

Ein Blick auf das Wasserdargebot in Zeiten des Klimawandels in Nordrhein-Westfalen

Prof. Dr.-Ing. A. Schlenkhoff
Bergische Universität Wuppertal

26.März 2020 – Vortrag für den 11. RuhrGeo-Tag, Essen

1. Einleitung

Die Klimaänderung wirkt nicht nur unmittelbar auf die Temperatur (Hitzeperioden) oder die Niederschläge, die am häufigsten in den Medien thematisiert werden, sondern beeinflusst den gesamten Wasserkreislauf und greift tief in den Wasserhaushalt ein. Dabei spielen Änderungen der Verdunstung, der Versickerung in den Boden bzw. in das Grundwasser sowie der an der Oberfläche gebildete Abfluss eine ebenso bedeutsame Rolle für die Wasserwirtschaft und die darauf basierenden Wirtschaftsbereiche wie zum Beispiel Landwirtschaft, Energiewirtschaft oder Trinkwasserversorgung. Das (nutzbare) **Wasserdargebot** wird als die Menge an Grund- und Oberflächenwasser bezeichnet, die pro Jahr durch Niederschläge abzüglich der Verdunstung und durch Zufluss aus den Nachbargebieten theoretisch verfügbar ist. Da Deutschland im Mittel ein wasserreiches Land ist, wird derzeit nur etwa 10 bis 20 % des Wasserdargebots überhaupt genutzt. Der Rest fließt (ungenutzt) direkt bzw. über die Nachbarstaaten dem Meer zu. Der Klimawandel wird alle Teilprozesse des Wasserkreislaufes beeinflussen. Im Folgenden sollen zunächst die derzeitigen Verhältnisse dargestellt und anschließend mögliche Änderungen und ihre Auswirkungen auf das Wasserdargebot diskutiert werden. Der Fokus liegt dabei auf NRW bzw. dem Ruhreinzugsgebiet.

2. Wasserdargebot und Wasserhaushalt 2020

Der an der Oberfläche sichtbare Abfluss wird durch die sehr einfach gestaltete

Wasserhaushaltsgleichung beschrieben:

$$A = N - V \pm S \quad (\text{Abfluss} = \text{Niederschlag} - \text{Verdunstung} \pm \text{Speicheränderung})$$

Allerdings ist jede dieser Größen zeitlich und räumlich stark variabel, wobei die Variabilität von der Skalengröße der Betrachtung abhängt. Die Abflüsse werden in der Regel an Gewässerpegeln über das dort zusammenfließende Flusseinzugsgebiet bilanziert. Diese Einzugsgebiete reichen von wenigen km² (bei urbanen Einzugsgebieten) bis über mehrere Tausend km² (zum

Beispiel bei der Bewirtschaftung von Talsperren) oder über Hunderttausend km², wenn der Fokus eher auf den großen Strömen in Deutschland liegt.

Der Niederschlag bringt die Hauptzufuhr für das Wasserdargebot. Bei einem über Deutschland gemittelten Jahresniederschlag von etwa 820 mm werden Deutschland jedes Jahr ca. 300 Mrd. m³ Wasser „vom Himmel geschenkt“. Davon verdunstet allerdings der Großteil wieder. In Deutschland wird das meiste Wasser über Pflanzen verdunstet (Transpiration) und ermöglicht eine Landwirtschaft, die nahezu ohne zusätzliche Bewässerung auskommt. Die verdunstete Wassermenge beträgt im Mittel etwa 190 Mrd. m³ pro Jahr (siehe Tabelle 1).

Bei diesen Wasserbilanzen wird davon ausgegangen, dass im langfristigen Mittel der Speicher nur eine saisonale Wirkung entfaltet, die Änderung im langjährigen Mittel also Null bleibt. Die winterlichen Überschüsse werden eingespeichert und im Sommer wird der Speicher durch Abfluss und Verdunstung wieder geleert. Der wesentliche Teil des Speichers wird durch Boden- und Grundwasser gebildet. Zusätzlich wirken Oberflächengewässer wie Seen, Flüsse und auch Talsperren als Speicher.

Tab. 1 Mittelfristige Wasserbilanz der Zu- und Abflüsse in Deutschland (Quelle: Alles im Fluss, 2010, verändert)

	Zufluss von Nachbarstaaten [km ³]	Abfluss ins Meer / zum Nachbarn [km ³]	Bilanz [km ³]
Niederschlag / Verdunstung	307	- 190	+ 117
Rhein	30	- 75	- 45
Mosel	5	-	+ 5
Alpen / Donau	19	- 46	- 27
Ems		- 4	- 4
Direkter Abfluss ins Meer		- 47	- 47
Summe	362	- 362	0

Das Wasserdargebot unterliegt nicht nur einer innerjährlichen saisonalen Schwankung, sondern wird durch mittelfristige überjährige klimatische Zyklen (kalte, nasse, oder warme trockene Perioden) geprägt. Zudem sind längerfristige Schwankungen (Jahrzehnte) und Trends in den Zeitreihen zu erkennen. Ein besonders deutlich ausgeprägter Trend ist der Temperaturanstieg

in den letzten hundertvierzig Jahren, der etwa 1,6 K seit dem Beginn der Aufzeichnungen 1881 beträgt. Dieser **Temperaturanstieg hat sich insbesondere in den letzten 30 Jahre verstärkt** (vgl. Abb. 7 und Abb. 8).

Tab. 2 Kennzahlen von Flüssen im Ruhrgebiet (alle anthropogen stark geprägt)

	Länge [km]	Einzugsgebiet [km ²]	Mittlere Abflüsse MNQ / MQ / MHQ [m ³ /s]
Emscher (Oberhausen)	83	775	9,4 / 16,3 / 132
Ruhr (Duisburg)	219	4485	17,2 / 73,2 / 645
Rhein (Rees)	1037	159300	1070 / 2290 / 6670

Niederschlag

Während die Temperatur und der Temperaturanstieg gleichmäßig und relativ einheitlich in ganz Deutschland zu beobachten sind, sind Änderungen bei den **Niederschlägen** sowohl regional als auch saisonal unterschiedlich. In jedem Fall müssen die Änderungen der Klimatelemente im Verhältnis zu den regionalen, saisonalen und mehrjährigen Schwankungen betrachtet werden. Diese Schwankungen sind sehr beträchtlich und reichen bei den Jahresniederschlägen zum Beispiel von 551 mm (1959, Jahrhundertssommer) bis 1018 mm (2002, Elbehochwasser). Die Monatswerte des Niederschlags schwanken auch Deutschland weit gemittelt noch stärker. Zum Beispiel von 2,4 mm (Nov. 2011) bis zu 166 mm (Okt. 1998). Regional können die Niederschläge in einem Monat auch einmal gänzlich ausbleiben oder 300 mm erreichen.

Die Abbildungen 3 und 4 zeigen beispielhaft die räumliche Verteilung der mittleren **Temperatur** und der mittleren **Jahresniederschläge** (Abb. 5 und Abb. 6) in Deutschland. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) bedient sich bei über 2000 Messstellen für Temperatur und Niederschlag, die zeitlich hochaufgelöst Daten liefern. Diese Punktdaten werden auf ein 1 km Raster interpoliert und zum Beispiel in einem Klimaatlas der Öffentlichkeit als Karte zur Verfügung gestellt. Die großen räumlichen Unterschiede in Deutschland sind vor allem bei den Niederschlägen leicht zu erkennen. Dies liegt zum einen an der mit dem Abstand zum Meer nachlassenden maritimen Wirkung. Zum anderen erkennt man die starken Einflüsse aus der Topografie. Deutschland kann so eventuell klimatisch in Osten, Westen und Süden unterteilt werden. Zudem wirken die Mittelgebirge als auch die Alpen als Barrieren für feuchte Luft, die auf der Vorderseite zum verstärkten Abregen führen und auf der Rückseite trockenere Luft abfließen

lassen. Auch wenn Deutschland sich in der Zone der gemäßigten Breiten befindet, bestehen regional erhebliche klimatische Unterschiede, die sich vor allem bei der Wasserbilanz bemerkbar machen. Während der Westen eher ein feucht ausgeglichenes maritimes Klima aufweist, liegen die östlichen Teile Deutschlands häufig unter kontinentalem Einfluss. Dies beeinflusst auch die saisonalen Schwankungen, die im Osten meist stärker ausgeprägt sind.

Verdunstung

Im Gegensatz zum Niederschlag lässt sich die **Verdunstung** nicht direkt oder nur schlecht messen. Daher wird die Verdunstung mit Hilfe von anderen Klimaelementen berechnet. Die Verdunstung setzt sich dabei aus der Verdunstung von Wasser an der Oberfläche (Evaporation) und der durch Pflanzen getriebenen Verdunstung (Transpiration) zusammen. Die Gesamtverdunstung (Evatranspiration) hängt vor allem von den folgenden Größen ab: $V = V$ (Temperatur, Strahlung, Luftfeuchte, Wind, ...; Pflanzen verfügbares Wasser, Flächennutzung).

Wenn die Wasserverfügbarkeit als gegeben angesehen wird, dann werden Verdunstungswerte für Referenzsituationen berechnet. Zum Beispiel für freie Wasserflächen oder freiliegende Grasflächen. Diese Größe wird potentielle Verdunstung genannt, kann im Sommer mehr als 100 mm pro Monat erreichen und damit über den Niederschlägen liegen. An Wintertagen wird allerdings nur bis zu 1 bis 2 mm pro Tag verdunstet. Das durch Pflanzen verdunstete Wasser muss allerdings im Boden zur Verfügung stehen. Sollte dies nicht der Fall sein, dann sinkt die tatsächliche Verdunstung unter den theoretisch maximal möglichen Wert der potentiellen Verdunstung. Die Verdunstung hängt damit sowohl vom Aufbau und von der Art des Bodens, der Bodenfeuchte, dem Grundwasserhorizont und dem Bewuchs bzw. der Nutzung ab.

In trockenen Sommern geht die tatsächliche Verdunstung trotz hoher Temperaturen dann zurück, wenn die oberen Bodenschichten zu trocken für das Wachstum von Pflanzen sind. In der Bodenkunde bzw. der Pflanzenökologie werden hierfür Grenzwerte für den Bodenwassergehalt eingeführt. Als Feldkapazität wird der Bodenwassergehalt (Abb. 1 und Abb. 2) bezeichnet, der gerade noch ein Absickern des Wassers durch die Schwerkraft in das Grundwasser verhindert. Bei diesem Zustand sind allerdings noch nicht alle Poren mit Wasser gefüllt. Der Welkepunkt hingegen bezeichnet den Wassergehalt, der mindestens vorhanden sein muss, damit Pflanzenwachstum und damit Verdunstung möglich ist. Der Deutsche Wetterdienst, berechnet täglich die Bodenfeuchte für verschiedene Kulturen und Böden und zwar für zwei Standardbodenarten (lehmiger Sand als leichter Boden und sandiger Lehm als eher schwerer Boden). Der über dem Grundwasser liegende, nicht wassergesättigte Bodenbereich bildet somit den oberen Teil des Speichers im Untergrund, der die zeitlichen Schwankungen aus dem Niederschlag dämpft.

Für die Berechnungen der so ermittelten Vergleichsbodenfeuchte wird beim DWD ein agrar-meteorologisches Modell zur Berechnung der aktuellen Verdunstung verwendet. Die tatsächliche Verdunstung und die Bodenfeuchte sind somit verknüpft. Die Angaben des Deutschen Wetterdiensts zur aktuellen Bodenfeuchtesituation in Deutschland bezieht sich allerdings nur auf die obere Bodenschicht zwischen 0 bis 60cm unter Gras.

Infiltration in den Boden

Nur das Niederschlagswasser, welches in den Boden infiltriert, ist für eine Speicherung und spätere Nutzung relevant. Bei Überschreiten der Feldkapazität kann dieses Wasser weiter in das Grundwasser absickern. Der Prozess der Infiltration in den Boden und des Absickerns in das Grundwasser ist allerdings träge, so dass einzelne, intensive (Stark-) Regen eher wenig zur Neubildung beitragen, sondern in der Regel oberflächlich abfließen. Die Infiltrationsrate hängt, wie beschrieben, vom Boden, Bodenfeuchte, Hangneigung und Oberflächenbeschaffenheit und der Flächennutzung ab. Großen negativen Einfluss auf die Infiltration hat zum Beispiel die Versiegelung in urbanen Bereichen. Aber auch eine ungünstige landwirtschaftliche Bearbeitung kann zur starken Reduzierung der Infiltration führen. Hierzu gehören vor allem die Verdichtung der Böden durch große Maschinen, die Bearbeitung der Felder in Hangrichtung, aber auch die Verschlammung und Verkrustung durch fehlenden Bewuchs. Ein gut durchwurzelter, lockerer sandiger Lehmboden oder lehmiger Sandboden weist Infiltrationsraten von über 10 mm pro Stunde auf. Damit kann praktisch 90% des Niederschlags aufgenommen werden. Bei Wassersättigung der Böden wird das weitere Absickern durch die am wenigsten durchlässige Bodenschicht bestimmt. Somit stellen hoch verdichtete Bodenschichten ein besonderes Problem für die Versickerung dar. Bei zunehmender Bodenfeuchte entsteht Vernässung. Im Winter kann zudem bei Vereisung der oberen Bodenschicht ebenfalls kein Wasser infiltrieren. Das Wasser steht auf der Oberfläche oder fließt ab. Günstig auf die Infiltration wirkt hingegen eine langsam abschmelzende Schneedecke und anhaltender Landregen mit geringer Intensität.

Grundwasserspeicher (Grundwasserneubildung)

Das Sickerwasser, welches dem Grundwasser zufließt, wird als Grundwasserneubildung bezeichnet. Der obere Grundwasserleiter verfügt in der Regel über eine freie Oberfläche, so dass die Änderung des Grundwasserspeichers mit einem Anstieg oder Abfallen des Grundwasserhorizonts einhergeht. Das Wasser aus dem Grundwasserleiter kann entweder über Kapillarspannung wieder zurück in den oberhalb liegenden Boden gelangen, oder es fließt dem Gefälle folgend einem Vorfluter oder einer Quelle zu.

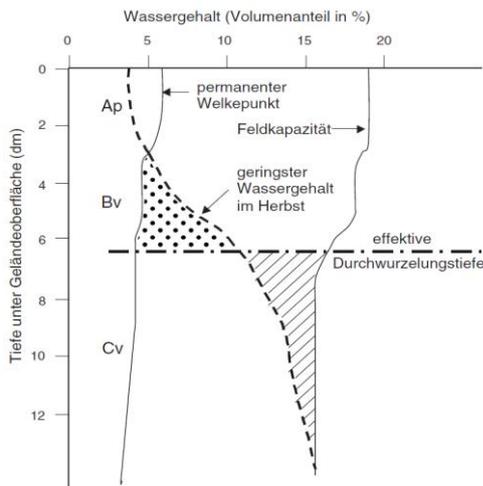


Abb. 1 Typische Verteilung des Wassergehalts im Boden Quelle: Hydrologischer Atlas von Deutschland

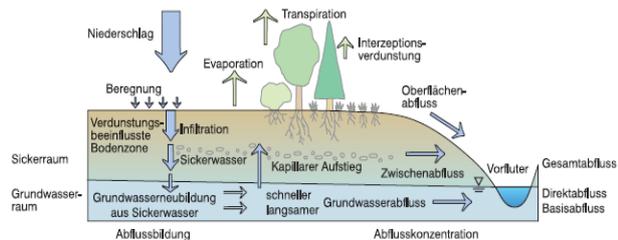


Abb. 2 Einflussfaktoren auf die Grundwasserneubildung, Quelle: Hydrologischer Atlas von Deutschland

Somit wird der Boden- und Grundwasserspeicher in der Regel im Herbst und Winter aufgefüllt und über das Sommerhalbjahr wieder entleert. Die Grundwasserspeicher in Deutschland unterscheiden sich bei ihrer Ergiebigkeit allerdings erheblich (siehe Abb. 11 und Abb. 12).

Sandige, kiesige Böden sowie Schotterflächen und Talsande bilden großräumige Porengrundwasserleiter aus, die Mächtigkeiten von bis zu 100 Meter erreichen und zum Teil durch weniger gut durchlässige Schichten in mehrere Stockwerke aufgeteilt sein können. Etwa die Hälfte der Fläche in Deutschland weist solche sehr ergiebigen Grundwasserkörper in Lockergesteinen auf.

In den Festgesteinsbereichen der Mittelgebirge weisen die schwach diagenetisch veränderten Sand- und Kalksteinformationen je nach Art und Größe von Rissen und Klüften noch eine mittlere Ergiebigkeit auf, die teilweise auch eine Nutzung, zum Beispiel der Quellschüttungen, erlauben. Die stark diagenetisch veränderten und die kristallinen Festgesteine, wie sie unter anderem im Schwarzwald, Bayrischen Wald, Erzgebirge und Thüringer Wald sowie im Rheinischen Schiefergebirge (Bergische Land, Sauerland oder Eifel) vorzufinden sind, verfügen nur über eine geringe und unbedeutende Speicherfähigkeit.

Die ergiebigen Grundwasserleiter befinden sich im norddeutschen Flachland und in den Sand- und Schotterablagerungen der großen Ströme wie Donau und Rhein. Einige dieser Grundwasserleiter sind allerdings durch den Bergbau stark verändert und haben ihre Funktion als Speicher verloren. Schließlich soll an dieser Stelle noch erwähnt werden, dass Grundwasserleiter mit hoher Durchlässigkeit und in Nähe der Vorfluter auch erhebliche Wassermengen direkt aus den Vorflutern aufnehmen können, wenn diese zum Beispiel Hochwasser führen oder zu diesem

Zwecke angestaut wurden. Die Grundwasserneubildung in Deutschland liegt zwischen 0 mm und 500 mm pro Jahr, meist aber zwischen 100 mm und 300 mm pro Jahr.

Abfluss

Aus der Wasserhaushaltsgleichung ist ersichtlich, dass der Abfluss im Wesentlichen aus zwei Komponenten besteht. Zum einen bildet der Teil des Niederschlags, der nicht verdunstet und nicht infiltriert wird, den direkten Oberflächenabfluss aus. Dieser Teil des Abflusses reagiert daher unmittelbar auf Niederschläge und führt zum Teil zu Hochwasserabflüssen. Der zweite Teil des Abflusses wird durch die permanente Entleerung aus dem Grundwasser in die Vorfluter gebildet. Dieser Abfluss wird häufig als Basisabfluss bezeichnet. Ein weiterer, aber eher unbedeutender Teil des Abflusses aus dem Boden in die Vorfluter wird Zwischenabfluss genannt und besteht aus Wasser welches zwar in den Boden infiltriert wurde, den Grundwasserleiter aber nicht erreicht hat. Der direkte Abfluss zeigt infolge der Abhängigkeit von Verdunstung und Versickerung einen stark ausgeprägten saisonalen Verlauf. Zudem unterscheiden sich die Abflüsse aus den unterschiedlichen Einzugsgebieten durch die Topografie, die Mächtigkeit der Böden und der Speicherfähigkeit der Grundwasserleiter. Auch die Abflüsse unterscheiden sich in den Regionen ebenfalls stark. In den trockenen Gebieten, wie zum Beispiel Rheinland-Pfalz, Brandenburg und Sachsen-Anhalt liegen diese bei nur 100 mm.

Beispielhaft soll hier der saisonale Verlauf des (unbeeinflussten) Abflusses der Ruhr an der Mündung dargestellt werden (Abb. 17). Während der Niederschlag im Mittel gleichmäßig über das Jahr verteilt ist, gilt das für den Abfluss nicht. Die vom Ruhrverband verfügbar gemachten Datenreihen zeigen, dass in einem Vergleichszeitraum zwischen 1927-2017 der mittlere Gebietsniederschlag von 1051 mm in etwa gleich auf das Winter- und Sommerhalbjahr (532 und 519 mm) aufgeteilt ist. Der Abfluss im Sommerhalbjahr beträgt aber im Mittel nur ca. 28 % des Jahresabflusses, der einem mittleren Abfluss von $MQ = 80,7 \text{ m}^3/\text{s}$ an der Mündung entspricht. In trockenen Sommerjahren wie 2018 zeigt sich diese Ungleichheit noch deutlich stärker.

Für das Jahr 2018 lag der jährliche Niederschlag bei 813 mm und der Anteil im Sommerhalbjahr sank auf 291 mm. Dies entspricht einem Anteil von 56 % des mittleren Sommerniederschlags. 2018 liegt damit hinter 1959 und 1947 auf Rang 3 der trockensten Sommerhalbjahre. Der monatliche Abfluss sank im Sommer auf bis unter $10 \text{ m}^3/\text{s}$ und lag im Mittel bei $16,2 \text{ m}^3/\text{s}$, was einem Anteil am Jahresabfluss von nur 11% entspricht. Gegenüber dem langjährigen Mittel sind das etwa 35 %. Neben dem mittleren Niedrigabfluss spielt auch die lang anhaltende Dauer bei der Beurteilung der Abflussbedingungen eine Rolle, die hier aber nicht weiter betrachtet werden soll.

Wasserbilanz

Der Deutsche Wetterdienst stellt über seinen Klimadatenservice auch Informationen zur klimatischen Wasserbilanz zur Verfügung. Diese wird aus der Differenz zwischen Niederschlag und berechneter potentieller Verdunstung gebildet. Unterdurchschnittlicher Niederschlag bei gleichzeitig hohen Temperaturen führt zu einer geringen bis leicht negativen Wasserbilanz. Wie in den Abbildungen 13 bis 16 zu erkennen ist, bleibt die mittlere Jahreswasserbilanz (Zeitraum 1961-1990) überwiegend in Deutschland leicht positiv, wobei der Osten eine leicht negative Wasserbilanz ausweist. Das heißt es sickert Wasser in den Boden oder fließt an der Oberfläche ab. Die Wasserbilanzen für die Sommer 2016, 2017 und 2018 zeigen im Vergleich, dass auch für einen durchschnittlichen Sommer (2016) fast alle Gebiete in Deutschland im Sommer eine negative Bilanz aufweisen. Positive Wasserbilanzen bleiben nur in den höher liegenden und niederschlagsreichen Mittelgebirgen wie zum Beispiel dem Bergischen Land oder dem Sauerland. Regionen, die als trocken bezeichnet werden können, weisen hingegen eine deutlich negative Wasserbilanz auf. Dazu gehören vor allen Regionen in den Becken, Tälern und Gräben oder Bereiche, die im Windschatten der Mittelgebirge liegen. In Ostdeutschland sind dies Bereiche von Erfurt über Magdeburg bis hin nach Potsdam, die im Windschatten des Harzes und des Thüringer Waldes liegen, als auch Berlin und Frankfurt an der Oder. Auch die wärmeren Regionen in Deutschland wie zum Beispiel entlang des Rheingrabens von Freiburg über Karlsruhe, Mannheim bis Mainz gehören zu diesen Gebieten mit einer eher negativen Wasserbilanz. Diese negative Wasserbilanz im Sommer besteht teilweise auch in feuchteren Sommerjahren wie 2017. Für einen ausgesprochen trockenen Sommer wie 2018 wird hingegen fast nirgendwo in Deutschland noch eine positive Wasserbilanz (siehe Abb. 16) erreicht.

In solchen Sommern sind alle Gebiete darauf angewiesen entweder dem Boden- und Grundwasserspeicher Wasser zu entziehen, oder Wasser aus anderen Gebieten herbeizuführen, wenn der natürliche Wasserspeicher aus der Bodenfeuchte für eine landwirtschaftliche Aktivität nicht ausreichen sollte. Dies ist aber in Deutschland derzeit nicht der Fall, bzw. die Landwirtschaft hat sich auf diese Verhältnisse eingestellt oder besonders leichte sandige Böden, die wenig Wasser speichern können, werden nicht oder nur forstwirtschaftlich genutzt.

Beeinflussung durch Speicher und Bewirtschaftung am Beispiel der Ruhr

In einigen Gebieten von Deutschland sind große bergbauliche Veränderungen vorgenommen worden und dabei wurde in der Regel der Grundwasserstand erheblich abgesenkt. Dies betrifft besonders die Braunkohlereviere. Diese Speicher stehen für längere Zeit, aber mindestens bis

zur Wiederverfüllung der Restlöcher nicht zur Verfügung. Allerdings kann das Sumpfungswasser bedingt genutzt werden. Die Grundwasserleiter in diesen Regionen sind stark gestört und benötigen besondere Aufmerksamkeit und langfristige Bewirtschaftungsstrategien.

Auf der anderen Seite wurden in den Einzugsgebieten, die über keine oder nur geringe Grundwasserleiter verfügen, zur Speicherung des winterlichen Wasserüberschusses Talsperren gebaut. Die meisten dieser großen Talsperren (372 nach Angaben des Deutschen Talsperren Komitees) in Deutschland dienen dem saisonalen Wasserausgleich und teilweise dem Hochwasserschutz. In Nordrhein-Westfalen liegen ca. 65 große Talsperren, vorzugsweise in den Mittelgebirgen wie Eifel, Bergisches Land, Sauerland und Siegerland. Der Einfluss dieser Speicher auf die Wasserverfügbarkeit, vor allem im Sommer, soll beispielsweise dargestellt werden. Das Talsperrensystem im Einzugsgebiet der Ruhr wird vom Ruhrverband bewirtschaftet. Ziel dieser Bewirtschaftung ist es, verkürzt gesagt, jederzeit einen für die Entnahme aus der Ruhr bzw. dem angrenzenden Grundwasser ausreichenden Abfluss zu gewährleisten. Dies war für die Wasserversorgung der industriell geprägten Region notwendig und ist auch heute noch für die Sicherstellung der Trinkwasserversorgung in der Region Ruhrgebiet relevant. Wie aus Abb. 18 zu erkennen ist wurden zu Spitzenzeiten zwischen 1960 bis 1975 etwa 1,2 Mrd. m³ aus der Ruhr entnommen und ca. 0,4 Mrd. m³ entzogen. Entziehung bedeutet dabei, dass im Gegensatz zu einer Entnahme das Wasser nach Gebrauch und eventueller Reinigung dem Fluss nicht wieder zugeführt wird, sondern in andere Einzugsgebiete überführt wird oder verdunstet.

2018 beliefen sich die Entnahme auf 0,407 Mrd. m³ und die Entziehung auf 0,21 Mrd. m³ Wasser. In Bezug auf den sommerlichen Abfluss stellt sich daher durch die Entnahme eine ausgesprochen angespannte Wasserbilanz dar. Von dem Wasser aus Niederschlag in Höhe von 813 mm, die auf das ca. 4500 km² große Einzugsgebiet fallen und einer Wassermenge von ca. 3,6 Mrd. m³ entsprechen, kommen zwar wegen des verhältnismäßigen feuchten Winters 2017/2018 etwa 2,2 Mrd. m³ zum Abfluss. Im Sommerhalbjahr beträgt der Anteil am Abfluss aber nur noch 0,2 Mrd. m³ und entspricht ziemlich genau der Entnahme in diesem Zeitraum. Ohne den Zuschuss aus den Talsperren wäre der natürliche Abfluss rechnerisch gleich Null. Die Ruhr würde ausschließlich gereinigtes Abwasser, sogenanntes Klarwasser, führen. Die Talsperren im Ruhreinzugsgebietes sind genau für diese Situation errichtet worden und werden auch heute noch nach dieser Zielvorgabe bewirtschaftet. Wie wertvoll diese Speicher sind, wurde im Sommer 2018 mehr als deutlich. Die Aufhöhung des Abflusses betrug an mehreren Tagen bis zu 20 m³/s. Aus dem Verlauf der Speicherfüllstände (siehe Abb. 19) lässt sich ohne Kenntnis der Betriebsanweisungen ableiten, dass auch zu Ende des Sommers 2018 noch eine gewisse Handlungsreserve vorhanden war. Der Ruhrverband verfügt insgesamt über ein Speichervolumen von 0,472 Mrd. m³, welches überwiegend als einjähriger Speicher konzipiert worden ist. Die Speicher konnten in der Vergangenheit bis zum Beginn des Sommers in der Regel wieder zu 90 % gefüllt werden, so dass bis in den November der Abfluss der Ruhr massiv

aufgehört werden kann. Allerdings geht bei einer derart hohen Beanspruchung der Talsperren dies zu Lasten anderer Aspekte, wie zum Beispiel der Gewässergüte und der Gewässerökologie im verbleibenden Speicher und der Einschränkung der Freizeitnutzung.

3. Wasserdargebot im Klimawandel

Aus den Zeitreihen von Temperatur und Niederschlag lässt sich erkennen, dass die mittlere Temperatur seit 1881 um 1,6 K angestiegen ist. Sämtliche Klimaprojektionen weisen einen weiteren Temperaturanstieg als gesichert aus. Damit steigt die potentielle Verdunstung und zwar in etwa um 5 bis 10% je 1 K Temperaturanstieg. Dies entspricht in etwa der Steigerung der Wasserdampfsättigung in der Luft. Es wird zudem angenommen, dass der erhöhte Wasserdampfanteil zum Teil auch wieder abregnet. Hierzu bestehen derzeit wenig gesicherte Erkenntnisse. Bei der Verdunstung ist zusätzlich eine signifikante Verlängerung der Wachstumsperiode der Pflanzen zu berücksichtigen. Das Wachstum wird zudem durch die steigenden CO₂-Gehalte noch verstärkt werden. Die Verdunstung wird daher im Sommer mit großer Wahrscheinlichkeit um bis zu 20% auf deutlich über 100 mm pro Monat erhöht werden und auch die mittleren Lagen der Mittelgebirge betreffen.

Bei der Entwicklung des Niederschlags ergaben sich bis heute für die Jahressummen wenig Änderungen. Zudem sind diese nicht signifikanten Änderungen regional uneinheitlich, wobei der Westen von Deutschland bisher die geringsten Änderungen zu verzeichnen hatte. Bei dieser Einschätzung fallen allerdings die beiden letzten Jahre, 2018 und 2019 heraus. Diese nach unten abweichenden Niederschlagssummen bleiben aber noch innerhalb der großen Schwankungsbreite im Wettergeschehen und widersprechen nicht den Annahmen aus den Klimawandelprojektionen. Die meisten Klimaprojektionen sehen eine Zunahme der Winterniederschläge und eine leichte Abnahme der Sommerniederschläge für die nähere Zukunft (2021 bis 2050) voraus. Die Sommerniederschläge können zudem seltener, dafür aber heftiger ausfallen, was in vielen Fällen zu einem ungenutzten Abfluss führen würde. Prognosen zum Niederschlag für spätere Zeiten können wegen der sehr großen Unsicherheiten derzeit von der Wasserwirtschaft schwer eingeschätzt werden. Durch die weiter zunehmende Temperatur wird aber die Verdunstung ebenfalls weiter ansteigen.

Die Jahresniederschlagssummen werden sich daher in NRW zunächst nur wenig ändern. Allerdings muss dennoch mit einer Verschärfung der wasserwirtschaftlichen Situation gerechnet werden, weil vermehrt Winterniederschlag zu heftig oder auf bereits gesättigte Böden treffen und daher wahrscheinlich zu einem vermehrten Abfluss führen wird, der ebenfalls ungenutzt abfließt oder sogar zu Hochwasserabflüssen führen wird. Weiterhin wird es zu einer weiteren

Abnahme der Schneelagen kommen. Somit wird weniger Wasser im Schnee zwischengespeichert und der Schnee, der in hohen Lagen akkumuliert, wird wahrscheinlich durch starke Temperaturanstiege nach Wetterlagenwechsel im Vergleich zu den früheren Wetterlagen schneller abtauen. Dies führt wahrscheinlich regional zu einem weiter erhöhten Abfluss, der im Sommer auch nicht zur Verfügung steht.

In der Klimadiskussion werden Änderungen bei den Wetterlagen häufig nur am Rande diskutiert. Für den Westen von Deutschland kann aber eine leichte Verschiebung der winterlichen Westwetterlagen von Nordwest auf Südwest erhebliche Änderungen bei den Niederschlägen und beim Abtauen von Schneedecken ergeben. Typische Südwestwetterlagen liegen schon heute mit 5 bis 10 K über den entsprechenden Nordwestlagen und bringen erheblich mehr Feuchtigkeit mit sich. Es wird daher empfohlen, die Änderungen dieser Wetterlagen in die hydro-meteorologischen Beobachtungen stärker mit einzubeziehen. Dies gilt natürlich auch für die sommerlichen und Hochwasser auslösenden Vb Wetterlagen, die allerdings bisher nicht bis in den Westen vordringen konnten.

Ob sich Hochdruckwetterlagen im Sommer stärker manifestieren bleibt ebenfalls unklar. Soweit sich eine frühe Hochdruckwetterlage ausbildet, scheint sich dieses System selbst zu verstärken und führt zu langanhaltenden Trockenwetterphasen. Dies ist allerdings nicht neu. Wie weit sich hier eine Änderung abzeichnet ist unklar. Ebenfalls unklar scheint die Entwicklung der Jetstream Dynamik zu sein, deren Abschwächung eine Stabilisierung der Wetterlagen herbeiführen würde. Dies würde allerdings sowohl Kälte- als auch Hitzeperioden betreffen. Bei Extremwetterlagen sind statistische Aussagen zu Wahrscheinlichkeiten noch schwieriger zu treffen als bei typischen Wetterlagen. Allerdings gehen alle Klimaprojektionen davon aus, dass Extreme in beide Richtungen bestehen bleiben werden (kalt und heiß, bzw. feucht und trocken) und eine generelle Verschiebung zu warmen und feuchten Wetterlagen zunehmenden wird. Diese Prognosen sind allerdings bei zunehmenden Temperaturen fast trivial.

Das Wasserdargebot wird daher in Zukunft noch stärkeren Schwankungen unterworfen sein und Extremwetterlagen wie im Sommer 2018 werden häufiger auftreten.

Eine Handlungsoption zur Anpassung an den Klimawandel erscheint eine erhöhte Aufmerksamkeit und intensivere Beachtung des Wasserkreislaufes zu sein. Dazu gehört in den urbanen Bereichen neben der Verbesserung der Versickerung sich auch die Komponente der Verdunstung wieder in Erinnerung zu rufen. Hierbei spielen Pflanzen und Grünflächen eine zentrale Rolle. Auch Gründächer können der mangelnden Verdunstung entgegenwirken, wenn sie gleichzeitig als Wasserspeicher ausgeführt werden (blau-grüne Dächer). Hier ergeben sich Synergien zur Begrenzung von Abflüssen nach Starkregen.

Für die Landwirtschaft ergeben sich zwei Alternativen. Eine kurzfristige Anpassung erscheint dabei allerdings aus wirtschaftlichen Gründen schwierig. Eine mittelfristige Anpassung der

Ackerfrucht sollte aber möglich sein. Zudem besteht die Möglichkeit der Bewässerung wie in Ländern mit höheren Temperaturen bereits heute üblich. So könnte Frankfurt ein Klima erreichen, welches mit dem heutigen in Mailand vergleichbar wäre. Eine Anpassung mittels zusätzlichem Wasser aus den winterlichen Abflüssen / Flüssen oder aus Speichern wie bei der Ruhr erscheint möglich. Hierbei sollte, wie beim Bewässerungslandbau üblich, bereits im Frühjahr bewässert werden, um ein gegebenenfalls noch bestehendes Bodenfeuchtedefizit vor der Aussaat zu verringern. Die Anpassung an den Klimawandel erfordert wieder eine intensivere Bewirtschaftung der Ressource Wasser. Zunächst bestehen Reserven aus noch nicht genutzten Optionen und freiwerdenden Kapazitäten. So werden die Speicher der Ruhrtalsperren zum Beispiel durch den Nutzungsrückgang aufgrund des industriellen Strukturwandels entlastet. Weiterhin wird die Stromwende mit Wegfall der erforderlichen Kühlleistungen zum einen eine Entspannung in ökologischer Sicht mit sich bringen, aber auch kann der Abfluss für alternative Nutzungen verwendet werden. Insgesamt muss damit gerechnet werden, dass die Winter etwas feuchter werden und im Sommer mehr Wasser benötigt wird. Diese saisonale Verstärkung erfordert eine zusätzliche Bewirtschaftung der winterlichen Wasservorräte. Das Jahr 2018 mit einem feuchten Winter und einem sehr trockenen Sommer gibt Anlass, die Bewirtschaftung der Speicher zu intensivieren.

4. Zusammenfassung und Empfehlung

Deutschland befindet sich hinsichtlich des Wasserdargebots (noch) in einer komfortablen Situation des Überflusses. Regional und saisonal bestehen allerdings schon heute klimatisch ungünstige Bedingungen mit einer negativen Wasserbilanz. Diese Regionen werden noch stärker als heute auf Wasserüberleitungen aus Gebieten mit positiver Wasserbilanz angewiesen sein. Um der Verschärfung der mengenmäßigen Wasserbilanz entgegen zu wirken bedarf es einer erhöhten gesellschaftlichen Aufmerksamkeit und Wertschätzung gegenüber der Ressource Wasser und insbesondere Grundwasser. In Anlehnung zum Hochwasserschutz (jeder Tropfen zählt) muss die zukünftige Devise lauten: „Kein Tropfen darf verloren gehen“.

Daher bekommt ein neues Denken bezüglich Versickerung, Verdunstung und Speicherung einen neuen Stellenwert. Dies gilt sowohl für urbane als auch ländlich geprägte Räume. Zudem wird die Landwirtschaft Bewirtschaftungsstrategien aus den mediterranen Länder adaptieren.

Schließlich muss die Betrachtung des Wasserdargebots gleichermaßen um zusätzliche Anstrengungen bei der Vermeidung von unnötigen qualitativen Beeinträchtigungen ergänzt werden. Deutschland ist ein wasserreiches Land. Quantität und Qualität müssen gleichermaßen geschützt und gewährleistet werden, um den wertvollen Schatz Grundwasserspeicher nicht noch stärker zu gefährden.

5. Literatur

- BUNR (2000): Hydrologischer Atlas von Deutschland, Berlin 2000
- DWD (2020): Deutsche Wetterdienst, Klimaatlas (www.dwd.de), Offenbach, 2020
- DWD (2020: Deutscher Wetterdienst, Klimaüberwachungen, (www.dwd.de) Offenbach, 2020
- Hirschfeld, J.; Nilson, E.; Keil, F. (2014): Alles im Fluss – Eine deutsche Wasserbilanz, Berlin, 2014, BMBF (2020): Alles im Fluss – Eine deutsche Wasserbilanz, Berlin, 2020, www.bmbf.wasserfluesse.de
- Hirschfeld, J. (2015): Wo ist Wasser in Deutschland knapp und könnte es in Zukunft knapper werden? KW Korrespondenz Wasserwirtschaft, 2015 (8), Nr. 11, Berlin, 2014
- Khadr, M.; Schlenkhoff, A. (2014) Integration of Data-Driven Modeling and Stochastic Modeling for Multi-Purpose Reservoir Simulation, 11th International Conference on Hydroscience and Engineering 2014, Hamburg.
- Khadr, M.; Schlenkhoff, A. (2011) Meteorological Drought Forecasting Using Stochastic Models, 34th IAHR World Congress, Brisbane, Australia.
- Khadr, M.; Morgenschweis, G.; Schlenkhoff, A. (2009) Analysis of Meteorological Drought in the Ruhr Basin by Using the Standardized Precipitation Index, International Conference on Sustainable Water Resources Management, Amsterdam, Netherland.
- Morgenschweis, zur Strassen und Schwanenberg (2007): Abschätzung der Auswirkung von möglichen Klimaänderungen auf die Bewirtschaftung der Talsperren im Einzugsgebiet der Ruhr. Jahresbericht Ruhrwassermenge 2006, Essen (2007), S. 32-50
- Nilson, E. & Krahe, P.: Zur Berechnung von Wasserbilanzen in Mitteleuropa im Zeichen des Klimawandels, BfG-Bericht, 2014
- Ruhrverband (2020): Ruhrwassermengen 2018, Essen, 2020

Autoren:

Prof. Dr.-Ing. A. Schlenkhoff
Bergische Universität Wuppertal
Pauluskirchstraße 7, 42285 Wuppertal
SCHLENKHOF@UNI-WUPPERTAL.DE

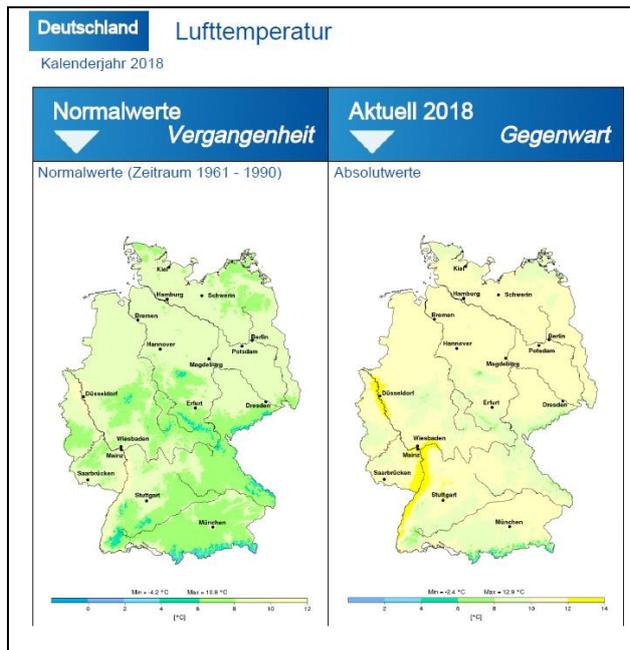


Abb. 3 Mittlere Jahrestemperatur in Deutschland. Zeitraum von 1961-1990 (links) und 2018 (rechts).
Quelle: Deutscher Wetterdienst

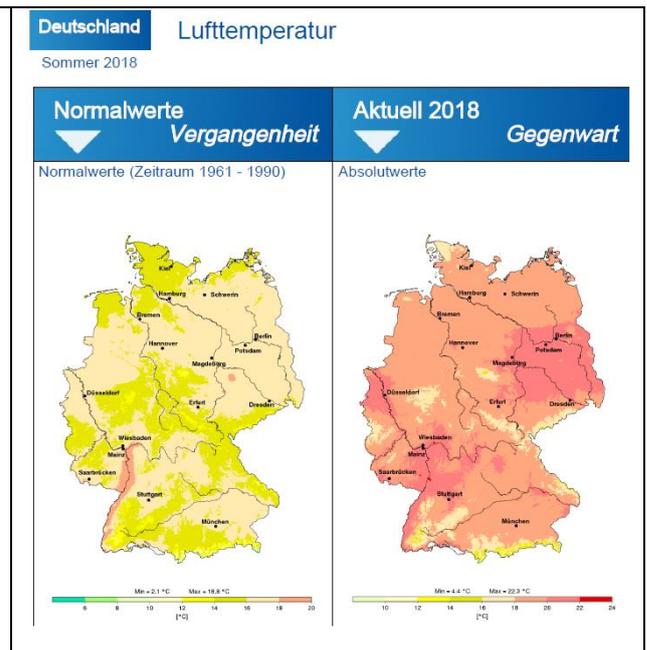


Abb. 4 Mittlere Temperatur im Sommer in Deutschland. Zeitraum von 1961-1990 (links) und 2018 (rechts).
Quelle: Deutscher Wetterdienst

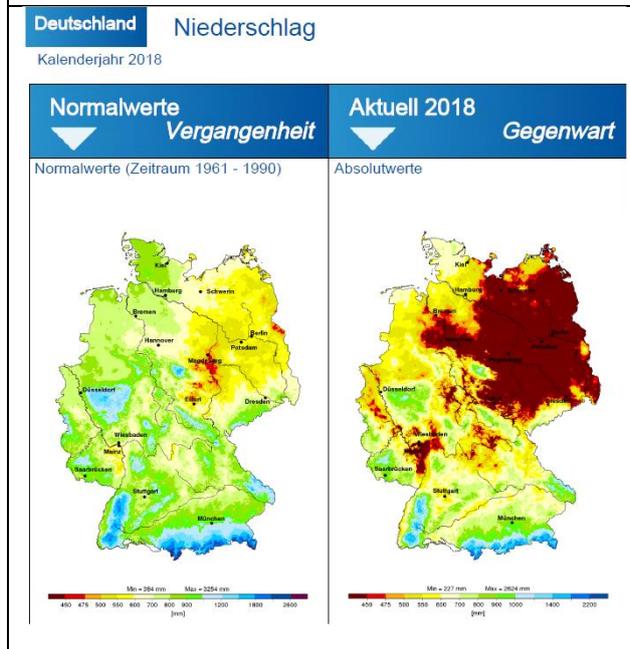


Abb. 5 Jahresniederschläge in Deutschland. Zeitraum von 1961-1990 (links) und 2018 (rechts).
Quelle: Deutscher Wetterdienst

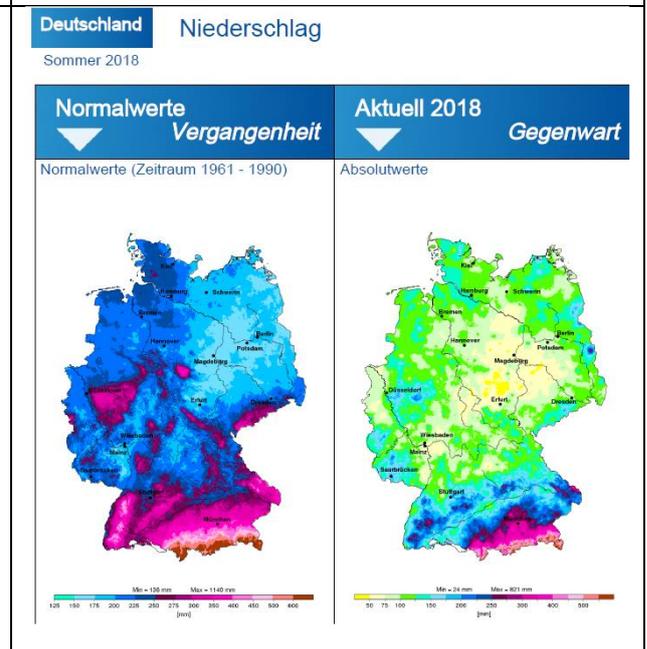


Abb. 6 Niederschläge im Sommer in Deutschland. Zeitraum von 1961-1990 (links) und 2018 (rechts).
Quelle: Deutscher Wetterdienst

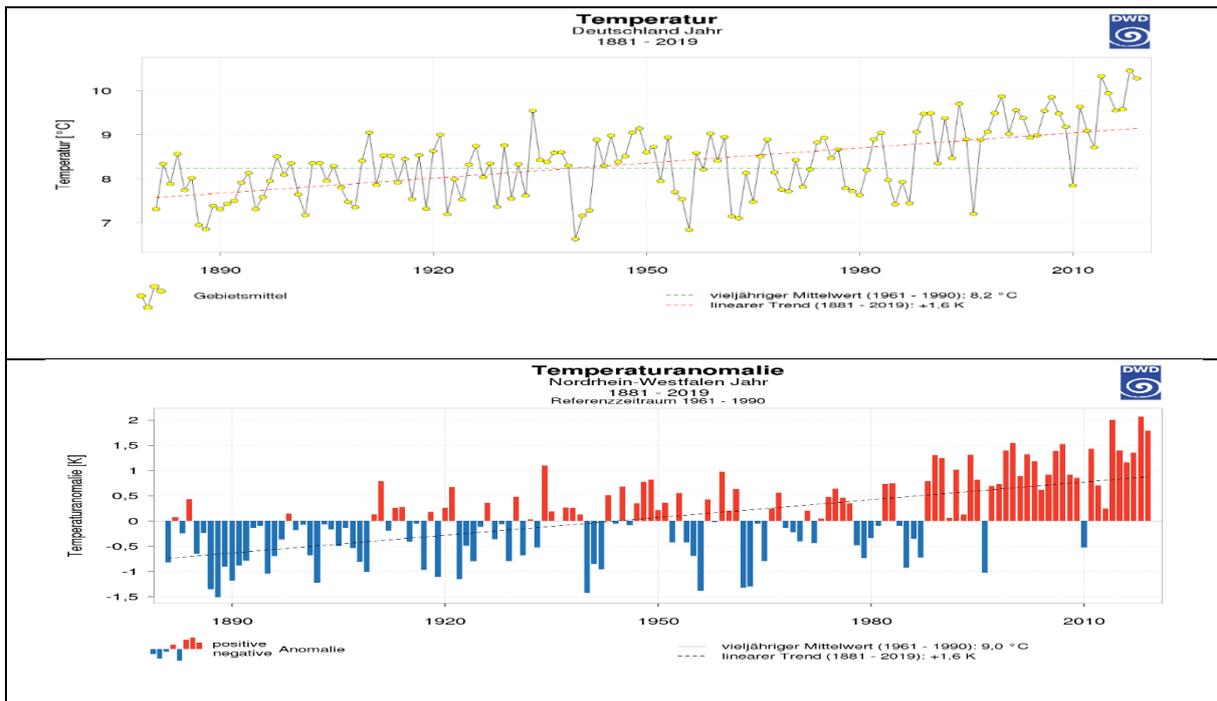


Abb. 7 *Mittlere Jahrestemperatur in Deutschland, absolut (oben), und als Abweichung zum Referenzzeitraum 1961-1990 (unten)*
 Quelle: Deutscher Wetterdienst, Klimaatlas, 2020

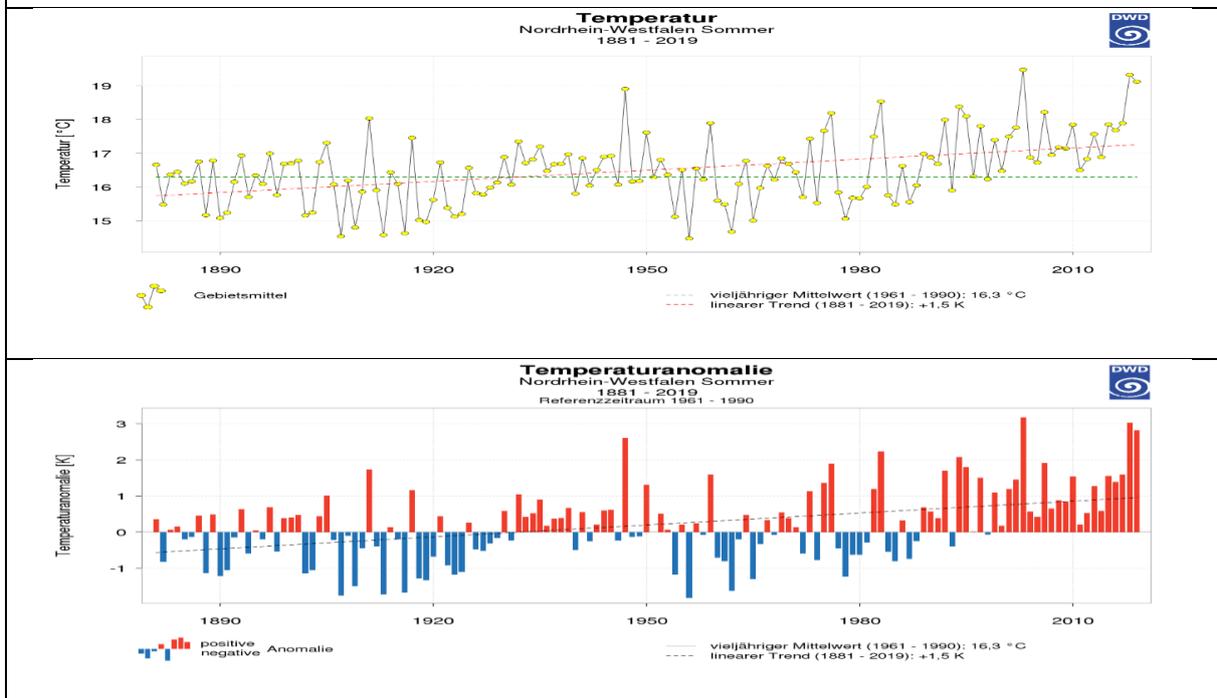


Abb. 8 *Mittlere Sommertemperatur in NRW, absolut (oben), und als Abweichung zum Referenzzeitraum 1961-1990 (unten)*
 Quelle: Deutscher Wetterdienst, Klimaatlas, 2020

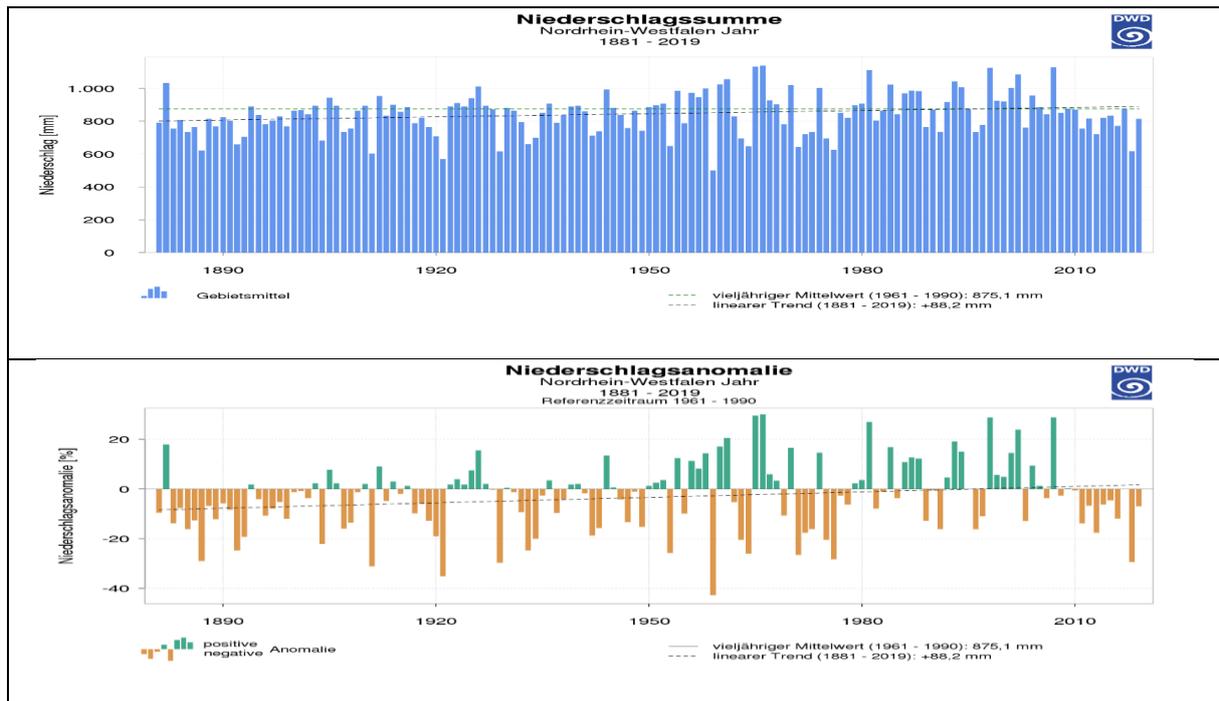


Abb. 9 Mittlere jährliche Niederschlagssumme in NRW, absolut (oben), und als Abweichung zum Referenzzeitraum 1961-1990 (unten)
Quelle: Deutscher Wetterdienst, Klimaatlas, 2020

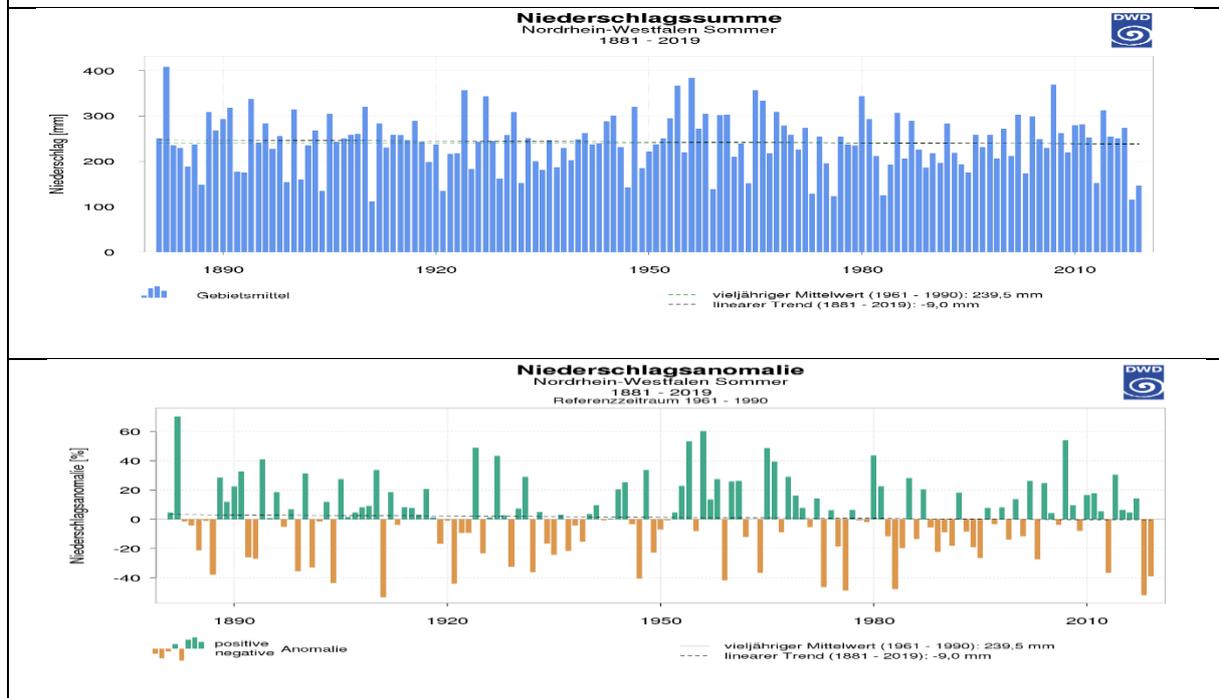


Abb. 10 Mittlere sommerliche Niederschlagssumme in NRW, absolut (oben), und als Abweichung zum Referenzzeitraum 1961-1990 (unten)
Quelle: Deutscher Wetterdienst, Klimaatlas, 2020

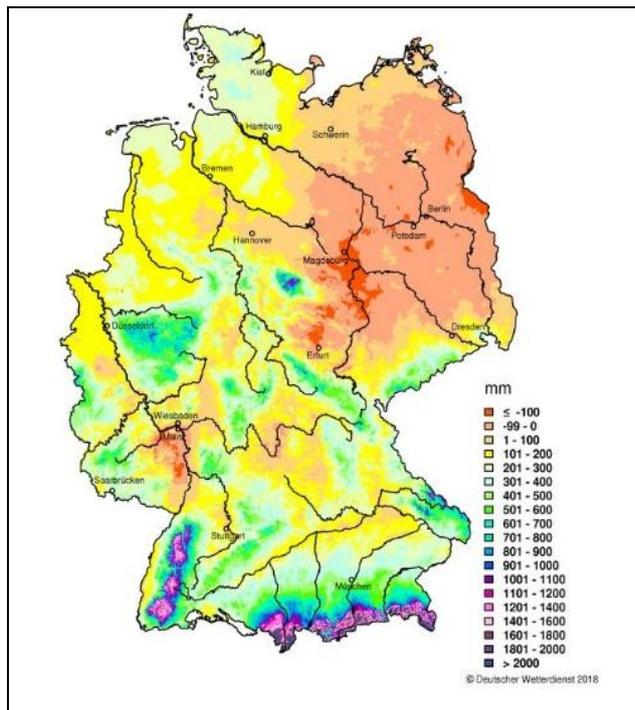


Abb. 13 Jährliche Wasserbilanz für den Zeitraum 1961-1990 mit $N = 789$ mm.
Quelle: Deutscher Wetterdienst

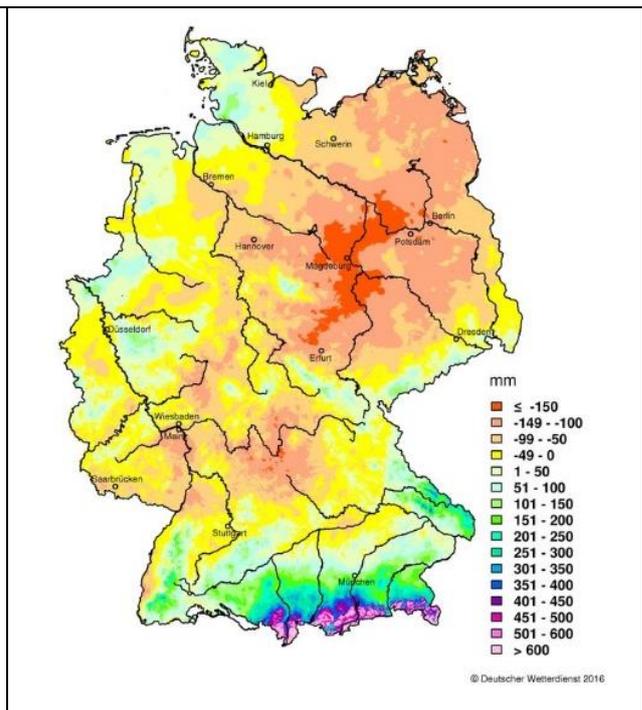


Abb. 14 Wasserbilanz für den Sommer 2016 mit $N = 232$ mm (langjähriges Mittel)
Quelle: Deutscher Wetterdienst

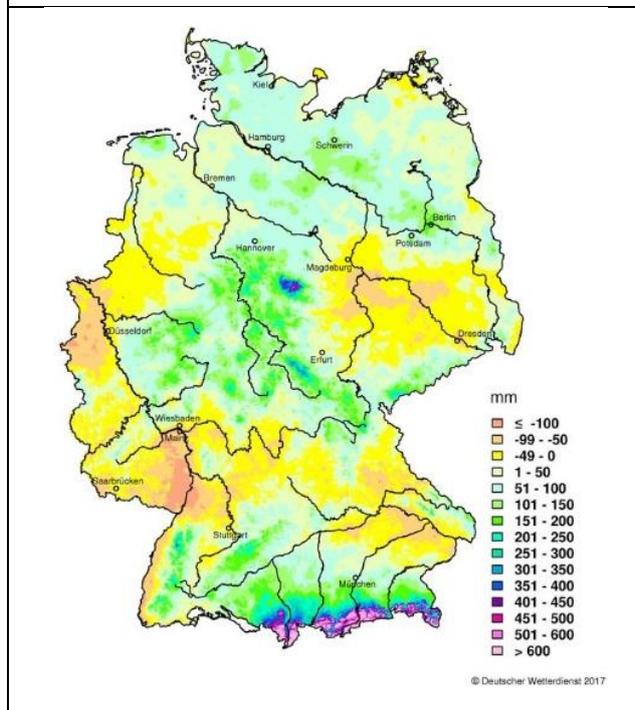


Abb. 15 Wasserbilanz für den Sommer 2017 mit $N = 307$ mm
Quelle: Deutscher Wetterdienst

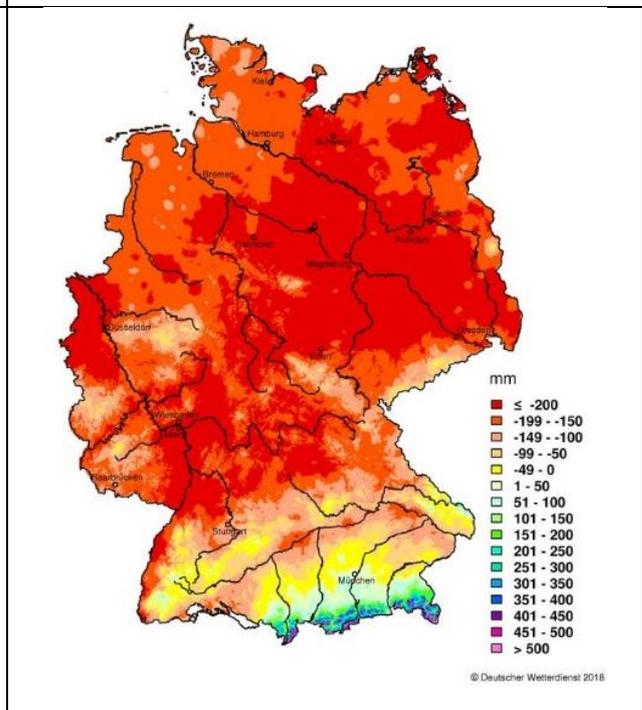


Abb. 16 Wasserbilanz für den Sommer 2018 mit $N = 129$ mm
Quelle: Deutscher Wetterdienst

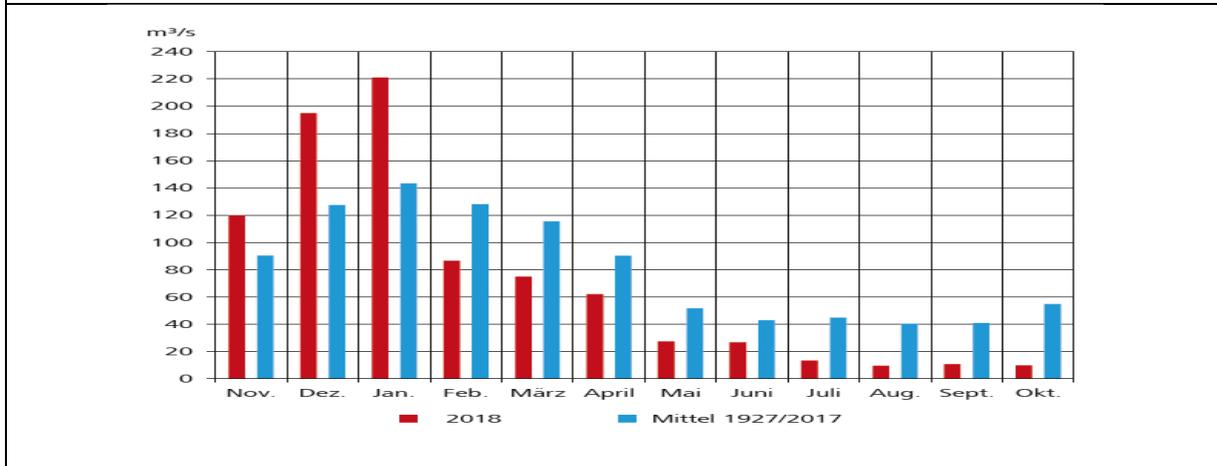
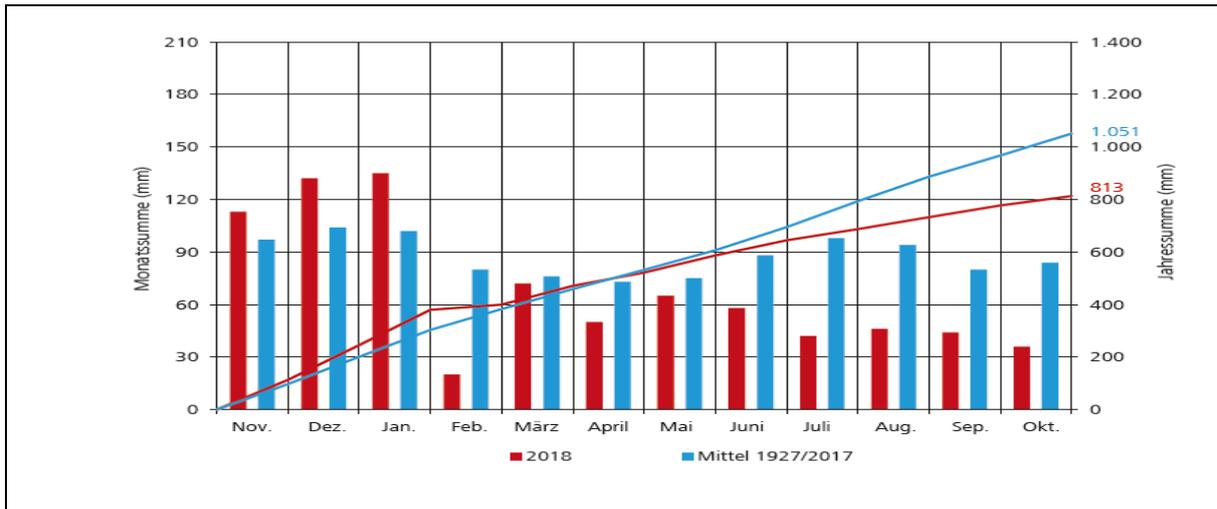


Abb. 17 Gebietsniederschlag im Einzugsgebiet (oben) und unbeeinflusster Abfluss der Ruhr an der Mündung (unten), 2018 (rot), Mittel (blau), Quelle: Ruhrverband, Ruhrwassermenge 2018

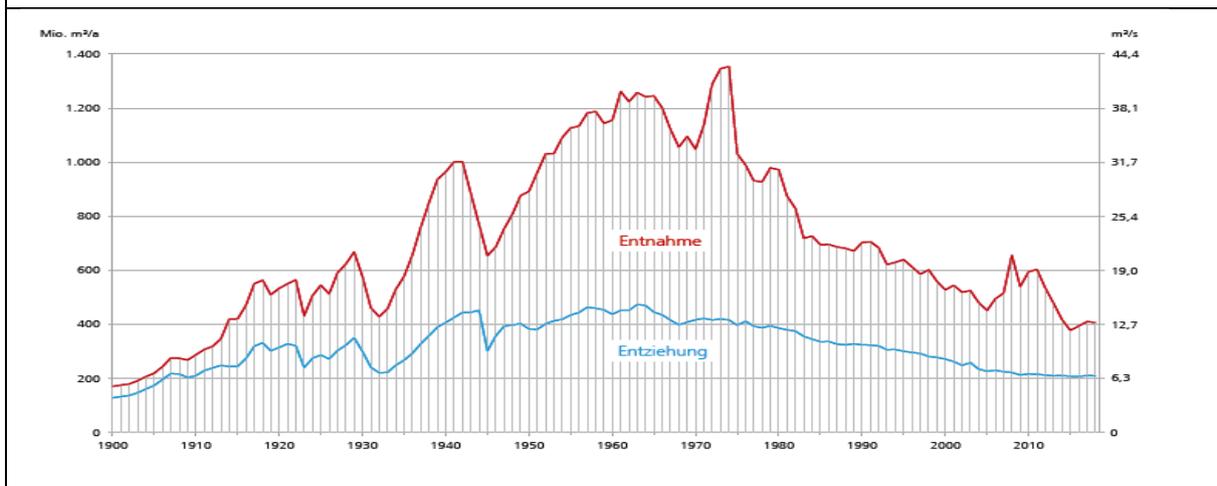


Abb. 18: Wasserentnahme und Entziehung aus der Ruhr zwischen 1900 und 2018 Quelle: Ruhrverband, Ruhrwassermenge 2018

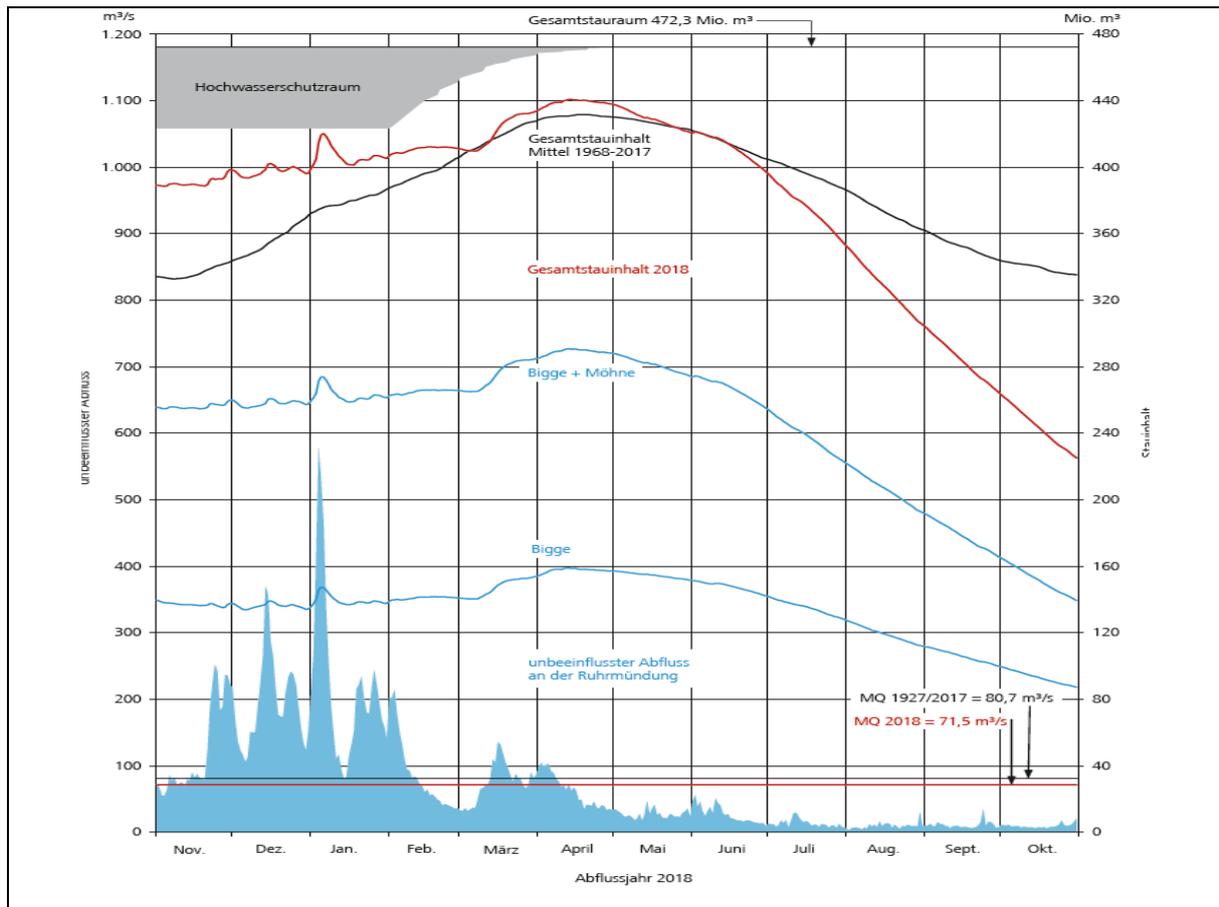


Abb. 19: Unbeeinflusster Abfluss der Ruhr an der Mündung und Speicherinhalte des Talsperrensystems, 2018, Quelle: Ruhrverband, Ruhrwassermenge 2018

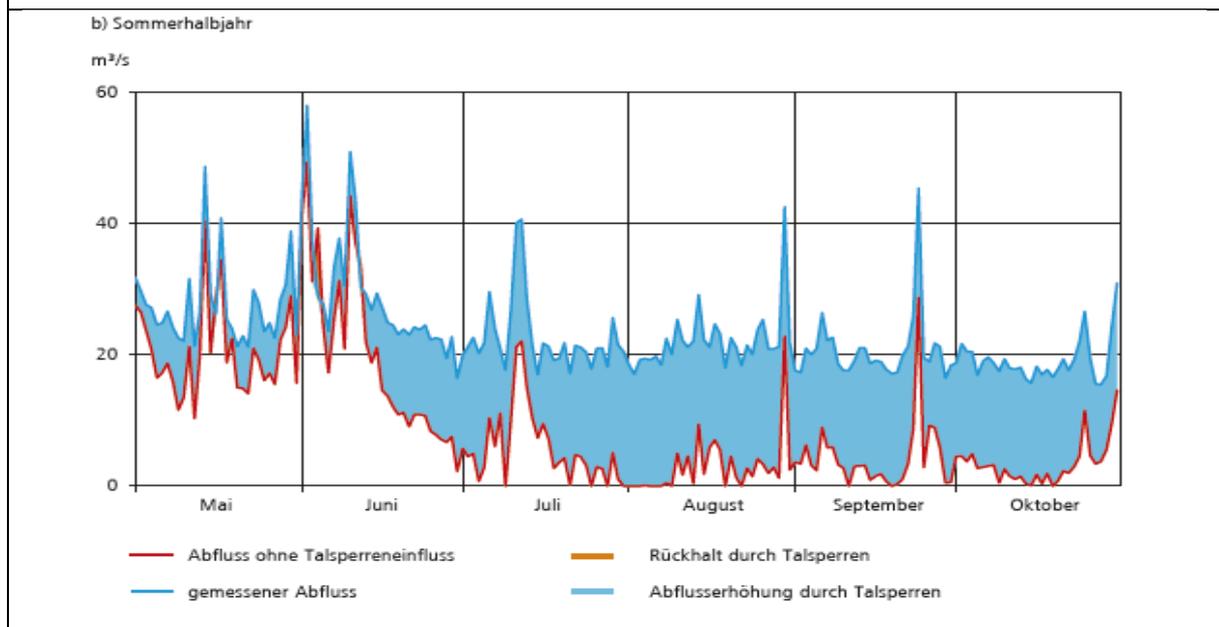


Abb. 20: Abfluss der Ruhr mit und ohne Talsperreneinfluss, Sommer 2018 Quelle: Ruhrverband, Ruhrwassermenge 2018

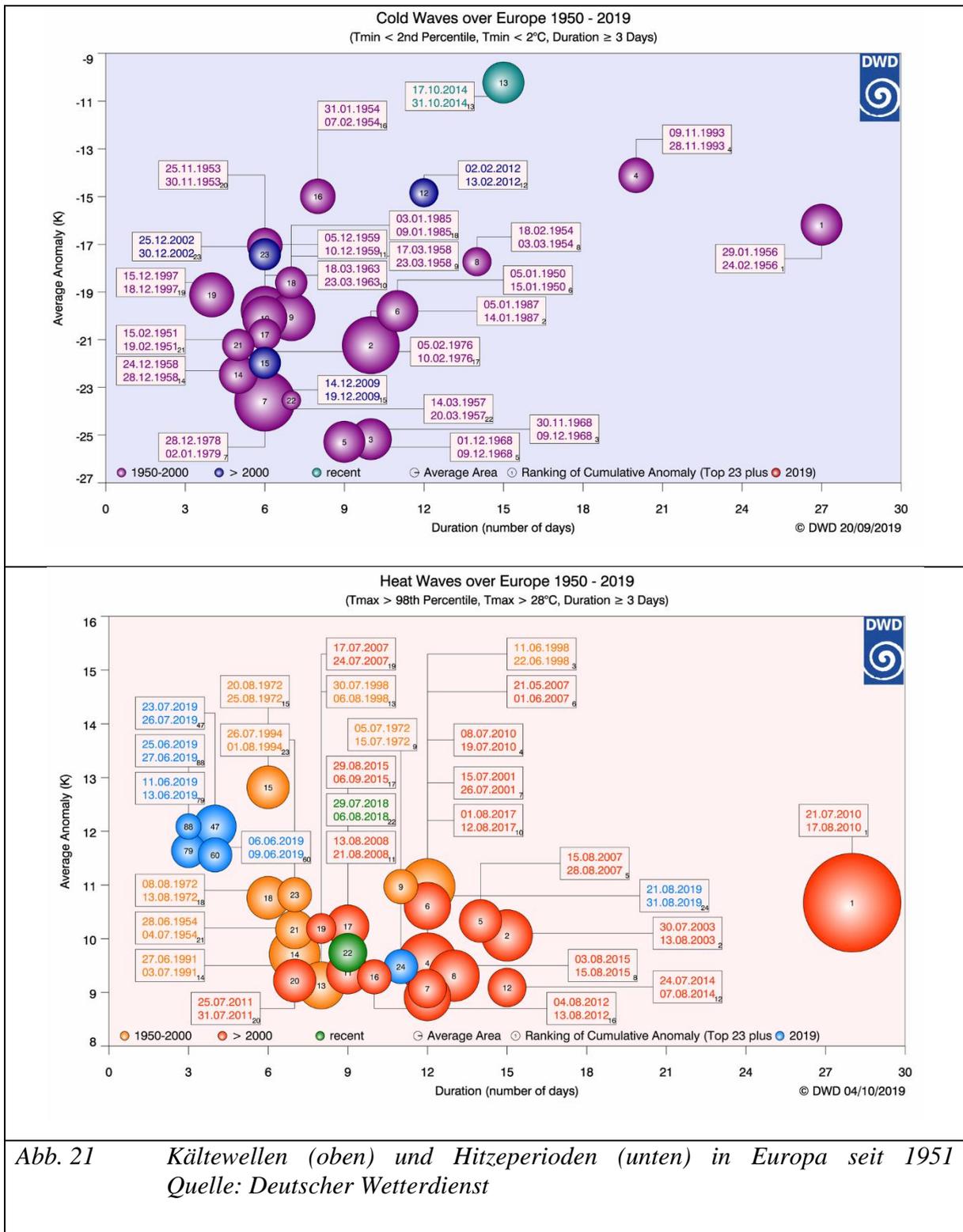


Abb. 21 Kältewellen (oben) und Hitzeperioden (unten) in Europa seit 1951
 Quelle: Deutscher Wetterdienst