



Dürren und Waldbrände unter Klimawandel

Andreas Marx, Veit Blauhut, Friedrich Boeing, Matthias Forkel, Michael Hagenlocher, Mathias Herbst, Peter Hoffmann, Christian Kuhlicke, Rohini Kumar, Mariana Madruga de Brito, Luis Samaniego, Kirsten Thonicke und Markus Ziese

Inhaltsverzeichnis

- 11.1 Dürre – 132**
 - 11.1.1 Meteorologische Dürre – 132
 - 11.1.2 Agrarische Dürre – 133
 - 11.1.3 Hydrologische Dürre – 134
 - 11.1.4 Dürrefolgen und -risiken – 135
- 11.2 Waldbrände – 137**
 - 11.2.1 Bestandsaufnahme – 137
 - 11.2.2 Projektionen – 137
 - 11.2.3 Perspektiven – 138
- 11.3 Kurz gesagt – 139**
 - Literatur – 140**

11.1 Dürre

Dürren sind natürliche Phänomene, die durch unterdurchschnittliche Wasserverfügbarkeit gekennzeichnet sind. Daher können Dürren auch in einer insgesamt wasserreichen Region wie Deutschland auftreten (z. B. Hirschfeld 2015). Im Gegensatz zur Trockenheit (oder „Aridität“), die auf der Basis langjähriger mittlerer Wasserverfügbarkeit bestimmt wird, sind Dürren zeitlich begrenzte Extremereignisse. Sie haben in der öffentlichen Wahrnehmung in Deutschland lange Zeit eine untergeordnete Rolle gespielt, obwohl einzelne Ereignisse wie 2003 große multisektorale Auswirkungen mit Schäden von 8,7 Mrd. € in Mittel- und Südeuropa hervorgerufen haben (EC 2007). Die langanhaltende Dürre 2018 bis 2020 mit den multisektoralen Auswirkungen (z. B. de Brito et al. 2020) hat zu einer erhöhten Aufmerksamkeit geführt. Dürre entwickelt sich schleichend, ist großräumig, meist persistent und verursacht oftmals Kaskadeneffekte (Wilhite 2016).

Die Komplexität von Dürren zeigt sich in der Dauer von Wochen bis hin zu Jahrzehnten sowie der Schwierigkeit, Beginn und Ende des Ereignisses eindeutig zu definieren. Der Zeitpunkt des Auftretens, die Dauer und Intensität sowie damit einhergehende Folgen machen jedes Dürreereignis einzigartig (Blauhut et al. 2016).

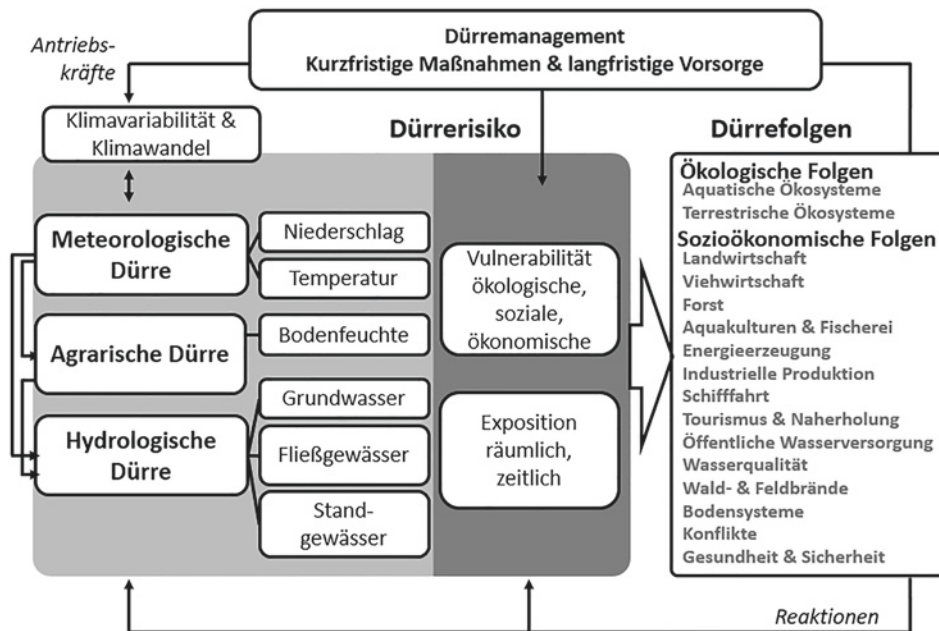
Zur Komplexität trägt bei, dass dabei, je nach Kontext, zwischen unterschiedlichen Dürrearten differenziert werden kann (■ Abb. 11.1) – etwa zwischen meteorologischen (z. B. Niederschlag), agrarischen

(Bodenfeuchte, Pflanzenzustand) und hydrologischen (Oberflächen- oder Grundwasser) Dürren. Um mögliche Dürrefolgen besser vorhersehen und abwenden zu können, werden Dürreerisiken zudem verstärkt für unterschiedliche Sektoren als auch multisektoral betrachtet (z. B. Hagenlocher et al. 2019; Zink et al. 2016).

Dürrearten werden mithilfe einer Vielzahl von Indizes klassifiziert. Dabei kann im Wesentlichen zwischen statistischen Ansätzen, Schwellenwertverfahren (z. B. Unterschreitung von Werten der nutzbaren Feldkapazität) oder einer Kombination aus beiden (z. B. McKee 1993; Samaniego et al. 2013) unterschieden werden. Je nach Indexauswahl und betrachteter Referenzperiode werden so unterschiedliche und schwer vergleichbare Ergebnisse produziert sowie unterschiedliche Aspekte der physischen Eigenschaften der Dürre beleuchtet. Ein umfassendes Verständnis über das Ereignis kann nur durch eine multidisziplinäre Herangehensweise einschließlich der sozioökonomischen Auswirkungen gewonnen werden (Erfurt et al. 2020).

11.1.1 Meteorologische Dürre

Unter meteorologischen Dürren sind über mindestens ein bis zwei Monate andauernde, ungewöhnlich niedrige Niederschlagsmengen zu verstehen (McKee 1993). Dies tritt in Deutschland vor allem dann auf, wenn ein ausgeprägtes Hochdruckgebiet über Mittel-, Ost- oder Nordeuropa liegt. Derartige Großwetterlagen sind mit geringen Niederschlagsmengen und zumeist im Som-



■ Abb. 11.1 Schematische Darstellung unterschiedlicher Dürrearten und ihrer Wechselwirkungen, Dürreerisiko und Dürrefolgen aus dem European Drought Impact Report Inventory (EDII)

mer mit Hitze- und im Winter mit Kältewellen verbunden. Eine Hitzewelle begünstigt zudem die Verdunstung, was das Niederschlagsdefizit nochmals verschärft.

Zur Detektion meteorologischer Dürren werden neben Niederschlagsanomalien auch Dürreindizes verwendet. Häufig werden dazu der *Standardized Precipitation Index* (SPI; McKee 1993), der *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index* (SPEI; Vicente-Serrano 2010) oder der *Palmer Drought Severity Index* (PDSI; Palmer 1965) verwendet, es gibt jedoch eine Vielzahl weiterer Dürreindizes (WMO und GWP 2016). Analysen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zeigen keinen Trend im Jahresmittel der Niederschlagsmengen über die Jahre 1951 bis 2005 (Rustemeier et al. 2017). Jahreszeitlich nehmen die Niederschlagsmengen im Sommer ab, kompensiert durch Zunahmen im Herbst und Winter. Dieses Ergebnis wird durch Dai und Zhao (2017) bestätigt, welche Trends des PDSI für den Zeitraum von 1950 bis 2012 berechneten. Trotz der gleichbleibenden Niederschlagsmenge kommt es häufiger zu Dürren infolge der klimawandelbedingten Temperaturzunahme. Nach Spinoni et al. (2016) ergibt sich 1950 bis 2012 eine Zunahme der Dürrehäufigkeit im Nordwesten und eine Abnahme im Südosten Europas, während über Deutschland kein eindeutiger Trend erkennbar ist. Breinl et al. (2020) untersuchten Trends in der Länge der längsten Trockenperioden im Zeitraum von 1958 bis 2017. Hier zeigt sich, dass Deutschland im Grenzbereich zwischen einer Verkürzung im Westen und Verlängerung im Osten liegt. Die trockenen aufeinanderfolgenden Sommer 2018 und 2019 wiederum sind beispiellos für die vergangenen 250 Jahre. Seit 1766 hat es in Mitteleuropa keine zweijährige Sommerdürre dieses Ausmaßes gegeben, mehr als 50 % des Ackerlandes waren davon betroffen (Hari et al. 2020).

Je nach verwendetem Dürreindex zeigen sich Unterschiede in den projizierten Trends: der SPEI zeigt bis zum Ende des Jahrhunderts (SRES-Szenario A1B) eine Zunahme der Dürrehäufigkeit im ganzen Land während der SPI eine Abnahme im Westen und Süden und eine Zunahme im Osten zeigt (Spinoni et al. 2016). Unter starkem Klimawandel (Szenario RCP8.5) erwarten Zhou und Tao (2013) eine Dürreabnahme für die ferne Zukunft (2081–2100). Pascale et al. (2016) simulieren eine Zunahme der Anzahl der Trockentage trotz unveränderter Jahresniederschlagsmengen für die ferne Zukunft (2070–2100, RCP8.5). Steigende Temperaturen werden zukünftig das Auftreten von Dürren durch die steigende potenzielle Verdunstung beeinflussen.

Da die Darstellung des Niederschlags in den Klimaprojektionen mit Unsicherheiten behaftet ist, werden alternativ bestimmte Großwetterlagen zur Einschätzung künftiger Entwicklungen genutzt (Samaniego und Bárdossy 2007). Darauf aufbauend wurde

basierend auf Beobachtungsdaten in Hoffmann und Spekat (2020) die Tendenz einer zunehmenden Frühjahrstrockenheit, die von Südwesteuropa bis nach Mitteleuropa reicht, abgeleitet.

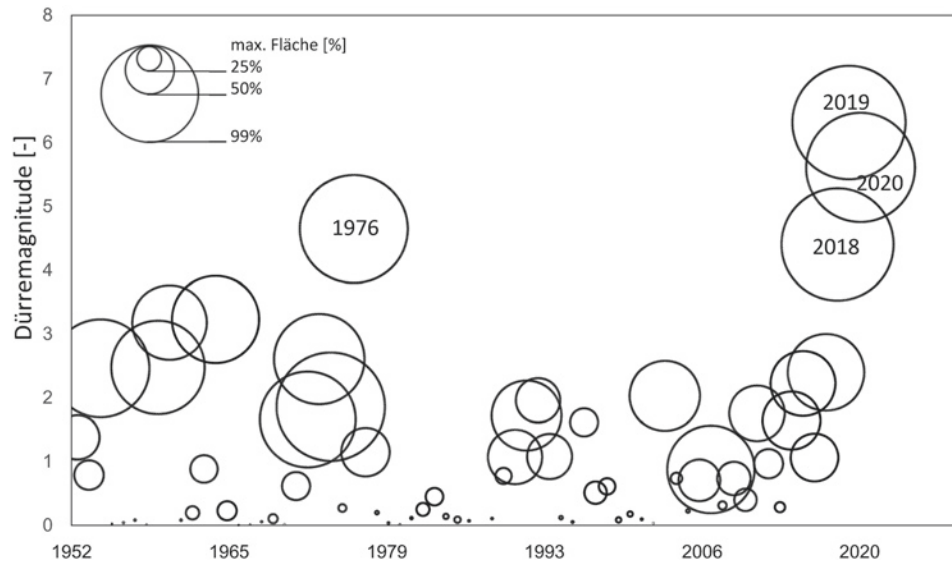
11.1.2 Agrarische Dürre

Die agrarische Dürre zeichnet sich insbesondere durch ein Bodenfeuchtedefizit (► Kap. 16) aus. Die Bodenfeuchte spiegelt die komplexen Wechselwirkungen zwischen dem Wasser-, Energie- und Kohlenstoffkreislauf wider (Berg und Sheffield 2018). Für Agrarökosysteme ist die Menge des pflanzenverfügbaren Wassers im Boden wichtig. Sie hängt neben meteorologischen Variablen z. B. von der Bodenart und dem Humusgehalt ab. Ein Lehm Boden kann mehr Wasser halten als ein Sandboden, und Humus kann bis zum 20-Fachen seines Eigengewichts an Wasser speichern. Außerdem spielen Grundwasserstand und die aktuelle Wurzeltiefe und ihre jahreszeitliche Veränderlichkeit bei der Entstehung von Dürren eine Rolle. Wenn der Wasserbedarf der Pflanzen nicht mehr gedeckt wird, können eine Einschränkung des Pflanzenwachstums, eine stärkere Anfälligkeit der Pflanzen gegenüber Krankheiten und Schädlingen oder Ernteeinbußen resultieren.

Für die Dürreklassifizierung werden zumeist modellierte Variablen wie der Bodenwassergehalt, die nutzbare Feldkapazität oder Bodenfeuchte und der Pflanzenzustand aus der Fernerkundung genutzt. Die Auswahl des Impaktmodells stellt dabei eine nicht zu vernachlässigende Unsicherheitsquelle dar (z. B. Samaniego et al. 2018). Auch bei der agrarischen Dürre werden methodisch unterschiedliche Indizes genutzt. Die Mächtigkeit des betrachteten Bodenvolumens beeinträchtigt zudem die Trägheit des Systems. Auslöser für agrarische Dürren sind neben ausbleibendem Niederschlag zunehmend auch die Verdunstung durch überdurchschnittliche Temperaturen und Hitzewellen (Ionita et al. 2020). Kurzanhaltende Dürren müssen nicht zwangsläufig zu Schäden führen und können bei überdurchschnittlichem Strahlungsdargebot sogar zu erhöhter Pflanzenproduktivität beitragen (van Hateren 2020). Agrarische Dürrefolgen finden sich vorwiegend in der Land- und Forstwirtschaft (► Kap. 18 und 19).

Studien zu historischen Trendabschätzungen agrarischer Dürren haben aufgrund methodischer Unterschiede in den letzten Jahren nicht zu eindeutigen Ergebnissen geführt. In Samaniego et al. (2013) wurden simulierte tägliche Bodenfeuchtefelder des Gesamtbodens (mittlere Tiefe über Deutschland ca. 180 cm) für die Quantifizierung großer Dürreereignisse in Deutschland verwendet. Die Ergebnisse zeigen auch, dass die Unsicherheiten durch die Kalibrierung von Modellparametern die resultierenden Dürrestatistiken beeinflussen. Basierend auf 200 Simulationen hat das Ereignis

■ **Abb. 11.2** Jährliche Dürremagnitudo (aus Andauer, betroffener Fläche und Dürrestärke) des Gesamtbodens in Deutschland für die Vegetationsperiode (April–Oktober) sowie die maximale Dürreausdehnung in Prozent der Fläche Deutschlands (Größe der Blase). Die Jahre 2018–2020 waren unter den vier größten Ereignissen. (Quelle: A. Marx. & F. Boeing, Deutscher Dürremonitor, UFZ)



nis von 1971 bis 1974 eine 67-prozentige Wahrscheinlichkeit, das längste und schwerste Dürreereignis im Zeitraum von 1950 bis 2010 zu sein. Ein *Update* der Studie wurde in Zink et al. (2016) und danach fortlaufend im Deutschen Dürremonitor¹ durchgeführt. Hierbei hat sich gezeigt, dass die größten jährlichen Dürren des Gesamtbodens in der Vegetationsperiode (April–Oktober) in den Jahren 2018 bis 2020 und 1976 auftraten (■ Abb. 11.2). Dazu wurde eine Magnitudo aus Andauer, betroffener Fläche und Dürrestärke berechnet.

Demgegenüber waren die größten Vegetationsperiodedürren des Oberbodens (bis in eine Tiefe von 25 cm), in der Reihenfolge ihrer Größe, die Jahre 2018, 1959, 2003 und 1976.

Laut Daten des Deutschen Wetterdienstes hat die mittlere Bodenfeuchte in der Hauptwurzelzone vieler Ackerpflanzen (0–60 cm) im Frühjahr und Frühsommer seit 1961 deutschlandweit deutlich abgenommen. Dürren können aber auch regional sehr unterschiedlich ausgeprägt sein. In Baden-Württemberg waren nach Größe geordnet in den Jahren 2018, 2003, 1991 und 2015 die größten Flächen von Dürre in der durchwurzelten Zone betroffen (Tijdeman und Menzel 2020). Besonders gelitten unter der zunehmenden Bodentrockenheit haben der Nordosten Deutschlands sowie das Rhein-Main-Gebiet (UBA 2019), wo es bereits jetzt im Zeitraum April bis Juni durchschnittlich etwa 40 Trockentage (weniger als 50 % nutzbare Feldkapazität) und örtlich bis zu 20 Tage mit extremer Bodentrockenheit (weniger als 30 % nutzbare Feldkapazität) pro Jahr gibt. Geht der Klimawandel ungebrems weiter, ist mit einer starken Risikozunahme in Bezug auf Dürren und deren Folgen zu rechnen. Basierend auf Daten aus Samaniego et al. (2018) ergab

sich bei einer globalen Erwärmung von drei Grad Celsius und unveränderter Landnutzung im Bundesdurchschnitt eine Verlängerung der Zeiten unter Dürre um mehr als die Hälfte. Für Teile Südwestdeutschlands wurde eine Verdoppelung der Zeiten unter Dürre abgeschätzt. Eine Eindämmung der Erderwärmung auf 2 °C bzw. 1,5 °C würde den Anstieg der Dürredauer im deutschlandweiten Mittel auf ungefähr 18 % reduzieren (Thober et al. 2018). In der gesamten Bundesrepublik nimmt die Wasserverfügbarkeit innerhalb der Vegetationsperiode ab, sodass sich vor allem eine Notwendigkeit zur Anpassung in der Landwirtschaft ergibt (► Kap. 18).

11.1.3 Hydrologische Dürre

Hydrologische Dürren sind, genau wie agrarische Dürren, langsam entstehende und langanhaltende Extremereignisse, die mehrere Monate bis Jahre andauern können (Brunner und Tallaksen 2019). Sie können sich sowohl auf ungewöhnlich niedrige Wasserstände in Oberflächengewässern wie Flüssen oder Seen als auch Grundwasserstände beziehen. Die Geschwindigkeit des Dürresignals im hydrologischen System variiert regional stark und hängt maßgeblich von den Eigenschaften eines Einzugsgebiets ab. Die Wasserspeicherkapazität des Einzugsgebiets wird von Klima (z. B. Schnee, Staudinger et al. 2014), Geologie, Topografie, Boden, Landnutzung und Vegetation bestimmt (van Loon 2015; Kumar 2016).

Ökonomische Auswirkungen durch Niedrigwasser treffen unter anderem die Binnenschifffahrt, Energiewirtschaft, Trinkwasserversorgung, Industrie und Landwirtschaft (Stahl et al. 2016). Bei abnehmenden Wasserdurchflüssen und gleich-

1 ► www.ufz.de/duerremonitor

bleibenden Schadstoffeinträgen erhöhen sich zudem die Schadstoffkonzentrationen. In Kombination mit erhöhten Wassertemperaturen kann es z. B. zu Beeinträchtigungen von thermischen Kraftwerken oder ökologischen Auswirkungen kommen.

Zur Bestimmung hydrologischer Dürren werden unterschiedliche Indizes und Methoden auf der Basis von Gewässermengendaten genutzt. Ein aktueller Überblick mit einer Einschätzung der Anwendbarkeit findet sich bei Stahl et al. (2020). Meteorologische Indizes sind weniger geeignet, da die unterschiedlichen Reaktionszeiten von Einzugsgebieten nur bedingt dargestellt werden können (u. a. Kumar et al. 2016). Um Niedrigwasser zu beschreiben, wird häufig ein Schwellenwertverfahren (z. B. 90 % Perzentil), der minimale 7-Tages-Abfluss oder die maximale Niedrigwasserdauer verwendet. Sutanto et al. (2020) haben gezeigt, dass unterschiedliche Methoden die Dürreinschätzungen stark beeinflussen können, während bei extremen Dürren die Ergebnisse unterschiedlicher Indizes konvergieren (Moravec et al. 2019).

Niedrigwassersituationen sind in Deutschland vor allem in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts (etwa 1921, 1947) häufiger aufgetreten (BfG 2019). Für Südwestdeutschland wurden in einer Studie Dürren für den Zeitraum von 1901 bis 2018 klassifiziert. Dabei sind beispielsweise 1921, 1949, 2003 und 2018 an Rhein und Donau als extreme Dürrejahre identifiziert worden, ohne dass ein signifikanter Trend festgestellt werden konnte (Erfurt et al. 2019). Parry et al. (2012) haben u. a. eine mehrjährige Dürreperiode von 1962 bis 1964 und als ausgeprägte Sommerdürre 1976 in den Flüssen Nordwest- und Westdeutschlands identifiziert. Grundwasserdürren traten in Süddeutschland beispielsweise in den Jahren 1996 und 1998 auf (Kumar et al. 2016). Als Folge der agrarischen Dürre 2018 und 2019 sind die mittleren Grundwasserstände in Niedersachsen 2019 ganzjährig niedriger gewesen als im Referenzzeitraum von 1988 bis 2017. Insgesamt wurde der mittlere Jahrestiefstand im Jahr 2019 an 96 % der Messstellen unterschritten (NLWKN 2020).

Für die ferne Zukunft (2071–2100) wird eine Zunahme der Niedrigwassersituationen im Sommer und eine Abnahme im Winter erwartet (BMVI 2015; Marx et al. 2018). Bereits heute bestehende Nutzungskonflikte zwischen Trinkwasserversorgung, Energiegewinnung, Industrie, landwirtschaftlichen Bewässerung und Naturschutz würden sich bei extremeren Niedrigwasserverhältnissen verschärfen (NLWKN 2019).

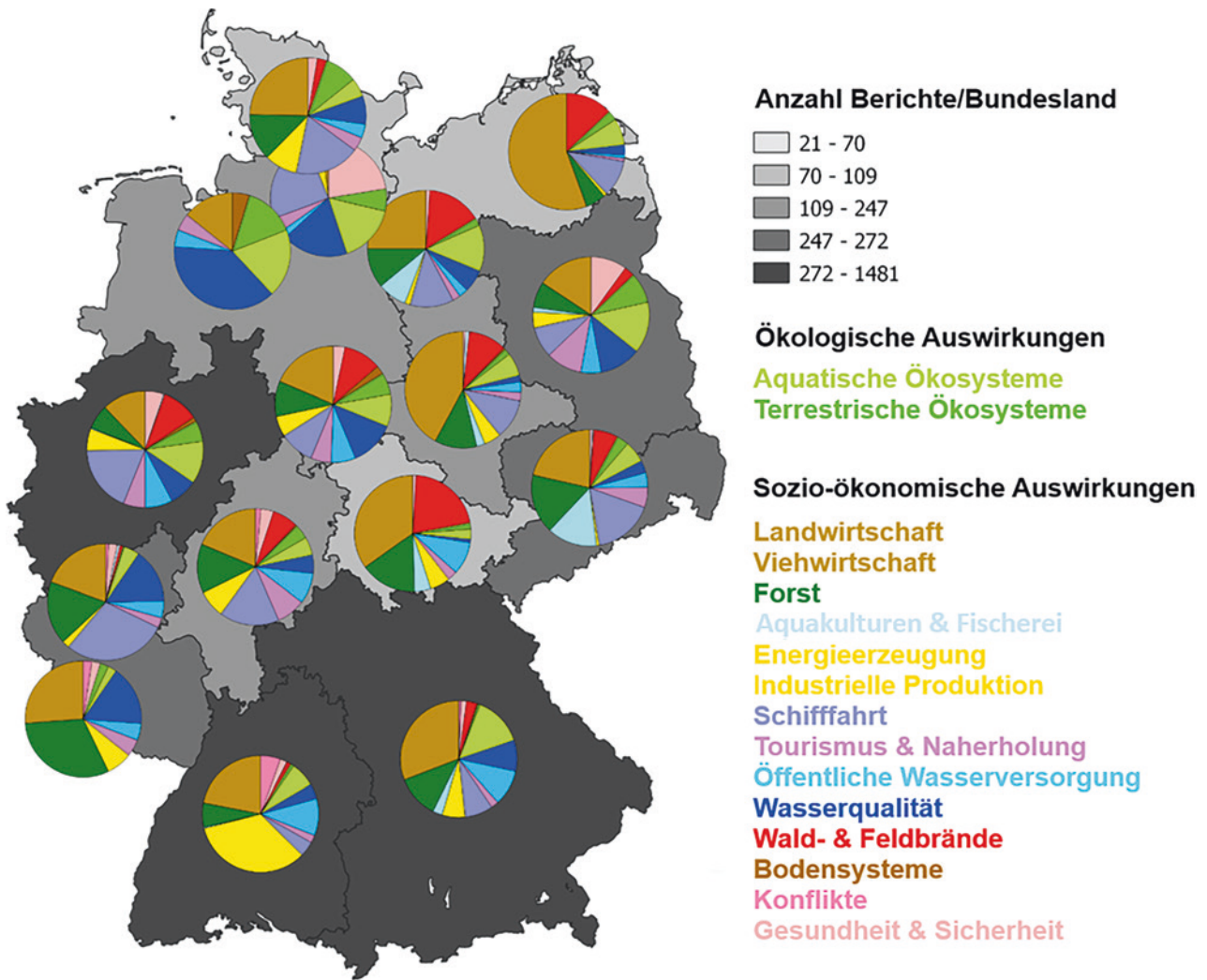
11.1.4 Dürrefolgen und -risiken

Die Folgen der zuletzt häufiger aufgetretenen Dürreereignisse (2003, 2011, 2015, 2018–2020) verdeutlichen die multiplen Risiken durch diese Naturgefahr

in Deutschland (z. B. Erfurt et al. 2020). Beispielsweise konnten in Baden-Württemberg von 2015 bis 2019 jährlich auftretende Folgen für die Wasserversorgung und Wasserkraft nachgewiesen werden (Blauhut et al. 2020). De Brito et al. (2020) zeigten für die Dürren von 2018/19, dass in Deutschland die Forstwirtschaft einer der am stärksten betroffenen Sektoren war, gefolgt von Land- und Viehwirtschaft sowie der Energieproduktion. 2019 wurde erstmalig eine Risikoanalyse des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) zu Dürren vorgelegt (Deutscher Bundestag 2019). Dabei wurden auf einem *reasonable worst case scenario* sowohl Handlungsempfehlungen gegeben als auch Wissenslücken identifiziert.

Informationen zu Dürrefolgen finden sich in erhobenen und modellierten Daten der statistischen Landesämter und Verbände. Letzteren fehlt allerdings meist eine eindeutige Attribution zu Dürre (Kreibich et al. 2019). Mittels einer raum-zeitlich referenzierten und nach Handlungsfeldern kategorisierten Sammlung von Dürrefolgenberichten, dem *European Drought Impact Report Inventory* (EDII) konnte länderübergreifend dargestellt werden, dass Dürrefolgen in Deutschland weit über den Sektor Landwirtschaft hinausgehen und weitere Bereiche wie den Tourismus, die Wasserversorgung, Gesundheit aber auch Ökosysteme betreffen (Stahl et al. 2016). Je nach Art und Intensität direkter Dürrefolgen (z. B. auf Ernteerträge) entstehen und verbreiten sich weitere, sekundäre Folgen, welche in Abhängigkeit des Ereignisses einem kaskadierenden Muster folgen können. In den Dürre Jahren 2018/19 waren Ernteverluste und reduziertes Waldwachstum die Hauptauswirkung, welche dann in Kaskadeneffekten zu sekundären Folgen (z. B. Futtermangel, frühzeitiges Schlachten, monetäre Verluste) geführt haben (de Brito 2021).

Die Wahrscheinlichkeit, dass Dürrefolgen auftreten, also das Dürreerisiko, leitet sich ab aus dem Dürreereignis sowie der Exposition von sozioökonomischen und ökologischen Systemen, deren Vulnerabilitäten, insbesondere deren Anfälligkeit und Bewältigungskapazität (z. B. Vogt et al. 2018; Hagenlocher et al. 2019). Unterschieden werden Dürreerisikoanalysen dabei in Anbetracht ihres Fokus (generell oder sektorspezifisch), ihrer Dynamik (statisch oder dynamisch), Datengrundlage (ursachenbasierter Ansatz versus folgenbasierter Ansatz) und Methodik (Blauhut 2020). Aufgrund der Vielzahl zu berücksichtigender Faktoren und inhärenten Dynamiken ist eine Bewertung des Dürreerisikos komplex. Um jedoch Dürrefolgen besser verstehen und mindern zu können, ist es wichtig, über eine reine Schadensanalyse hinauszugehen und auch die Ursachen sowie raumzeitlichen Dynamiken von Dürreerisiken zu evaluieren. Notwendige Informationen zur Charakterisierung der Vulnerabilität unter-



■ **Abb. 11.3** Anzahl von Dürrefolgenberichten je Bundesland (unterschiedliche Grauwerte) sowie Verteilung auf die unterschiedlichen Handlungsfelder (farbige Tortendiagramme), die Risiken verzeichnen. Daten stammen aus dem *European Drought Impact Report Inventory* (EDII). (Quelle: Blauhut und Stahl 2018)

schiedlicher Sektoren, wie beispielsweise politischer Umsetzungswille oder Ökosystemdienstleistungen, sind jedoch oft nur schwer quantifizierbar. Daher ist die Integration von Expertenwissen ein essenzieller Bestandteil von umfassenden Risikoanalysen (Hagenlocher et al. 2019; Blauhut 2020). Ein Katalog kontextspezifischer Methoden und grundlegenden Ansprüchen an Informationen (wie z. B. Ursachen der Verwundbarkeit und entsprechende Indikatoren), basierend auf vergleichenden Studien, fehlt. Daher bedarf es weiterführender methodischer Ansätze, fachlicher Standards und praxisrelevanter Konzepte zur Analyse und zum Monitoring von Dürre hinsichtlich Dürregefahren, Exposition, Vulnerabilität und Risiken aller potenziell betroffenen Sektoren und Systeme (Hagenlocher et al. 2019; Kreibich et al. 2019; Blauhut et al. 2020).

Erste bundesweite, EDII-basierte Analysen zeigen die Vielfalt an Dürreerisiken (■ Abb. 11.3) sowie

die regionalen und handlungsfeldspezifischen Unterschiede. Hinzu kommen regionale Risikoanalysen, beispielsweise zum Dürreerisiko der Wasserkraft in Baden-Württemberg (Siebert et al. 2021) oder der Landwirtschaft in Nordost- und Mitteldeutschland (Schindler et al. 2007). Für ein flächendeckendes, einheitliches und zielgerichtetes Dürreerisikomanagement fehlen in Deutschland zurzeit explizite gesetzliche Regelungen, fachliche Standards und eine etablierte Praxis (Caillet et al. 2018). Um dies zu ändern, sollte für zukünftige Arbeiten der Begriff „Dürre“ im deutschen Wasserhaushaltsgesetz grundlegend definiert werden (Zoth 2020). Während viele Sektoren in Deutschland von einer hohen Anfälligkeit gegenüber Dürren charakterisiert sind, haben die vergangenen Dürrejahre gezeigt, dass Deutschland und die Europäische Union im globalen Vergleich eine hohe Bewältigungskapazität haben. So konnten 2018 beispielsweise in sehr kurzer

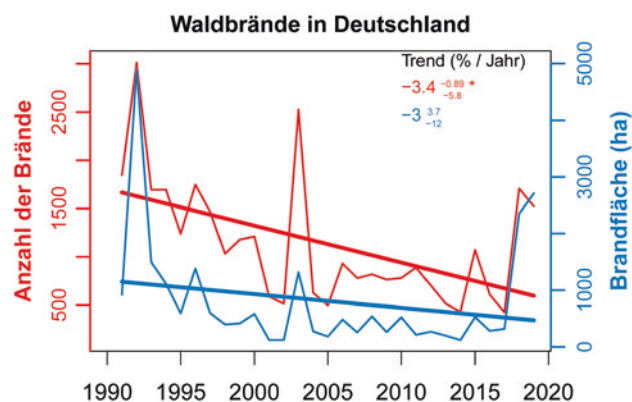
Zeit Ausgleichszahlungen an durch Dürre betroffene Landwirte geleistet werden.

11.2 Waldbrände

11.2.1 Bestandsaufnahme

Vegetationsbrände in Wäldern, Wiesen, Mooren oder auf landwirtschaftlichen Flächen ergeben sich aus dem Zusammenspiel von Wetterbedingungen, dem verfügbaren Brennmaterial und den Entzündungsquellen (Pyne et al. 1996). Diese Faktoren sind ständigen Veränderungen und Anpassungen unterworfen, die durch Klimaschwankungen, Veränderungen der Vegetationsstruktur, dem Aufbau einer Streuschicht und durch den Menschen hervorgerufen werden. Brände treten in Deutschland vornehmlich als Waldbrände auf oder werden gezielt zur Landschaftspflege und zum Erhalt geschützter Biotope (z. B. Heideflächen) gelegt. Sie sind in Deutschland im Vergleich mit anderen Regionen Europas (z. B. Mittelmeerraum) vergleichsweise selten und eher klein, da es in der Regel keine sehr heißen und extrem trockenen Bedingungen gibt, die eine Entzündung und Ausbreitung von Bränden befördern würden. Die Hauptursache für Waldbrände sind menschliche Aktivitäten. Blitzschlag ist die einzige natürliche Waldbrandursache in Deutschland und führt meist nur zu kleineren Bränden (Müller 2019). Die meisten Waldbrände treten in Nordostdeutschland, insbesondere in Brandenburg und Nordsachsen, auf. Diese Regionen weisen v. a. sandige und trockene Böden und eine weitreichende Verbreitung von Kiefernwäldern mit Bodestreuaufgaben auf, die eine Entzündung von Waldbränden begünstigen können.

In Deutschland treten im Durchschnitt ca. 1100 Waldbrände pro Jahr auf, die eine Brandfläche von ca. 800 ha verursachen (EFFIS 2020). Dabei ist sowohl bei der Anzahl der Waldbrände als auch bei der Brandfläche ein Rückgang festzustellen (Abb. 11.4). Seit 1991 ging die Anzahl der Brände in Deutschland signifikant um 3,4 % pro Jahr zurück. Der Rückgang der Waldbrände in Brandenburg und in Deutschland insgesamt lässt sich vor allem mit einer verringerten militärischen Nutzung der Wälder, dem Aufbau moderner Waldbrandbeobachtungssysteme und einer veränderten Altersstruktur der Wälder erklären. Allerdings hat über den gleichen Zeitraum die Klimavariabilität zugenommen, was die zunehmende Anzahl an Tagen mit hoher Waldbrandwarnstufe (Witlich et al. 2011) zeigt. Trotz des allgemeinen Rückgangs der Waldbrandaktivität in Deutschland zeigen insbesondere die Jahre 2018 und 2019, dass in extremen Dürrejahren weiterhin große Brände vor allem in Nadelwäldern auftreten können.



■ **Abb. 11.4** Anzahl (rot) und Flächen (blau) der Waldbrände in Deutschland 1991–2019. Der lineare Trend (durchgezogene Linie) ergibt eine Abnahme von $-3,4\%$ pro Jahr bei der Anzahl der Brände (rot) und -3% pro Jahr bei der Brandfläche (blau). (Quelle: Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung 2020)

In diesen beiden Jahren brannten Wälder insbesondere in Brandenburg sowie in Niedersachsen, Bayern, Sachsen und Sachsen-Anhalt. Nur 1992 verbrannte eine größere Fläche (knapp 5000 ha) in Deutschland. Zudem können in extremen Dürrejahren einzelne Waldbrandereignisse für über die Hälfte der gesamten Waldbrandfläche verantwortlich sein, wie 2018 und 2019 in Brandenburg in Mecklenburg-Vorpommern geschehen (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung 2020). Zudem hat sich die Waldbrandsaison vom Sommer immer weiter auch in Richtung Frühjahr ausgedehnt. Insgesamt führte der bisherige Klimawandel zu einer Verstärkung der Waldbrandgefahr in Deutschland: Extrem hohe Waldbrandgefahrenstufen treten in kürzeren Intervallen auf (Wastl et al. 2012) und die Waldbrandgefahr innerhalb einer Saison nahm seit 1958 in Mittel- und Nordostdeutschland signifikant zu (Lavalle et al. 2009). Obwohl also die klimatisch bedingte Waldbrandgefahr steigt, können Maßnahmen wie effektive Monitoringsysteme, die Anlage von Schutzstreifen und weniger brennbaren Waldbrandriegeln die Feuerausbreitung einschränken (Müller 2020).

11.2.2 Projektionen

Inwiefern die zunehmende Feuergefährdung in der Zukunft das tatsächliche Auftreten von Waldbränden beeinflusst, hängt nicht nur vom projizierten Klimawandel selbst ab, sondern auch wie sich das Waldwachstum, die Waldstruktur und der Wasserhaushalt der Waldökosysteme, inklusive seiner Böden, verändern. Offenere, stärker mit Gräsern bewachsene Nadelwälder können bei gleicher klimatischer Gefährdung die Feuerausbreitung begünstigen. Hingegen verringern dichte Wälder mit hohem Laubbaumanteil

und einer Krautschicht das Waldbrandrisiko, auch weil das geschlossene Kronendach für ein feuchteres Mikroklima sorgen kann. Eine entsprechende Fortsetzung des Waldumbaus mit einem erhöhten Laubbaumanteil zu mehrschichtigen Mischwäldern und mit mehr Baumarten könnte auch in der Zukunft das Waldbrandrisiko weiter reduzieren. Für die Entwicklung des zukünftigen Waldbrandgeschehens kommt der Streuauflage eine besondere Bedeutung zu. Die Feuchtigkeit, Menge und Dichte der Streu und des Totholzes regulieren die Sauerstoffzufuhr bei der Verbrennung und bestimmen dabei maßgeblich die Intensität und Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flammenfront und damit die Ausdehnung der Waldbrände. Jedoch kann eine zunehmende Streuauflage im Rahmen einer naturnahen Waldgestaltung das Waldbrandrisiko in extremen Dürrejahren erhöhen, was eine fortlaufende Abwägung und Einbettung in lokale Gegebenheiten erfordert. Um die zukünftige Entwicklung von Waldbränden abzuschätzen, sollte also zusätzlich zu den Projektionen der Waldbrandgefahr auch die Veränderung der Feuerregime (Feueranzahl, Waldbrandfläche und Feuerintensität) berücksichtigt werden, die mithilfe von statistischen Modellen oder gekoppelten Vegetation-Feuer-Modellen simuliert werden können.

Da Waldbrände im Mittelmeerraum ein größeres Problem darstellen, sind vor allem Projektionen der Waldbrandgefahr und der Veränderung der Feuerregime für diese Region (Amatulli et al. 2013; San-Miguel-Ayanz et al. 2013) oder für Europa, jedoch nur wenige speziell für Deutschland erstellt worden. Diese Studien verwenden globale oder regionale Klimaprojektionen des Vierten (AR4) und Fünften Sachstandsberichts (AR5) des Weltklimarates (IPCC). Um das zukünftige Waldbrandrisiko abzuschätzen, wird häufig das physikalisch basierte kanadische System für Waldbrandrisikoabschätzung FWI (*Fire Weather Index*; van Wagner 1987) verwendet. Auch der vom Deutschen Wetterdienst operationell bereitgestellte Waldbrandgefahrenindex (WBI; Wittich et al. 2014) beruht auf dem FWI, unterscheidet sich jedoch von diesem durch ein eigenes Streufeuchtemodell und eine empfindlichere Dynamik aufgrund von stündlichen Berechnungen. Statistische Modelle, die auf die Beziehungen zwischen zunehmender Trockenheit, höheren Temperaturen und Waldbrandgefahr zurückgreifen, werden ebenfalls verwendet (Lung et al. 2013). Gekoppelte Vegetation-Feuer-Modelle quantifizieren die Veränderung des klimatischen Waldbrandrisikos, der Feuerausbreitung, die Menge der verbrannten Biomasse sowie die Mortalität der durch das Feuer geschädigten Bäume (Hantson et al. 2016).

Generell ist das Bild der projizierten Veränderungen zukünftiger Waldbrände heterogen (■ Abb. 11.5), aber qualitativ einheitlich. Für Mitteleuropa wird eine zunehmende Waldbrandgefahr unter Klimawandel

prognostiziert (Wittich et al. 2011; Lung et al. 2013), die sich auch in eine Zunahme der Waldbrandflächen übertragen könnte (Migliavacca et al. 2013b; Wu et al. 2015). Je stärker der Klimawandel ausfällt, umso größer wird die zukünftige Waldbrandgefahr und umso höher die mögliche zukünftige Schadensfläche. Durch zunehmende Trockenheit und hohe Temperaturen in den Sommermonaten könnte die Feuersaison länger andauern und die Feuergefahr in Deutschland steigen (Holsten et al. 2013). Migliavacca et al. (2013b) führen die erhöhte Waldbrandfläche in Zentral- und Osteuropa auf zunehmend hohe Temperaturen zurück. Selbst bei Einhaltung des Zwei-Grad-Zieles würde sich die Waldbrandfläche in Nordostdeutschland merklich erhöhen. Unter stärkerem Klimawandel (Emissionszenario RCP8.5) würde sich die zukünftige Waldbrandfläche wahrscheinlich in allen Bundesländern mindestens verdoppeln (Wu et al. 2015), was eine neue Dimension für die Organisation der Waldbrandbekämpfung bedeuten könnte, während das Forstmanagement das zunehmende Waldbrandrisiko stärker in seinen Maßnahmen hinsichtlich des Brennmaterials berücksichtigen müsste.

Wie stark diese Veränderungen ausfallen könnten, ist sehr unsicher und hängt von der zukünftigen Entwicklung der Treibhausgasemissionen und damit dem Ausmaß der Erwärmung ab. Andererseits kann die Komplexität der klimatischen und Vegetationsfaktoren sowie der forstlichen Praktiken noch nicht ausreichend in Waldbrandmodellen abgebildet werden. Des Weiteren ist die Vergleichbarkeit der Ergebnisse durch die unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Aggregationen in den jeweiligen Studien erschwert. Aktuellste Projektionen der Waldbrandgefahr sind im Klimaatlas² des Deutschen Wetterdienstes zusammengefasst.

11.2.3 Perspektiven

Projektionen zukünftiger Waldbrände beinhalten bisher nur die klimatische Gefährdung, jedoch nicht die Interaktionen zwischen Bestandsstruktur, menschlicher Nutzung und Feuer, die Feuereffekte verstärken oder abschwächen können. Entsprechende Simulationsexperimente mit gekoppelten Vegetation-Feuer-Modellen, die ebenfalls durch Klimaprojektionen angetrieben wurden, zeigen für Zentraleuropa eine Zunahme der Waldbrandflächen und damit möglicherweise starke Änderungen der Feuerregime unter Klimawandel. Zunehmende Trockenheit und Temperaturen überwiegen mögliche Veränderungen im Nährstoff- und Wasser-

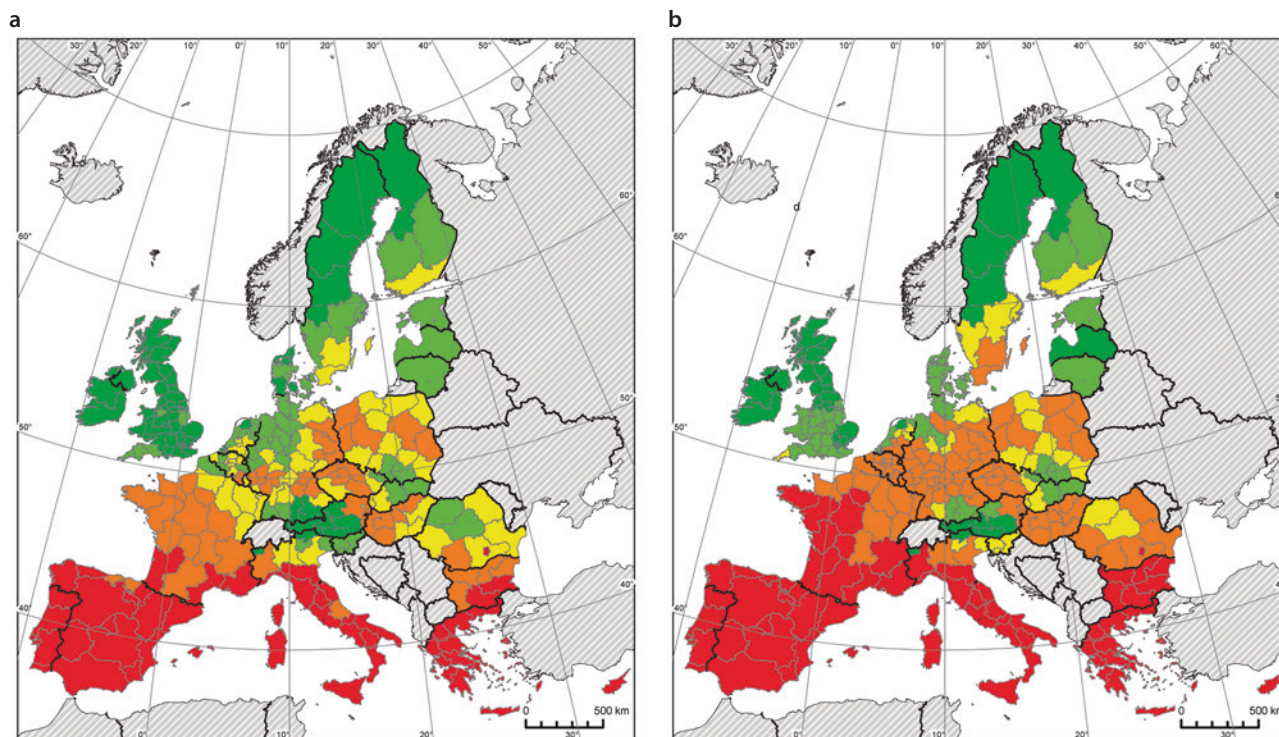


Abb. 11.5 Klimatisches Waldbrandrisiko im Vergleich zwischen **a** 1961–1990 und **b** 2041–2070: für europäische NUTS-2-Regionen unter **a** historischen Klimabedingungen 1961–1990 und **b** unter Emissionsszenario SRES A1B für 2041–2070. Durch zunehmende Trockenheit steigt in Deutschland zukünftig die Waldbrandgefahr deutlich: Zunehmend große Flächen zeigen eine sehr große (rot) oder große (orange) Gefahr. Die Gebiete mit mittelgroßer (gelb), nur kleiner (hellgrün) oder gar sehr kleiner (dunkelgrün) Gefahr schrumpfen zwischen den beiden Zeitperioden in nicht zu übersehendem Ausmaß (grau: keine Angaben). In Deutschland werden im Zeitraum von 2041–2070 kaum noch Gebiete ausgemacht, die nur mittel oder wenig gefährdet sind. (IPCC 2014, Kap. 23, nach Lung et al. 2013)

haushalt der Bäume wie dem CO_2 -Düngeneffekt (Migliavacca et al. 2013a; Wu et al. 2015). Das Waldbrandgeschehen wird auch in Zukunft durch menschliche Nutzung bestimmt, was insbesondere in extremen Dürrejahren zu starken Feuerereignissen führen kann.

Während Projektionen der Waldbrandgefahr den klimatischen Rahmen möglicher Veränderungen darstellen, quantifizieren gekoppelte Vegetation-Feuer-Modelle die Veränderung der Feuerregime in natürlicher Vegetation unter Klimawandel. Das bedeutet, dass die von ihnen projizierte Erhöhung der Waldbrandflächen für Laub- und Mischwälder Mitteleuropas gilt und die Gefährdung für angepflanzte Nadelwälder (etwa Kiefernmonokulturen) noch höher sein könnte. Waldbrände könnten in gleichaltrigen, gleichhohen Beständen ein leichtes Spiel haben, sollten die Flammen durch die hohe Feuerintensität die Baumkrone erreichen. Der fortgesetzte Umbau der Wälder zu vielschichtigen und artenreichen Wäldern erhöht nicht nur deren Anpassungsfähigkeit an den Klimawandel, sie trägt auch zur Reduzierung der Waldbrandgefahr bei, wenn das Klimaziel des Pariser Klimaabkommen eingehalten werden kann.

11.3 Kurz gesagt

Dürren und Waldbrände, und die damit verbundenen Risiken und möglichen Folgen, sind jeweils auf vielfältige Faktoren zurückzuführen, deren Zusammenwirken in der Gesamtheit betrachtet werden muss. Der menschliche Einfluss auf natürliche Prozesse erschwert oft die klare Zuordnung von Naturgefahren zum Klimawandel, besonders bei Waldbränden. Die vorbereitenden, auslösenden und kontrollierenden Faktoren werden in unterschiedlichster Weise vom Klimawandel beeinflusst. Dürren entwickeln sich schleichend mit oft nicht eindeutig definierbarem Anfang und Ende. Einflussfaktoren sind z. B. stabile Hochdruckwetterlagen mit ausbleibendem Niederschlag und zunehmender Verdunstung, abnehmende Schnee- und Gletscherschmelze, aber auch Eigenschaften von Böden oder hydrologischen Einzugsgebieten. Neben den biophysikalischen Betrachtungen nimmt die Bedeutung der Dürreerisiko- und Dürrefolgenermittlung sowie kaskadierender Effekte in Deutschland zu, sodass eine einheitliche Datenbasis dazu entwickelt werden sollte.

Für die Vergangenheit sind weder eindeutige und signifikante Dürre- noch Waldbrandtrends erkenn-

bar, wenn auch die Jahre 2018 bis 2020 ausgeprägte Schadensjahre waren. Unter Klimawandel wird das Risiko sowohl für Dürren als auch für Waldbrände in vielen Regionen Deutschlands steigen, was den Bedarf für ein gutes Monitoring und angepasstes Feuermanagement auch in der Zukunft unterstreicht. Die Rolle der Früherkennung und der Entwicklung entsprechender Systeme wird für die Anpassung an den Klimawandel eine entscheidende Rolle spielen.

Literatur

- Amatulli G, Camia A, San-Miguel-Ayanz J (2013) Estimating future burned areas under changing climate in the EU-Mediterranean countries. *Sci Total Environ* 450:209–222. ► <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.014>
- Berg A, Sheffield J (2018) Climate change and drought: the soil moisture perspective. *Curr Clim Change Rep* 4:180–191. ► <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0095-0>
- BfG (2019) Das Niedrigwasser 2018. ► https://doi.org/10.5675/BfG-Niedrigwasserbroschuere_2018
- BMVI (Hrsg) (2015) KLIWAS Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen Synthesebericht für Entscheidungsträger KLIWAS-57/2015. 10 5675/Kliwas_57/2015_Synthese
- Blauhut V (2020) The triple complexity of drought risk analysis and its visualisation via mapping: a review across scales and sectors. *Earth-Sci Rev* 210:103345. ► <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0012825220303913>
- Blauhut V, Stahl K (2018) Risikomanagement von Dürren in Deutschland: von der Messung von Auswirkungen zur Modellierung. S. 203–213. In: Schütze N et al (Hrsg) Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. Heft 39.18. Tagungsband zum Tag der Hydrologie 2018
- Blauhut V, Stahl K, Falasca G (2020) Dürre und die öffentliche Wasserversorgung in Baden-Württemberg: Folgen, Umgang und Wahrnehmung Wasserwirtschaft 2020/11
- Blauhut V, Stahl K, Stagge JH, Tallaksen LM, De SL, Vogt J (2016) Estimating drought risk across Europe from reported drought impacts, drought indices, and vulnerability factors. *Hydrol Earth Syst Sci* 20:2779–2800
- Breil K, Di Baldassarre G, Lun D, Vico G (2020) Extreme dry and wet spells face changes in their duration and timing. *Environ Res Lett* 15:074040. ► <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab7d05>
- Brunner MI, Tallaksen LM (2019) Proneness of European catchments to multiyear streamflow droughts. *Water Resour Res* 55(11):8881–8894. ► <https://doi.org/10.1029/2019WR025903>
- Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (2020) Waldbrandstatistik der Bundesrepublik Deutschland 2019. Bonn (Tabelle 7B). ► https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/BZL/Daten-Berichte/Waldbrandstatistik/Waldbrandstatistik-2019.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- Caillet V, Kraft M, Maurer V, Zoth P (2018) Die Mindestwasserführung als Instrument des Gewässerschutzes vor den Auswirkungen von Niedrigwasserereignissen. *Zeitschrift für Umweltpolitik und Umweltrecht (ZfU)* 3:385–409
- Chamorro A, Houska T, Singh SK, Breuer L (2020) Projection of droughts as multivariate phenomenon in the Rhine River. *Water* 12:2288
- Dai A, Zhao, T (2017) Uncertainties in historical changes and future projections of drought Part I: estimates of historical drought changes. *Clim Change* 519–533 ► <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1705-2>
- de Brito MM, Kuhlicke C, Marx A (2020) Near-real-time drought impact assessment: a text mining approach on the 2018/19 drought in Germany. *Environ Res Lett*. ► <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aba4ca>
- de Brito MM (2021) Compound and cascading drought impacts do not happen by chance: a proposal to quantify their relationships. *Sci Total Environ*. ► <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146236>
- Deutscher Bundestag (2019) Drucksache 19/9521. Unterrichtung durch die Bundesregierung. Bericht zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz 2018
- EC - European Commission (2007) Addressing the challenge of water scarcity and droughts in the European Union. ► http://ec.europa.eu/environment/water/pdf/1st_report.pdf
- EFFIS (2020) European Forest Fire Information System. ► <https://effis.jrc.ec.europa.eu/>
- Erfurt M, Glaser R, Blauhut V (2019) Changing impacts and societal responses to drought in southwestern Germany since 1800. *Reg Environ Chang*
- Erfurt M, Skiadaresis G, Tjeldeman E, Blauhut V, Bauhus J, Glaser R, Schwarz J, Tegel W, Stahl K (2020) A multidisciplinary drought catalogue for southwestern Germany dating back to 1801. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 20:2979–2995. ► <https://doi.org/10.5194/nhess-20-2979-2020>
- Hagenlocher M, Meza I, Anderson CC, Min A, Renaud FG, Walz Y, Siebert S, Sebesvari Z (2019) Drought vulnerability and risk assessments: state of the art, persistent gaps, and research agenda *Environ. Res Lett* 14:083002
- Hantson S, Arneth A, Harrison SP et al (2016) The status and challenge of global fire modelling. *Biogeosciences* 13:3359–3375. ► <https://doi.org/10.5194/bg-13-3359-2016>
- Hari V, Rakovec O, Markonis Y, Hanel M, Kumar R (2020) Increased future occurrences of the exceptional 2018–2019 Central European drought under global warming. *Sci Rep* 10
- Hirschfeld J (2015) Wo ist Wasser in Deutschland knapp und könnte es in Zukunft knapper werden? *Korrespondenz Wasserwirtschaft*. 8(11):711–715
- Holsten A, Dominic AR, Costa L, Kropp JP (2013) Evaluation of the performance of meteorological forest fire indices for German federal states. *For Ecol Manage* 287:123–131
- Hoffmann P, Spekat A (2020) Identification of possible dynamical drivers for long-term changes in temperature and rainfall patterns over Europe. *Theor Appl Climatol*. ► <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03373-3>
- Ionita M, Nagavciuc V, Kumar R, Rakovec O (2020) On the curious case of the recent decade, mid-spring precipitation deficit in central Europe. *npj Clim Atmos Sci*. ► <https://doi.org/10.1038/s41612-020-00153-8>
- IPCC (2014) Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Field, CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, 1132 pp
- Kreibich H, Blauhut V, Aerts JCHJ, Bouwer LM, Van Lanen HAJ, Mejia A, Mens M, Van Loon AF (2019) How to improve attribution of changes in drought and flood impacts *Hydrol. Sci J* 64:1–18. ► <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1558367>
- Kumar R, Musuza JL, Van Loon AF, Teuling AJ, Barthel R, Ten Broek J, Mai J, Samaniego L, Attinger S (2016) Multiscale evaluation of the standardized precipitation index Standardized Precipitation Index as a groundwater drought indicator. *Hydrol Earth Syst Sci* 20(3):1117–1131. ► <https://doi.org/10.5194/hess-20-1117-2016>

- Lavalle C, Micale F, Houston TD, Camia A, Hiederer R, Lazar C, Genovese G (2009) Climate change in Europe. 3. Impact on agriculture and forestry. A review (Reprinted). *Agron Sustain Dev* 29(3):433–446. ► <https://doi.org/10.1051/agro/2008068>
- Lung T, Lavalle C, Hiederer R, Dosio A, Bouwer LM (2013) A multi-hazard regional level impact assessment for Europe combining indicators of climatic and non-climatic change. *Glob Environ Chang* 23(2):522–536
- McKee T, Doesken N, Kleist J (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales, Eighth Conference on Applied Climatology
- Migliavacca M, Dosio A, Kloster S, Ward DS, Camia A, Houborg R, Cescatti A (2013a) Modeling burned area in Europe with the community land model. *J Geophys Res: Biogeosci* 118(1):265–279. ► <https://doi.org/10.1002/jgrg.20026>
- Migliavacca M, Dosio A, Camia A, Houborg R, Houston-Durrant T, Kaiser JW, Khabarov N, Krasovskii A, San Miguel-Ayanz J, Ward DS, Cescatti A (2013b) Modeling biomass burning and related carbon emissions during the 21st century in Europe. *J Geophys Res: Biogeosci* 118(4):1732–1747. ► <https://doi.org/10.1002/2013JG002444>
- Marx A, Kumar R, Thober S, Zink M, Wanders N, Wood EF, Ming P, Sheffield J, Samaniego L (2018) Climate change alters low flows in Europe under a global warming of 1,5, 2, and 3 degrees. *Hydrol Earth Syst Sci* 22:1017–1032. ► <https://doi.org/10.5194/hess-2017-485>
- Moravec V, Markonis Y, Rakovec O, Kumar R, Hanel M (2019) A 250-year European drought inventory derived from ensemble hydrologic modeling. *Geophys Res Lett* 46:5909–5917
- Müller M (2019) Waldbrände in Deutschland Teil 1. *AFZ-DerWald* 18/2019
- Müller M (2020) Waldbrände in Deutschland Teil 2. *AFZ-DerWald* 01/2020
- NLWKN (2020) Grundwasserbericht Niedersachsen. Sonderausgabe zur Grundwasserstandssituation in den Trockenjahren 2018 und 2019. ► https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/156169/NLWKN_2020_Grundwasserbericht_Niedersachsen_Sonderausgabe_zur_Grundwasserstandssituation_in_den_Trockenjahren_2018_und_2019_Band_41_.pdf
- NLWKN (2019) Der Klimawandel und seine Folgen für die Wasserwirtschaft im niedersächsischen Binnenland. Informationsdienst Gewässerkunde | Flussgebietsmanagement 2/2019
- Palmer WC (1965) Meteorological Drought, Research paper no.45
- Parry S, Hannaford J, Lloyd-Hughes B, Prudhomme C (2012) Multi-year droughts in Europe: analysis of development and causes. *Hydrol Res* 43:689–706. ► <https://doi.org/10.2166/Nh.2012.024>
- Pascale S, Lucarini V, Feng X, Porporato A, ul Hasson S (2016) Projected changes of rainfall seasonality and dry spells in a high greenhouse gas emissions scenario. *Clim Dynam* 46:1331–1350. ► <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2648-4>
- Pyne SJ, Andrews PL, Laven RD (1996) Introduction to wildland fire, 2. Aufl. Wiley, New York, S 769
- Rustemeier E, Meyer-Christoffer A, Becker A, Finger P, Schneider U, Ziese M (2017) GPCC Homogenized precipitation analysis HOMPR for Europe version 1.0 at 1,0°, Homogenized Monthly Land-Surface Precipitation and Precipitation Normals from Rain-Gauges built on GTS-based and Historic Data. ► https://doi.org/10.5676/DWD_GPCC/HOMPRA_EU_M_V1_100
- Samaniego L, Thober S, Kumar R, Wanders N, Rakovec O, Pan M, Zink M, Sheffield J, Wood EF, Marx A (2018) Anthropogenic warming exacerbates European soil moisture droughts. *Nat Clim Chang*. ► <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0138-5>
- Samaniego L, Kumar R, Zink M (2013) Implications of parameter uncertainty on soil moisture drought analysis in Germany. *J Hydrometeorol* 14:47–68
- Samaniego L, Bárdossy A (2007) Relating macroclimatic circulation patterns with characteristics of floods and droughts at the mesoscale. *J Hydrol* 335:109–123. ► <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.11.004>
- San-Miguel-Ayanz J, Moreno JM, Camia A (2013) Analysis of large fires in European Mediterranean landscapes: lessons learned and perspectives. *For Ecol Manage* 294:11–22
- Schindler U, Steidl J, Müller L, Eulenstein F, Thiere J (2007) Drought risk to agricultural land in Northeast and Central Germany. *J Plant Nutr Soil Sci* 170:357–362. ► <https://doi.org/10.1002/jpln.200622045>
- Schneider U, Becker A, Finger P, Rustemeier E, Ziese M (2020) GPCC Full data monthly product version 2020 at 0,25°: Monthly land-surface precipitation from rain-gauges built on GTS-based and historical data. ► https://doi.org/10.5676/DWD_GPCC/FD_M_V2020_025
- Siebert C, Blauhut V, Stahl K (2021) Das Dürrierisiko des Wasserkraftsektors in Baden-Württemberg *WasserWirtschaft Themenheft* 6/2021
- Spinoni J, Naumann G, Vogt J, Barbosa P (2016) Meteorological droughts in Europe: events and impacts – trends and future projections. Publications Office of the European Union. ► <https://doi.org/10.2788/450449>
- Stahl K, Kohn I, Blauhut V et al (2016) Impacts of European drought events: insights from an international database of text-based reports *Nat. Haz Earth Syst Sci* 16:801–19
- Stahl K, Vidal JP, Hannaford J, Tisdeman E, Laaha G, Gauster T, Tallaksen LM (2020) The challenges of hydrological drought definition, quantification and communication: an interdisciplinary perspective. *Proc. IAHS* 383:291–295. ► <https://doi.org/10.5194/piahs-383-291-2020>
- Staudinger M, Stahl K, Seibert J (2014) A drought index accounting for snow, water resour. *Res* 50:7861–7872. ► <https://doi.org/10.1002/2013WR015143>
- Sutanto SJ, Vitolo C, Di Napoli C, D’Andrea M, Van Lanen HAJ (2020) Heatwaves, droughts, and fires: Exploring compound and cascading dry hazards at the pan-European scale. *Environ Int* 134. ► <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105276>
- Thober S, Boeing F, Marx A (2018) Auswirkungen der globalen Erwärmung auf hydrologische und agrarische Dürren und Hochwasser in Deutschland. ► https://www.ufz.de/export/data/2/207531_HOKLIM_Brosch%C3%BCre_final.pdf
- Tijdeman E, Menzel L (2020) Controls on the development and persistence of soil moisture drought across Southwestern Germany. *Hydrol Earth Syst Sci Discuss* [preprint]. ► <https://doi.org/10.5194/hess-2020-307>
- UBA - Umweltbundesamt (Hrsg) Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. ► <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/umweltbundesamt-2019-monitoringbericht-2019-zur>
- van Hateren TC, Chini M, Matgen P, Teuling AJ (2020) Asynchrony of recent European soil moisture and vegetation droughts. submitted to *GRL* 2020
- Van Loon AF (2015) Hydrological drought explained. *Wiley Interdiscip Rev Water* 2(4):359–392
- van Wagner CE (1987) Development and structure of the Canadian Forest Fire Index. Canadian Forestry Service, Technical Report 35:37
- Vogt JV, Naumann G, Masante D, Spinoni J, Cammalleri C, Erian W, Pischke F, Pulwarty R, Barbosa P (2018) Drought risk assessment and management – a conceptual framework vol EUR 29464, Publications Office of the European Union, Luxembourg
- Wastl C, Schunk C, Leuchner M, Pezzatti GB, Menzel A (2012) Recent climate change: long-term trends in meteorological forest fire danger in the Alps. *Agric For Meteorol* 162:1–13. ► <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.04.001>
- Wilhite DA (Hrsg) (2016) Drought – a global assessment vol I, Routledge, New York

- Wittich K-P, Bock L, Zimmermann L (2014) Neuer Waldbrandgefahrenindex des Deutschen Wetterdienstes (2): der WBI und dessen Anwendung auf bayerische Waldbrände. *AFZ – Der Wald* 9/2014, 22–25
- Wittich K-P, Löpmeier F-J, Lex P (2011) Waldbrände und Klimawandel in Deutschland. *AFZ/Wald* 18:22–25
- WMO - World Meteorological Organization, GWP - Global Water Partnership (2016) *Handbook of Drought Indicators and Indices*. ISBN 978-92-63-11173-9, WMO-1173
- Wu M, Knorr W, Thonicke K, Schurgers G, Camia A, Arneth A (2015) Sensitivity of burned area in Europe to climate change, atmospheric CO₂ levels, and demography: a comparison of two fire-vegetation models *J Geophys Res Biogeosci* 120. ► <https://doi.org/10.1002/2015JG003036>.
- Zhou TJ, Tao H (2013) Projected changes of palmer drought severity index under an RCP8.5 Scenario. *Atmospheric and Oceanic Science Letters* 6:273–278. ► <https://doi.org/10.3878/j.issn.1674-2834.13.0032>
- Zoth P (2020) Anpassung an Trockenheit und Dürre–welche wasserrechtlichen Handlungsmöglichkeiten gibt es? *Zeitschrift für Deutsches und Europäisches Wasser-, Abwasser-und Bodenschutzrecht* 9(2):91–98
- Zink M, Samaniego L, Kumar R, Thober S, Mai J, Schaefer D, Marx A (2016) The German drought monitor. *Environ Res Lett* 11 ► <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074002>

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (► <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

