)

- Abb. 118:** Anteil der Wohngebäude [%], die in NRW gegen Elementarschäden wie u. a. Überschwemmungen, Starkregen, Erdbeben, Schneedruck und Lawinen versichert sind, im Zeitraum 2014 - 2020 (Datengrundlage: GDV 2021b, Wert für 2020 vorläufig)
- Abb. 119:** Anteil witterungsbedingt unterbrochener Stromkunden im Niederspannungsbereich mit einer Dauer von mehr als 3 min sowie Anteil witterungsbedingter Netzunterbrechungen im Mittelspannungsbereich durch atmosphärische Einwirkungen und höhere Gewalt in NRW im Zeitraum 2007 - 2020 (Datengrundlage: BNetzA)
- Abb. 120:** Witterungsbedingte Nichtverfügbarkeit der Stromversorgung für Endverbraucher in Minuten durch entweder Atmosphärische Einwirkungen und höhere Gewalt oder durch sonstige ungeplante Unterbrechungen bezogen auf den Zeitraum von 2006 - 2020 in NRW (Datengrundlage: BNetzA)
- Abb. 121:** Witterungsbedingte Stromminderproduktion [GWh] thermischer Kraftwerke in NRW im Zeitraum 1995 - 2020 (Datengrundlage: Nicht-Verfügbarkeitsmodul des Kraftwerksinformationssystems (KISSY) der VGB Power Tech)
- Abb. 122:** Brutto-Stromerzeugung und Kühlwasserentnahme thermischer Kraftwerke in NRW im Zeitraum von 2012 - 2019 (Datengrundlage: LANUV; Länderarbeitskreis Energiebilanzen)
- Abb. 123:** Wassereffizienz thermischer Kraftwerke [kWh/m^3] als Quotient aus Brutto-Stromerzeugung und Kühlwasserentnahme thermischer Kraftwerke in NRW im Zeitraum von 2012 - 2019 (Datengrundlage: LANUV; Länderarbeitskreis Energiebilanzen)
- Abb. 124:** Anzahl von Tagen mit einer Schneedecke von mindestens 15 cm während des Winters (November - April) an insgesamt drei Beobachtungsstationen im Sauerland um Winterberg und Schmallenberg herum von 580 m bis 838 m ü. NN im Zeitraum 1969/1979 - 2020/2021 (Datengrundlage: DWD)
- Abb. 125:** Maximale Betriebstage (mindestens eine geöffnete Liftanlage) der Wintersport-Arena Sauerland und Tage mit Beschneigung im Zeitraum 1990/1991 bis 2017/2018 (Datengrundlage: Winterberg Touristik und Wirtschaft GmbH)
- Abb. 126:** Anzahl der Übernachtungen in Winterberg in der Sommer- und Wintersaison im Zeitraum 2004/2005 bis 2019/2020 (Datengrundlage: IT.NRW)

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Übersicht der Indikatoren	Tab. 19:	Übersicht der Indikatoren zum
Tab. 2:	Mittelwerte für die Referenz- Klimanormalperioden 1961 - 1990 und 1991 - 2020 (Datengrundlage: DWD)		Handlungsfeld 17 „Finanz- und Versicherungswirtschaft“
Tab. 3:	Übersicht der Indikatoren zum Abschnitt 1 „Lufttemperatur“	Tab. 20:	Übersicht der Indikatoren zum
Tab. 4:	Übersicht der Indikatoren zum Abschnitt 2 „Niederschlag“		Handlungsfeld 18 „Energiewirtschaft“
Tab. 5:	Übersicht des Indikators zum Abschnitt 3 „Sonne“	Tab. 21:	Übersicht der Indikatoren zum
Tab. 6:	Übersicht der Indikatoren zum Handlungsfeld 4 „Wasserwirtschaft und Hochwasserschutz“		Handlungsfeld 19 „Tourismusbirtschaft“
Tab. 7:	Übersicht der Indikatoren zum Handlungsfeld 5 „Boden“		
Tab. 8:	Übersicht der Indikatoren zum Handlungsfeld 6 „Biodiversität“		
Tab. 9:	Übersicht der Indikatoren zum Handlungsfeld 7 „Wald- und Forstwirtschaft“		
Tab. 10:	Übersicht der Indikatoren zum Handlungsfeld 8 „Landwirtschaft“		
Tab. 11:	Übersicht der Indikatoren zum Handlungsfeld 9 „Menschliche Gesundheit“		
Tab. 12:	Übersicht der Indikatoren zum Handlungsfeld 10 „Katastrophenschutz“		
Tab. 13:	Übersicht der Indikatoren zum Handlungsfeld 11 „Information, Bildung und Netzwerke“		
Tab. 14:	Übersicht der Indikatoren zum Handlungsfeld 12 „Landes- und Regionalplanung“		
Tab. 15:	Übersicht der Indikatoren zum Handlungsfeld 13 „Stadtentwicklung und kommunale Planung“		
Tab. 16:	Übersicht der Indikatoren zum Handlungsfeld 14 „Bauen und Wohnen“		
Tab. 17:	Übersicht der Indikatoren zum Handlungsfeld 15 „Verkehr und Verkehrs- infrastruktur“		
Tab. 18:	Übersicht der Indikatoren zum Handlungsfeld 16 „Industrie und Gewerbe“		

Bildnachweise

Extern

Geologischer Dienst NRW (126, 127), WSW Energie & Wasser AG (275), Wintersport-Arena Sauerland (293)

Adobe Stock

flyalone (1), shokokoart (1, 21, 41), Tobias Arhelger (4), kristina rütten (6), alfotokunst (8), Romolo Tavani (10), Lilya (22), Tamara (23), Thaut Images (24), Tom Bayer (25), Günter Albers (26, 76), dietwalther (28, 51), weyo (31), lenswOrld (32), Andrea (33), naka (34), Martin Debus (35), Janina Dierks (36), Bas Meelker (41), Bjoern Bernhard (49), Comofoto (53), Rolf (54), wewi-creative (55), Vera Kuttelvaserova (56), Chalabala (59), sweasy (62), Bernd Leitner (69), Pixel62 (73), TwilightArtPictures (73), Marlene (80), kathomenden (82, 104), markus thoenen (84), AllthingsBerlin (88), Fauren (90), StockPhotosArt (93), Andrii Yalansky (95), travelpeter (99, 227), Kamzoom (101), aquapix (106), JackStock (108), Wolfilser (111), maykal (112), Visual Content (114), artragen (116), Anna Ritter (119), klikk (123), Smileus (124), Vladimirs (129), M. Schuppich (130, 171), rustamank (132), Mariusz Świtulski (135), Cachaco (136), Tilia (139), Lukas Bast (140), Wirestock (142), Karin Jähne (144), Uwe Hennig (147), teddiviscious (150), fusiOn (152), ON-Photography (157), yelantsevv (161), Cezanne-Fotografie (165), Sondem (166), Piman Khrutmuang (166), Jana Lösch (167), Ralf (168), BirgitMundtOsterw. (174), Mikhailov Studio (180), Halfpoint (182), Christian Schwier (184, 222, 224), sdecoret (185), winyu (186), OFC Pictures (190), Tanja Esser (193), Alliance (194), nmann77 (196), filmbildfabrik (199), Jürgen Kottmann (203), Tobias (205), EKH-Pictures (206), mabofoto@icloud.com (207), Klaus Rose (208), Photography_AT (210), Vadzim Kandratsenkau (215), BillionPhotos.com (216), vegefox.com (216), JEFs-FotoGalerie (226), hespasoft (230), ArTo (230), Robert Poorten (231), Kara (232), Peeradontax (236), majonit (237), Tanja Bagusat (240), GordonGrand (243), embeki (245), majonit (248), miss_mafalda (248), Eduard Shelesnjak

(250), Julia Hermann (253), S. Peeradontax (256), bilderstoeckchen (256), ArTo (260), fabian (262), tunedin (263), highwaystarz (266), Svetlana (266), Mitch (267), kiono (268), markobe (273), Rusch (276), helmutvogler (276), TimSiegert-batcam (277), vectorfusionart (278), Anton Dmitriev (281), marcus_hofmann (283), Bernhard (284), Stefan Loss (287), Sina Ettmer (288), paru (288), Yes-Photographers (289), Adrian72 (290)

LANUV

LANUV (5), N. Eickenscheidt (151, 159, 163)

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

Energieagentur.NRW: Tobias Kemper; Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr der RWTH Aachen: Simon Hein, Alice Neht, Kathrin Prenger-Berninghoff, Loisa Welfers, Andreas Witte; LANUV: Chris Bamminger, Ellen Grothues, Christoph Grüneberg, Nicole Kauke, Fabian Kehnen, Anja Klosterköther, Jens Kolk, Antje Kruse, Alessandra Kunzmann, Michael Petrak, Christina Seidenstücker, Sophie Trottenberg, Ingo Wolff; MWIDE: Björn Fleischer; Winterberg Touristik und Wirtschaft GmbH: Winfried Borgmann

Fachredaktion

Ellen Grothues, Antje Kruse, Ingo Wolff (alle LANUV)

Gestaltung

liniezwei Kommunikationsdesign GbR

ISSN

1864-3930 (Print), 2197-7690 (Internet), LANUV-Fachbericht

Kartengrundlage

Sofern nicht anders angegeben: Land NRW (2021): Datenlizenz Deutschland – Zero (<https://www.govdata.de/dl-de/zero-2-0>)

Stand

November 2021

Informationsdienste

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

Bereitschaftsdienst

Nachrichtenbereitschaftszentrale des LANUV
(24-Std.-Dienst) Telefon 0201 714488

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

Landesamt für Natur, Umwelt und
Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

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

www.lanuv.nrw.de