

Bericht des Bundes zu den Hochwasserereignissen vom Juli 2021

Vorbemerkung:

Mit Beschluss der Sonderumweltministerkonferenz zum Hochwasser 2021 am 11. Oktober 2021 haben die Umweltministerinnen, -minister, -senatorinnen und der -senator der Länder den Bund gebeten, der 98. UMK im Frühjahr 2022 einen Bericht zu den Extremwetter- und Hochwasserereignissen vom Juli 2021 vorzulegen und dort insbesondere die Erkenntnisse und Bewertungen seiner nachgeordneten Einrichtungen Deutscher Wetterdienst (DWD), Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) einfließen zu lassen.

Dem Arbeitsauftrag der Umweltministerkonferenz folgend, umfasst der nachfolgende Bericht mit Stand 23.3.2022 eine Zusammenstellung von Beiträgen der BfG, des DWD sowie des BBK. Der Bericht greift zudem auf Elemente des „Berichts zur Hochwasserkatastrophe 2021: Katastrophenhilfe, Wiederaufbau und Evaluierungsprozesse“ des Bundesministeriums des Innern und für Heimat und des Bundesministeriums der Finanzen vom 29.03.2022 zurück, der u. a. eine Übersicht über alle Unterstützungsmaßnahmen des Bundes enthält. Die Beiträge des Deutschen Wetterdienstes wurden den öffentlich zugänglichen Berichten „Hydroklimatologische Einordnung der Stark- und Dauerniederschläge in Teilen Deutschlands im Zusammenhang mit dem Tiefdruckgebiet ‚Bernd‘ vom 12. bis 19. Juli 2021“ vom 21.07.2021 und „Bericht zum Ablauf und Umfang der operationellen Warn- und Beratungstätigkeit des Deutschen Wetterdienstes im Vorlauf und während des Unwetters 12. - 15. Juli 2021 in NRW und Rheinland-Pfalz, ausgelöst durch das Tief ‚Bernd‘“, unverändert entnommen. In Hinblick auf die noch laufenden Untersuchungen der parlamentarischen Untersuchungsausschüsse in den Landtagen von Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz wird von der Erstellung und Veröffentlichung weiterer Berichte durch den DWD derzeit abgesehen. Die BfG besitzt keine Zuständigkeit für den Hochwasserschutz, Hochwasserwarnung und Starkregen. Die Beiträge der BfG beschränken sich daher auf Erkenntnisse und Erfahrungen, die sich bei der Erfüllung der Aufgaben für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes sowie bei der Ausführung von Aufgaben, die die BfG für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz übernimmt, ergeben. Die Zusammenstellung des Berichts erfolgte mit Unterstützung des Umweltbundesamtes (UBA).

1 Hydrometeorologische Ausgangssituation

Die Wetterlage an den Tagen vom 12. bis 15.07.21 zeichnete sich vor allem durch tiefen Luftdruck über Mitteleuropa aus. In Verbindung mit einem Höhentief, das sich langsam von Frankreich her näherte, war die Troposphäre zunehmend instabil geschichtet. Warme und sehr feuchte Luftmassen gelangten aus dem Mittelmeerraum in einer Drehbewegung um das Bodentief „Bernd“ nach Deutschland. Durch erzwungene Hebung (orografisch und dynamisch) und leichte Staueffekte an den westlichen Mittelgebirgen (Sauerland, Westerwald und Eifel), kam es zunächst regional, später großflächig zu wiederkehrendem bzw. anhaltendem Starkregen. In den folgenden Tagen drängte Hoch „Dana“ Tief „Bernd“ in Richtung Südosteuropa ab. Dadurch kam es noch einmal zu anhaltenden Starkniederschlägen im Osterzgebirge und der Lausitz, sowie im Berchtesgadener Land. Ab dem 19.07.21 entspannte sich die Wettersituation etwas.

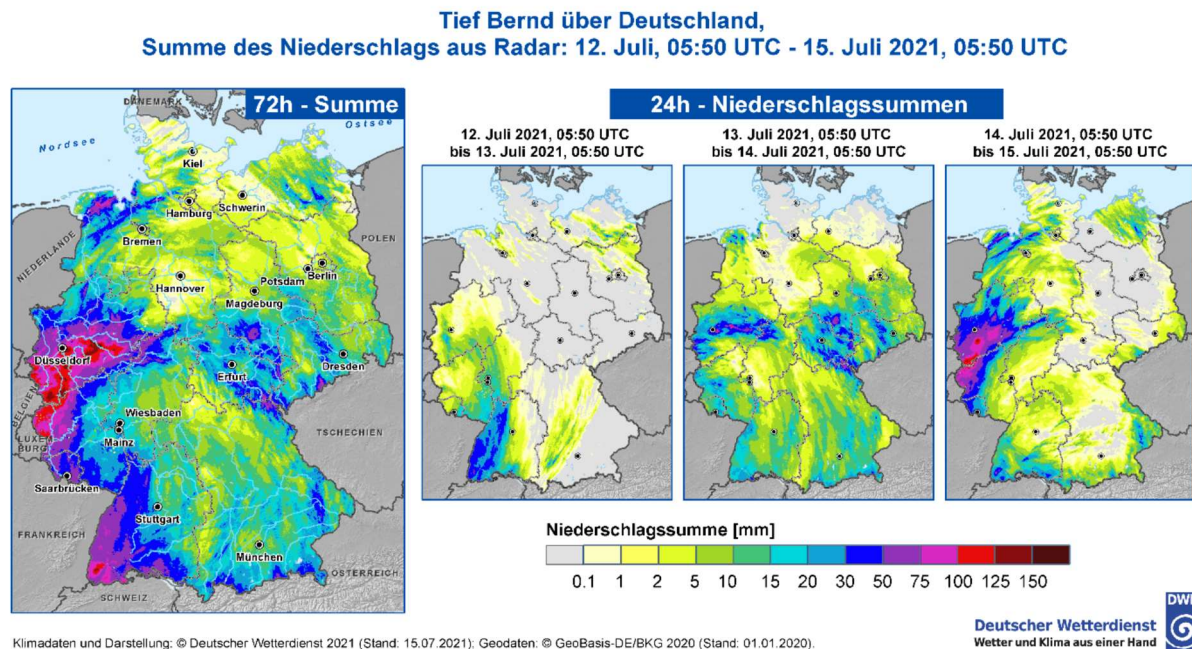


Abb. 1: Niederschlagsanalyse auf Basis von RADOLAN für die Dauerstufe 24 Std. bzw. 72 Std. bis zum 15.07.2021 05:50 UTC (07:50 Uhr MESZ). Quelle: DWD, Hydrometeorologie

Neben der Wettersituation ist bei der Entstehung von Hochwassersituationen auch die momentane Bodenfeuchtesituation von Bedeutung. Denn der Boden kann einen Teil des Niederschlags speichern und zurückhalten. Dies funktioniert aber nur, wenn der Boden nicht zu feucht und nicht zu trocken ist. Die drei Wochen vor dem Hochwasserereignis waren in ganz Deutschland von wiederkehrenden Niederschlagsereignissen geprägt, die die Böden regional bereits gut gefüllt haben (Abb. 2).

Während in Rheinland-Pfalz und in Südwestfalen die Böden regional kaum noch Wasser aufnehmen konnten (teils weniger als 10 mm freier Bodenwasserspeicher), waren die Böden im Südwesten von Nordrhein-Westfalen noch bedingt aufnahmefähig (über 75 mm freier Bodenwasserspeicher). Ähnlich viel freier Speicher stand in Ostsachsen und Südbayern zur Verfügung. Hinzu kommt, dass sehr intensiver Niederschlag meist nicht oder nur in geringem

Maße von den Böden aufgenommen werden kann und somit direkt an der Oberfläche abfließt. Auch Talsperren übernehmen eine wichtige Funktion im Hochwasserschutz, da sie ebenfalls Wasser zurückhalten können. Laut einer Mitteilung des Wupperverbandes senkten Talsperren-Betriebe auf Grund der Vorwarnungen des DWD bereits ab dem 12.07.21 die Wasserpegel vorsorglich ab (Wupperverband).

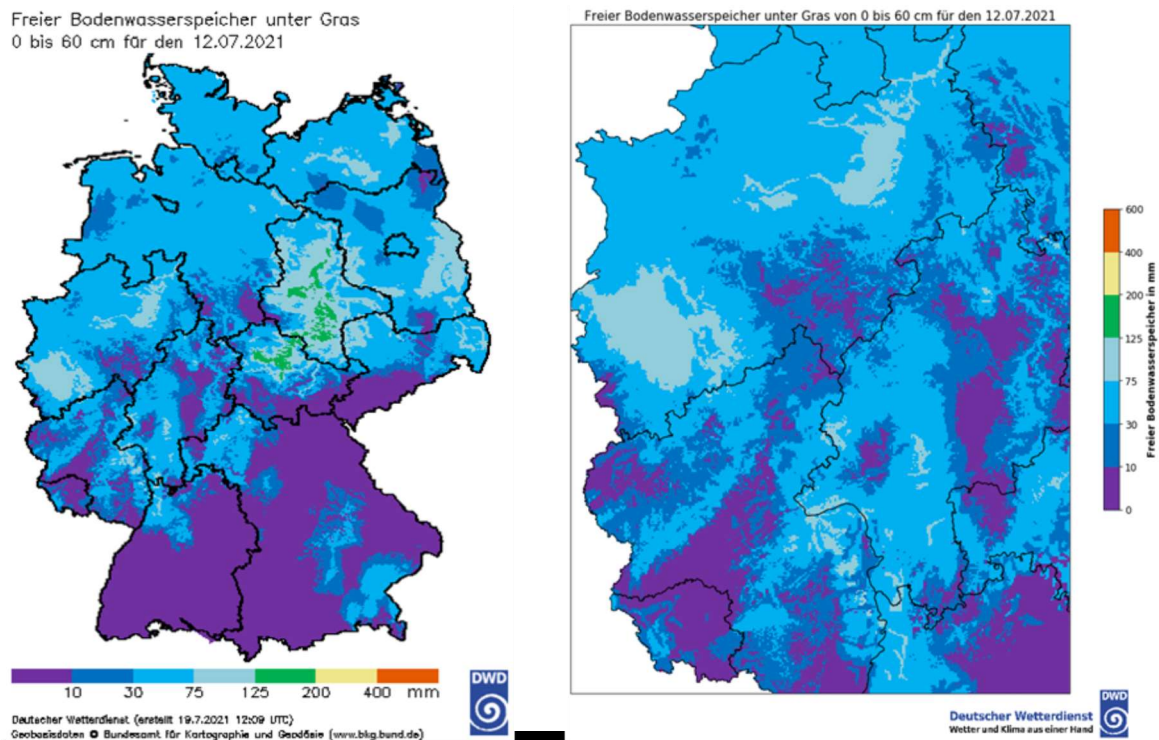


Abb. 2: Freier Bodenwasserspeicher auf einer 60 cm dicken Bodenschicht unter Gras und einem realistischen Boden nach BÜK 1000 vor der Unwettersituation am 12.07.2021. Quelle: DWD, Agrarmeteorologie

2 Zeitlicher und regionaler Verlauf des Niederschlagsgeschehens

Zunächst waren ab dem 12.07.21 Baden-Württemberg (bis über 50 l/m² in 24 Std.), aber auch Teile von Hessen, Rheinland-Pfalz, dem Saarland und Nordrhein-Westfalen (bis über 20 l/m² in 24 Std.) betroffen (Abb. 1). Im Laufe der Zeit verlagerte sich der Kern des Tiefdruckgebietes nur langsam von Südwesteuropa weiter in Richtung Deutschland.

Am 13.07. lag die Niederschlagstätigkeit vor allem in der Mitte Deutschlands (Abb. 1). Zum Beispiel fielen im Erzgebirge (Region Marienberg) laut Radarmessung bis 87 l/m² in 2 Stunden (Tab. 2). Im Hofer Land (Oberfranken) fielen in Selbitz laut Radarmessungen 43 l/m² in nur 30 Minuten. In Querfurt (Saalekreis) wurden 66 l/m² in nur 2 Stunden an der Station Mühle-Lodersleben registriert. Aber auch die nördlichen Teile von Hessen (Kreis Waldeck-Frankenberg) und vor allem das Ruhrgebiet und Südwestfalen waren stark betroffen. Die Städte Solingen und Hagen, sowie Wuppertal waren stark von großen Überschwemmungen betroffen. In Hagen wurden an einer Station des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV) mehr als 241 l/m² Niederschlag in nur 22 Stunden gemessen (LANUV NW).

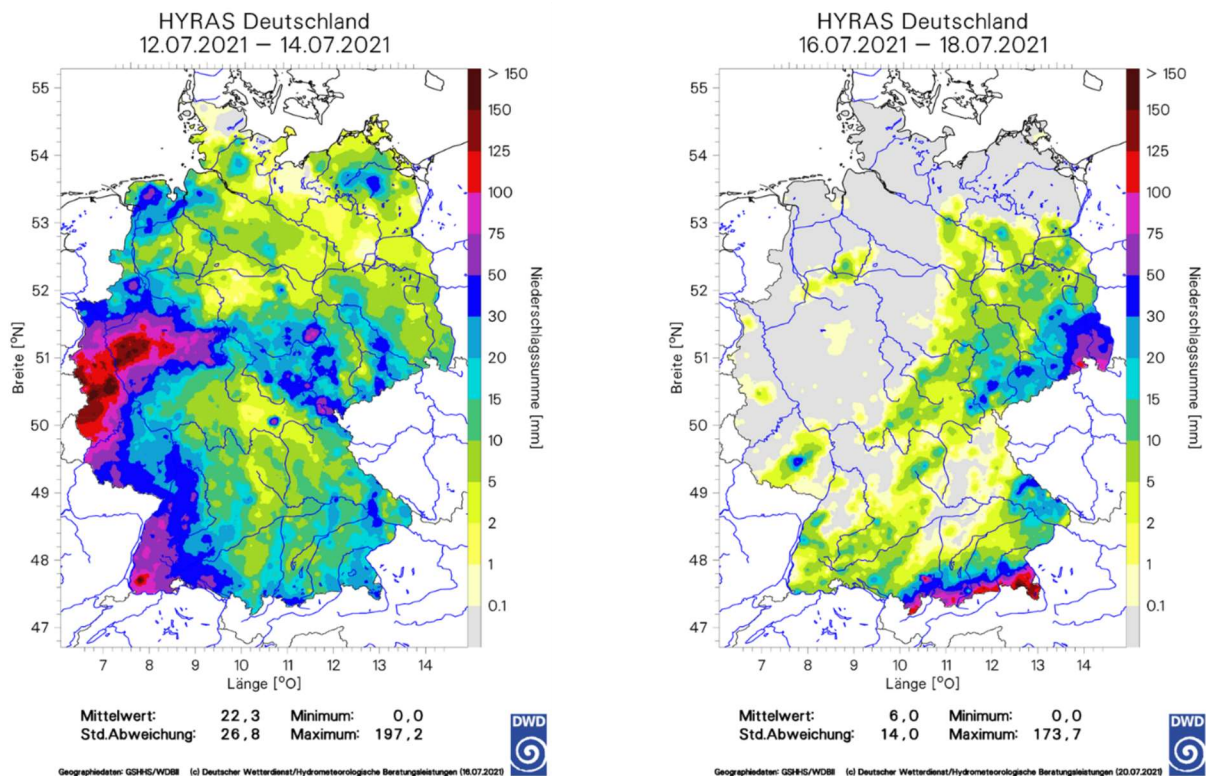


Abb. 3: Niederschlagsanalyse auf Basis von Hydrometeorologischen Rasterdaten (HYRAS), für die Dauerstufe 72 Std. bis zum 15.07.2021 08:00 Uhr MESZ (links) bzw. bis zum 19.07.2021 08:00 Uhr MESZ (rechts). Quelle: DWD, Hydrometeorologie

Beginnend am 14.07.21 und bis in die Morgenstunden des 15.07.21 kam es dann zu ergiebigem Dauerregen, der lokal immer wieder durch Regenschauer verstärkt wurde. Der Schwerpunkt der Niederschlagstätigkeit erstreckte sich in einem Gebiet von Dortmund über Köln, Euskirchen, Gerolstein, Bitburg bis hin nach Trier (Abb. 3). Hier wurden weitflächig mehr als 100 l/m² Niederschlag in 72 Stunden registriert. Regional fielen sogar über 150 l/m² Niederschlag in 24 Stunden (siehe Tab. 2).

Durch den großflächigen und anhaltenden Starkniederschlag wurden große Teile von Flusseinzugsgebieten beregnet. Das Wasser sammelte sich und wurde teils in den engen Flusstälern kanalisiert. Die enormen Regenmengen, aber vor allem auch die orographischen Gegebenheiten und die gesättigten Böden führten zu einer Potenzierung der Schadenswirkung. Besonders das Ahrtal war von dieser Situation betroffen. Binnen kurzer Zeit entstanden hohe Personen- und Sachschäden. Alleine in diesem Landkreis sind über 110 Menschenleben zu beklagen. In Bad Neuenahr-Ahrweiler, Sinzig und Schuld wurden viele Häuser komplett zerstört und es gab verheerende Schäden an der Infrastruktur. Im Ahrtal wurden sämtliche Bahnbrücken zerstört, Straßen und Schienen weggespült. Die Strom- und Trinkwasserversorgung sowie Kommunikationsmittel fielen aus. Im Kreis Euskirchen mussten mehrere Orte evakuiert werden, weil der Damm der Steinbachtalsperre zu brechen drohte. Ebenfalls betroffen waren Städte und Gemeinden an den Flüssen Erft, Swist und Rur.

In Köln, Leverkusen, Düsseldorf und längs der westfälischen Ruhr kam es ebenfalls nach den ergiebigen und andauernden Niederschlägen zu Personenschäden, zahlreiche Keller und Straßen wurden überflutet und teilweise mussten flussnahe Wohngebiete evakuiert werden.

Tab. 1: Mittlere und Maximale Niederschläge pro Tag bzw. über 3 Tage je Flusseinzugsgebiet in l/m², sowie die mittlere Summe für den Juli (Referenzzeitraum 1991-2020) auf Basis von HYRAS. Quelle DWD, HM.

| Einzugs- gebiet | 12.07.21 | | 13.07.21 | | 14.07.21 | | 3-Tage- Summe | Referenz (1991-2020) |
|--------------------|----------|------|----------|------|----------|-------|------------------|-------------------------|
| | Mittel | Max | Mittel | Max | Mittel | Max | | |
| | | | | | | | Mittel | Monat Juli |
| Agger | 9,2 | 18,7 | 14,7 | 39,9 | 82,5 | 124,4 | 106,4 | 100,6 |
| Ahr | 8,7 | 13,0 | 12,1 | 23,5 | 94,5 | 147,5 | 115,3 | 69,4 |
| Emscher | 1,1 | 3,3 | 20,9 | 31,2 | 45,6 | 83,8 | 67,6 | 82,5 |
| Erfst | 11,9 | 26,3 | 23,8 | 56,8 | 93,8 | 169,1 | 129,5 | 67,9 |
| Kyll | 4,0 | 15,8 | 17,8 | 33,8 | 103,7 | 145,7 | 125,5 | 73,1 |
| Lippe | 0,7 | 4,0 | 15,0 | 50,1 | 29,1 | 88,8 | 44,8 | 84,1 |
| Mosel | 5,2 | 17,7 | 18,8 | 52,3 | 50,9 | 145,7 | 74,9 | 71,6 |
| Prüm | 2,6 | 12,4 | 25,5 | 35,0 | 97,5 | 124,3 | 125,6 | 74,5 |
| Ruhr | 3,7 | 18,7 | 34,5 | 76,1 | 62,2 | 121,4 | 100,4 | 96,4 |
| Rur | 3,2 | 13,4 | 36,0 | 66,8 | 82,8 | 154,1 | 122,0 | 74,4 |
| Sieg | 10,9 | 24,0 | 8,2 | 39,9 | 47,3 | 124,4 | 66,4 | 93,7 |
| Wupper | 2,9 | 9,6 | 35,4 | 66,9 | 105,4 | 151,4 | 143,7 | 100,7 |

Die Talsperren der betroffenen Region konnten einen Teil des Niederschlages eine Zeit lang zurückhalten. Da aber der Zufluss aus den Einzugsgebieten den Ablauf um ein Vielfaches überstieg, liefen einige von ihnen über (Wupperverband).

Mit dem Abzug von Tief „Bernd“ in Richtung Südosteuropa kam es noch einmal vom 15.07.21 bis 19.07.21 zu anhaltenden bzw. wiederkehrenden Starkniederschlägen in Ostsachsen und Südbayern (Abb. 3). Erneut verstärkte die Orographie (Erzgebirge, Lausitzer Gebirge, Alpen) die Niederschlagstätigkeit durch Staueffekte. In Sachsen kam es in den kleinen Oberläufen und engen Tallagen teils zu Sturzfluten und die Flüsse Sebnitz, Polenz und Wesnitz, sowie die Lausitzer Neiße führten kurze Zeit große Hochwässer.

Im Süden Bayerns, insbesondere im Berchtesgadener Land, sorgten vor allem Starkniederschläge mit kurzen Andauerstufen (Dauerstufe D = 1 bis 3 Std.) für das schnelle Anschwellen von kleinen Gebirgsbächen. Damit verbunden waren auch kleinere Sturzfluten und Erdrutsche, die lokal zu erheblichen Schäden führten.

Tab. 2: Messwerte von Stationen und Wetterradar für ausgewählte Orte und Zeitpunkte, sowie deren Wiederkehrzeiten nach KOSTRA-DWD-2010R für die Niederschläge vom 12. bis 19.07.2021 in Deutschland. Quellen: DWD und LANUV NW (Station Hagen-Holthausen).

| Messung | Datum/ Uhrzeit (MESZ) | Ort/Region | Niederschlagshöhe | Wiederkehrintervall [a] |
|--------------|--------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| Station | 13.07.21 08:00 | Malsburg-Marzell (BW) | 57,1 l/m ² / 12 h | 3 a |
| Station | 13.07.21 13:00 | Malsburg-Marzell (BW) | 80,1 l/m ² / 24 h | 6 a |
| Station | 15.07.21 20:00 | Malsburg-Marzell (BW) | 171,8 l/m ² / 72 h | 54 a |
| Station | 14.07.21 08:00 | Marienberg-Reitzenhain (SN) | 49,3 l/m ² / 24 h | 1 a |
| Radar | 13.07.21 21:00 | Region Marienberg (SN) | 87,5 l/m ² / 2 h | >100 a |
| Station | 13.07.21 22:00 | Hof (BY) | 60,1 l/m ² / 2 h | >100 a |
| Station | 13.07.21 22:00 | Hof (BY) | 83,8 l/m ² / 6 h | >100 a |
| Radar | 13.07.21 16:25 | Selbitz (BY) | 43,3 l/m ² / 30 min | >100 a |
| Station | 14.07.21 04:00 | Querfurt-Mühle Lodersleben (ST) | 66,1 l/m ² / 2 h | >100 a |
| Station | 14.07.21 05:00 | Querfurt-Mühle Lodersleben (ST) | 80,1 l/m ² / 6 h | >100 a |
| Station | 14.07.21 01:00 | Hagen-Holthausen (LANUV, NW) [13] | 66,0 l/m ² in 1 h | >100 a |
| Station | 14.07.21 20:00 | Hagen-Holthausen (LANUV, NW) [13] | 241,3 l/m ² in 22h | >100 a |
| Station | 14.07.21 22:00 | Wipperfurth-Gardeweg (NW) | 74,1 l/m ² in 6 h | 76 a |

| | | | | |
|---------|----------------|--------------------------------|--------------------------------|--------|
| Station | 14.07.21 22:00 | Wipperfurth-Gardeweg (NW) | 132,0 l/m ² in 12h | >100 a |
| Station | 14.07.21 22:00 | Wipperfurth-Gardeweg (NW) | 162,4 l/m ² in 24h | >100 a |
| Station | 14.07.21 22:00 | Wipperfurth-Gardeweg (NW) | 167,9 l/m ² in 48h | >100 a |
| Station | 14.07.21 22:00 | Köln-Stammheim (NW) | 84,6 l/m ² in 6 h | >100 a |
| Station | 14.07.21 22:00 | Köln-Stammheim (NW) | 144,6 l/m ² in 12h | >100 a |
| Station | 14.07.21 22:00 | Köln-Stammheim (NW) | 159,8 l/m ² in 24h | >100 a |
| Station | 14.07.21 22:00 | Köln-Stammheim (NW) | 169,5 l/m ² in 48h | >100 a |
| Station | 14.07.21 22:00 | Wuppertal-Buchenhofen (NW) | 78,4 l/m ² in 6 h | >100 a |
| Station | 14.07.21 22:00 | Wuppertal-Buchenhofen (NW) | 89,5 l/m ² in 12 h | >100 a |
| Station | 14.07.21 22:00 | Wuppertal-Buchenhofen (NW) | 151,0 l/m ² in 24h | >100 a |
| Station | 14.07.21 22:00 | Wuppertal-Buchenhofen (NW) | 155,2 l/m ² in 48h | >100 a |
| Station | 14.07.21 22:00 | Dahlem-Schmidtheim (NW) | 79,1 l/m ² in 6 h | >100 a |
| Station | 14.07.21 22:00 | Dahlem-Schmidtheim (NW) | 108,6 l/m ² in 12h | >100 a |
| Station | 15.07.21 06:00 | Dahlem-Schmidtheim (NW) | 129,3 l/m ² in 24h | >100 a |
| Station | 15.07.21 02:00 | Dahlem-Schmidtheim (NW) | 137,3 l/m ² in 48h | >100 a |
| Station | 14.07.21 22:00 | Kall-Sistig (NW) | 88,5 l/m ² in 6 h | >100 a |
| Station | 14.07.21 22:00 | Kall-Sistig (NW) | 88,5 l/m ² in 6 h | >100 a |
| Station | 14.07.21 22:00 | Kall-Sistig (NW) | 111,0 l/m ² in 12h | >100 a |
| Station | 14.07.21 22:00 | Kall-Sistig (NW) | 152,4 l/m ² in 24h | >100 a |
| Station | 14.07.21 23:00 | Kall-Sistig (NW) | 165,7 l/m ² in 48h | >100 a |
| Station | 14.07.21 22:00 | Schneifelforsthaus (LfU, RP) | 72,6 l/m ² in 6 h | >100 a |
| Station | 14.07.21 22:00 | Schneifelforsthaus (LfU, RP) | 113,1 l/m ² in 12 h | >100 a |
| Station | 15.07.21 01:00 | Schneifelforsthaus (LfU, RP) | 124,9 l/m ² in 24 h | >100 a |
| Station | 15.07.21 21:00 | Schneifelforsthaus (LfU, RP) | 139,2 l/m ² in 48 h | >100 a |
| Station | 15.07.21 00:00 | Trier (RP) | 63,9 l/m ² / 12 h | 70 a |
| Station | 15.07.21 00:00 | Trier (RP) | 91,1 l/m ² / 48 h | >100 a |
| | | | | |
| Station | 17.07.21 19:00 | Lichtenhain-Mittelndorf (SN) | 77,5 l/m ² in 6 h | 59 a |
| Station | 17.07.21 18:00 | Lichtenhain-Mittelndorf (SN) | 79,4 l/m ² in 12 h | 25 a |
| Station | 17.07.21 19:00 | Lichtenhain-Mittelndorf (SN) | 111,7 l/m ² in 24 h | 72 a |
| Station | 17.07.21 22:00 | Bertsdorf-Hörnitz (SN) | 38,4 l/m ² in 6 h | 4 a |
| Station | 17.07.21 22:00 | Bertsdorf-Hörnitz (SN) | 54,9 l/m ² in 12 h | 8 a |
| Station | 17.07.21 22:00 | Bertsdorf-Hörnitz (SN) | 92,5 l/m ² in 24 h | 56 a |
| Station | 17.07.21 22:00 | Bertsdorf-Hörnitz (SN) | 95,1 l/m ² in 48 h | 13 a |
| Station | 17.07.21 21:00 | Berchtesgaden (BY) | 45,5 l/m ² in 1 h | 16 a |
| Station | 17.07.21 21:00 | Berchtesgaden (BY) | 59,1 l/m ² in 2 h | 23 a |
| Station | 17.07.21 21:00 | Berchtesgaden (BY) | 67,5 l/m ² in 3 h | 25 a |
| Station | 18.07.21 13:00 | Berchtesgaden (BY) | 99,3 l/m ² in 24 h | 8 a |
| Station | 18.07.21 22:00 | Berchtesgaden (BY) | 120,5 l/m ² in 48 h | 5 a |
| Station | 19.07.21 08:00 | Bischofswiesen-Winkl (BY) | 150,7 l/m ² in 48 h | 15 a |
| Radar | 18.07.21 22:00 | Raum Berchtesgaden | 156,1 l/m ² in 48 h | 18 a |
| Station | 18.07.21 21:00 | Ramsau-Schwarzeck-Schmuck (BY) | 48,4 l/m ² in 6 h | 2 a |
| Station | 18.07.21 13:00 | Ramsau-Schwarzeck-Schmuck (BY) | 92,9 l/m ² in 24 h | 2 a |
| Station | 18.07.21 23:00 | Ramsau-Schwarzeck-Schmuck (BY) | 122,7 l/m ² in 48 h | 8 a |

3 Hydrologische Beschreibung und Einordnung - Abflussgeschehen, Wasserstände, statistische Einordnung

Hydrologische Beschreibung und Einordnung

Mitte Juli 2021 kam es in mehreren Regionen Mitteleuropas zu extremen Hochwasserereignissen mit teils katastrophalem Ausmaß. Bereits vor dem auslösenden Tiefdruckgebiet „Bernd“ war die Witterung ab Juni von feuchtwarmen Luftmassen langsam ziehender Tiefdruckgebiete geprägt, die großräumig zu ergiebigem Niederschlag und lokal vielerorts zu Starkregen führten. Damit waren Mitte Juli 2021 in Deutschland verschiedene Regionen mehr oder weniger gleichzeitig von Hochwasser betroffen. Anders als etwa im Jahr 2016 (Braunsbach, Simbach) handelte es sich nicht um einzelne, lokale Sturzfluten, sondern um lokal

bis regional ausgeprägte, extreme Ereignisse an einer Vielzahl von Gewässern unterschiedlicher Größe gleichzeitig. Durch das auf verschiedene Flussgebiete verteilte Geschehen mit jeweils räumlich und zeitlich mehr oder weniger begrenzter Ausdehnung der Extremereignisse ergaben sich in den großen Strömen dagegen keine extremen Hochwasserereignisse wie etwa in den Jahren 1993 und 1995 am Rhein oder 2002 und 2013 an Donau und Elbe.

Besonders im Westen von Rheinland-Pfalz und der Südhälfte Nordrhein-Westfalens, kam es vom 13. bis 15. Juli großflächig zu ergiebigem Dauerregen, der sich phasen- und gebietsweise zu extremem Starkregen verstärkte. Ebenfalls betroffen, wenn auch meist weniger extrem, waren Baden, Oberfranken, das Vogtland, das westliche Erzgebirge sowie das angrenzende Ausland (Benelux, Frankreich, Schweiz, Österreich). Verbunden mit den weitgehend gesättigten Böden und den orographischen Gegebenheiten im Mittelgebirge kam es in den genannten Regionen in kleineren Fließgewässern zu Hochwasser und zu lokalen und regionalen Sturzfluten. Anhaltender Niederschlag führte auch in den Flüssen (z. B. Ahr, Erft, Aisch, Obere Weiße Elster) teilweise zu extremen Hochwasseranstiegen und Hochwasserscheiteln.

In den Folgetagen (15. bis 19. Juli) kam es weiterhin zu anhaltenden bzw. wiederkehrenden Starkniederschlägen im Osterzgebirge und der Lausitz, am bayerischen Alpenrand und in den angrenzenden Gebieten der Schweiz und Österreichs, die teils ebenfalls zu Sturzfluten und regional zu Hochwasser führten. Ab dem 19. Juli entspannte sich die Wettersituation.

Weiterführende Einzelheiten können Berichten der zuständigen Landesämter bzw. Ministerien entnommen werden. Zudem sei an dieser Stelle auf die fundierte Analyse der Hochwasserereignisse verwiesen, mit der die LAWA beauftragt wurde und deren Ergebnisse der 99. UMK im Herbst 2022 vorgelegt werden sollen.

Die Hochwassersituation an den großen Strömen

Die intensiven Niederschläge mit Schwerpunkten im Westen und Süden Deutschlands im Juli 2021 führten bei kleineren Fließgewässern zu äußerst raschem Anschwellen der Abflüsse, streckenweise traten auch Sturzfluten auf. Hier kam es teilweise zu katastrophalen Situationen und Verlust von Menschenleben.

Demgegenüber jedoch waren unter den großen freifließenden Bundeswasserstraßen zwar insbesondere im Rhein- und Donaugebiet deutliche Anstiege zu verzeichnen. Aber nur im Falle von Oberrhein und Mosel sowie kurzzeitig auch im Falle der Donau führten diese zu Sperrungen für die Schifffahrt infolge Ausuferungen und Überschreitungen der HSW-Marken (HSW=höchster schiffbarer Wasserstand) (Tab. 3).

Sommerhochwasser des Oberrheins sind nichts Ungewöhnliches. Im Allgemeinen ist wesentliche Ursache für Sommerhochwasser des Oberrheins sein nivales (schneeschnelzgeprägtes) Abflussregime. Mit der Schneeschmelze in den Alpen fließen bis in den Juni hinein große Wassermengen ab, welche nicht nur die dortigen Fließgewässer, sondern auch die großen Seen, wie den Bodensee und die Schweizer Voralpenseen, füllen. Für alle diese ist letztlich der Rhein der Vorfluter. Entsprechend liegt das innerjährliche Abflussmaximum des Oberrheins im Juni. Ergiebige Regenphasen, zumal wenn sie mit Warmluft und zusätzlichem Schmelzwasseranfall verbunden sind, führen dann angesichts der gegebenen Vorfüllung der Gewässer schneller zu Ausuferungen.

Im Juli 2021 baute sich aufgrund der wiederholten Niederschlagsereignisse und der großen Vorfeuchte am Oberrhein ein größeres Hochwasser mit Ausbildung mehrere Spitzen im zeitlichen Verlauf auf. Durch den Einsatz dreier gesteuerter Rückhaltmaßnahmen gemäß dem deutsch-französischen Reglement wurde der Wasserstand deutlich abgesenkt und die Schutzdämme entlang der freien Rheinstrecke nördlich von Iffezheim entlastet (LfU RP).

Unterhalb der Maßnahmen wurde in Karlsruhe-Maxau der maximale Abfluss mit einem Wert von 4220 m³/s am 17.7.2021 um 17:15 Uhr (MESZ) gemessen. Ein Ereignis dieser Größenordnung tritt in diesem Rheinabschnitt etwa alle 10 bis 20 Jahre auf. Dieser registrierte Wert liegt allerdings rund 50 % über dem vieljährigen saisonalen Durchschnitt der letzten 120 Jahre Seit Beginn des 20. Jh. gab es hier nur drei höhere Sommerhochwasser als in 2021.

Bereits unterhalb der Neckarmündung begann eine merkliche Verflachung der Hochwasserwelle, die sich stromabwärts fortsetzte. Die Moselwelle lief, wie auch die Wellen der kleineren Nebenflüsse (Ahr, Sieg, Wupper, Erft und Ruhr) der Rheinwelle zeitlich voraus, so dass es nicht zu einer Scheitelüberlagerung und daher nur zu einem vergleichsweise moderaten Scheitelanstieg kam.

Tab. 3: Das Julihochwasser 2021 an repräsentativen Pegeln sowohl der stärker betroffenen Bundeswasserstraßen als auch an der vergleichsweise wenig betroffenen Elbe (HQ = Hochwasser-Scheiteldurchfluss, MQ = Durchflussmittel und MHQ = mittlerer Hochwasserdurchfluss der angegebenen Referenzperiode).

Datenquellen: WSV sowie viadonau (Achleiten). Kursive Schrift (HQ) = Rohdaten. Die Angabe der Wiederkehrintervalle erfolgt auf Basis einer vorläufigen, nicht mit den Ländern abgestimmten Berechnung.

| Gewässer | Pegel | HQ [m ³ /s] | Datum (Uhrzeit MESZ) [dd.mm (hh:min)] | Wiederkehr- intervall [Jahre] | MQ (Referenz 1961/2020) [m ³ /s] | MHQ [m ³ /s] |
|----------|------------------|---------------------------|---|-------------------------------------|---|----------------------------|
| Mosel | Trier UP | 2600 | 15.07. (17:28) | 2-5 | 282 | 1940 |
| | Cochem UP | 2850 | 16.07. (08:30) | 2-5 | 322 | 2140 |
| Rhein | Maxau | 4220 | 17.07. (17:15) | 10-20 | 1260 | 3240 |
| | Kaub | 4190 | 19.07. (06:43) | <2 | 1690 | 4330 |
| | Andernach | 6560 | 16.07. (19:21) | 2-5 | 2080 | 6260 |
| | Köln | 6630 | 16.07. (00:55) | 2-5 | 2140 | 6380 |
| | Duisburg-Ruhrort | 7130 | 17.07. (08:00) | 2 | 2260 | 6640 |
| Donau | Hofkirchen | 1670 | 20.07. (22:15) | <2 | 637 | 1920 |
| | Achleiten | 4800 | 19.07. (02:15) | 2-5 | 1400 | 4270 |
| Elbe | Schöna | 671 | 16.07. (02:35) | <2 | 299 | 1300 |
| | Dresden | 763 | 18.07. (04:26) | <2 | 320 | 1350 |
| | Barby | 959 | 20.07. (07:00) | <2 | 540 | 1850 |

Das Julihochwasser 2021 im Einzugsgebiet der Mosel erreichte seine katastrophalen Ausmaße in den Tallagen ihrer Nebeneinzugsgebiete, insbesondere in der Eifel. Ungeachtet der schweren Überflutungen in zahlreichen ihrer Nebengewässer war dennoch die Wasserführung der Mosel letztlich nicht als extrem zu bezeichnen. Der Hochwasserscheitel am Pegel Trier UP erreichte am 15.7.2021 um 16:28 Uhr (MESZ) in der Spitze mit einem Wasserstand von 934 cm über PNP und einem Abfluss von 2600 m³/s eine Größenordnung, wie sie durchschnittlich alle 2 bis

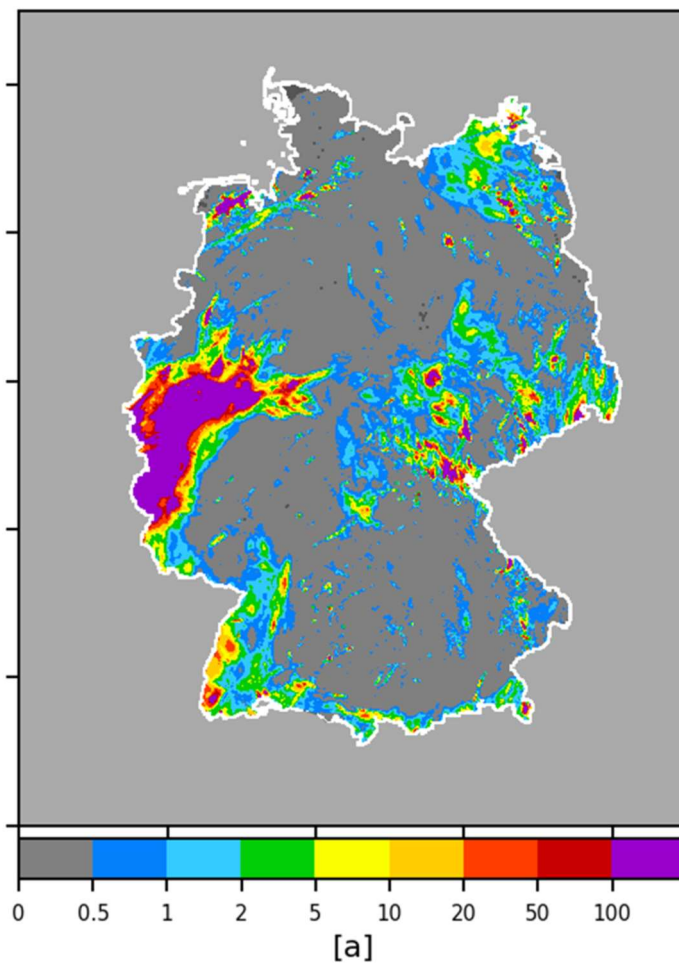
5 Jahre eintritt. Diese für das Gesamtjahr gültige Einstufung ist allerdings zu differenzieren, wenn man die Betrachtungsweise auf die Jahreszeiten lenkt: An der Mosel sind, im Gegensatz zum Oberrhein, die Sommermonate normalerweise abflussschwach. Hochwasserereignisse in dieser Jahreszeit bleiben in der Regel moderat und ufern sehr viel seltener aus als die Winterhochwässer. In der Rangliste der zehn größten Hochwasserereignisse der letzten 120 Jahre gab es dementsprechend vor 2021 auch nur eines im Sommerhalbjahr. Insofern ist weniger die Größenordnung an sich, sondern vor allem der Zeitpunkt eines Moselhochwassers auf solchem Niveau ungewöhnlich: Das aktuelle Hochwasser der Mosel liegt mit seinem Abflussscheitel von $2600 \text{ m}^3/\text{s}$ am Pegel Trier um nahezu 220% über dem vieljährigen Mittel der Sommerhochwasserereignisse ($822 \text{ m}^3/\text{s}$). Seit Beginn des 20. Jahrhunderts verzeichnete man am Pegel Trier lediglich im Jahre 1983 ein größeres Hochwasser in der warmen Jahreszeit. An der Bundeswasserstraße Donau gab es zwar kurzzeitige HSW-Überschreitungen (z.B. am 20.07. am Pegel Hofkirchen), aber bis Passau keine nennenswerten Ausuferungen. Erst die Einmündung des stärker hochwasserführenden Inn erbrachte einen über MHQ hinausgehenden Scheitelabfluss. Am bereits auf österreichischem Gebiet liegenden Pegel Achleiten wurde mit rd. $4800 \text{ m}^3/\text{s}$ (Rohwert) ein HQ mit Wiederkehrintervall von 2 bis 5 Jahren registriert.

Die im Norden und Osten Deutschlands liegenden Stromgebiete wurden durch die auslösenden Starkniederschläge weniger betroffen; hier waren, wie am Beispiel der Elbepegel in Tabelle 3 ersichtlich, die vieljährigen MQ verbreitet zwar deutlich überboten, aber es traten keine Hochwassersituationen ein.

4 Hydro-klimatologische Einordnung - Einfluss des Klimawandels

Im Ereigniszeitraum traten Starkniederschläge verschiedener Andauer auf. Zu Beginn spielten kurze extreme Regenschauer eine Rolle (Dauerstufe $D = 1$ bis 6 Std.). Danach kam es zu einer Mischung von wiederkehrenden (mit Regenspauzen) und anhaltenden Ereignissen (ohne Regenspauzen). Beide Typen führten zu hohen Niederschlagssummen in den mittleren bis langen Andauerstufen ($D = 9$ bis 48 Std.). Die meisten Ereignisse in der ersten Phase (Mittel- und Westdeutschland) konnten mindestens als Jahrhundertereignis (Wiederkehrintervall $T \geq 100$ Jahre) eingestuft werden (siehe Tab. 2 sowie Abb. 4). In vielen Teilen wurde diese Marke sehr deutlich überschritten. Bei den Ereignissen der zweiten Phase (Sachsen, Südbayern) war dies eher nicht der Fall.

max. Wiederkehrzeit



Klimadaten und Darstellung: © Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 2021
Geodaten: © GeoBasis-DE/BKG, 2014



Abb. 4: Maximale Wiederkehrzeit in Jahren über alle Dauerstufen von $D = 1$ Std. bis $D = 72$ Std. auf Basis von Radardaten (RADOLAN) im Ereigniszeitraum 12.07.21 05:50 UTC (07:50 MESZ) bis 19.07.21 05:50 UTC (08:00 MESZ). Quelle: DWD, Hydrometeorologie

Auch wenn keine deutschlandweiten Allzeit-Rekorde eingestellt wurden (vgl. Tab. 4), ist zu bemerken, dass an einer ungewöhnlich großen Zahl von Stationen im Westen bisherige Rekorde weit übertroffen wurden. Innerhalb weniger Stunden oder Tage wurde im Mittel über ganze Flusseinzugsgebiete das 1,5 bis 2,0-fache des mittleren Niederschlages im Juli bezogen auf die Referenzperiode 1991-2020 erreicht (vgl. Tab. 1).

Tab. 4: Höchste bisher gemessene Niederschlagssummen seit Beginn der Wetteraufzeichnung in Deutschland. Quelle: DWD, Hydrometeorologie

| Menge | Ort | Dauer | Datum |
|--------|--|---------|----------------|
| 126 mm | Bei Füssen (Ostallgäu) | 8 Min. | 25.05.1920 |
| 245 mm | Münster (Nordrhein-Westfalen) | 2 Std. | 28.07.2014 |
| 354 mm | Zinnwald-Georgenfeld (Osterzgebirge) | 24 Std. | 12./13.08.2002 |
| 515 mm | Schneizelreuth-Weißbach (Berchtesgadener Land) | 7 Tage | 7.-14.09.1899 |
| 779 mm | Stein (Kreis Rosenheim) | 1 Monat | Juli 1954 |

Die aufgetretenen Starkniederschläge ordnen sich in eine Serie von Ereignissen ein, die schon seit Mai 2021 anhält. Bereits jetzt rangiert das Jahr 2021 unter den Top 5 der Jahre mit den meisten aufgetretenen Einzelereignissen seit 2001 (siehe Abb. 5). Die meisten und intensivsten Starkniederschläge treten in der Regel in Deutschland zwischen Mai und September auf.

Grundsätzlich kann Starkniederschlag an jedem Ort in Deutschland auftreten. Es gibt jedoch eine Tendenz, dass Extremereignisse mit steigender Dauerstufe vermehrt in den Mittel- und Hochgebirgsregionen auftreten.

Insbesondere während der letzten Jahrzehnte war weltweit und in Deutschland ein Temperaturanstieg zu beobachten (Kaspar et al, 2020), der nur durch den Anstieg der atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen erklärbar ist. Es stellt sich daher die Frage, wie sich dieser Klimawandel regional auf die Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen auswirkt.

Analysen der letzten 70 Jahre auf Basis von Tagesdaten zeigen, dass die Intensität und die Häufigkeit von Starkniederschlagstagen (in Rauthe et al. (2020)) definiert als $>20 \text{ l/m}^2$ pro Tag) in Deutschland geringfügig zugenommen haben. Die stärksten Änderungssignale zeigen sich für den Winter. Im Sommer gibt es noch kein klares Bild. Dies liegt vermutlich daran, dass hier zwei Effekte gegenläufig sind. Die Anzahl der Tage mit Niederschlag nimmt eher ab, während sich der Niederschlag selbst an den verbliebenen Tagen intensiviert (Rauthe et al., 2020).

Auf Basis von Klimaprojektionen kann abgeschätzt werden, dass sich diese Tendenz fortsetzt. Die Niederschlagsmengen an Starkniederschlagstagen im Sommer werden wahrscheinlich weiter steigen. Auch die maximalen 1-Tages- und 5-Tagesniederschlagssummen sollen zunehmen. Für subtägliche Andauern ($D < 24 \text{ Std.}$) gibt es derzeit nur wenige Mess- und Modelldaten für Deutschland. Aber auch hier zeichnet sich in Modelldaten eine Tendenz zur Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen in der Zukunft ab (Rauthe et al., 2020).

Ein Grund, warum bei steigenden Temperaturen eine Zunahme von Starkniederschlägen erwartet werden kann, liegt im steigenden Aufnahmevermögen der Luft von Wasserdampf mit steigender Temperatur (Anstieg Sättigungsdampfdruck, Clausius-Clapeyron-Beziehung) (Becker et al., 2016). Weiterhin verdunstet über wärmeren Meeresoberflächen mehr Wasser, wodurch sich ein Potential für diese zusätzliche Feuchtigkeitsaufnahme der Luft ergibt.

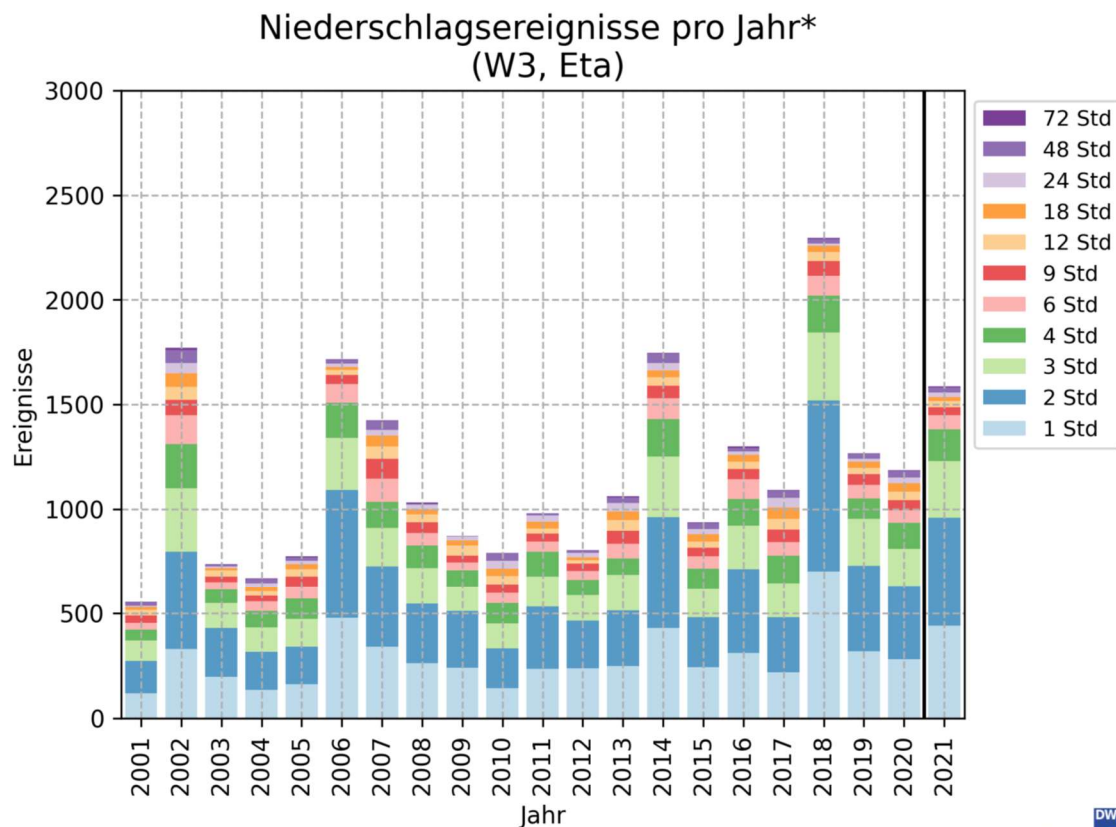


Abb. 5: Anzahl mittels Radars erfasster Starkregeneignisse pro Jahr seit 2001 aus klimatologisch aufbereiteten Radardaten. Als Schwellenwert wurden die Warnkriterien Level 3 (Unwetter) für Stark- bzw. Dauerregen genutzt. Für das Jahr 2021 wurden archivierte Echtzeit-Radardaten bis zum 19.07.2021 05:50 UTC (07:50 MESZ) berücksichtigt. Quelle: DWD, Hydrometeorologie.

Neben diesem Zusammenhang können aber auch Änderungen der Zirkulationsmuster in der Atmosphäre eine wichtige Rolle spielen. So stellt sich zum Beispiel die Frage, ob im Rahmen des Klimawandels eine Veränderung in der Verweildauer einzelner Wetterlagen festzustellen ist. Eine Auswertung zum Wissensstand über sogenannte blockierende Wetterlagen (Woolings et al., 2018) kommt allerdings zu keiner eindeutigen Bewertung bezüglich entsprechender Trends und zur Schlussfolgerung, dass die natürliche Variabilität in den nächsten Jahrzehnten dominieren wird. Weiterhin haben sich verschiedene Studien der Frage gewidmet, ob der stärkere Temperaturanstieg in der Arktis zu verändertem Verhalten der Wetterlagen führen kann. Dabei ist die Annahme, dass die veränderten Temperaturunterschiede zwischen hohen und mittleren Breitengraden Auswirkungen auf die Eigenschaften des um den Nordpol verlaufenden Starkwindbands („Jetstream“) haben und über diesen Mechanismus auch die Persistenz von Wetterlagen in den mittleren Breiten beeinflusst wird. Auch hier kommen allerdings Bestandsaufnahmen der vorhandenen Studien nicht zu einer eindeutigen Schlussfolgerung (Stendel et al, 2021; Cohen et al., 2014).

Allgemein sind extreme Einzelereignisse zunächst kein direkter Beleg für den Klimawandel. Nur langjährige Beobachtungen können zeigen, ob die Häufigkeit bestimmter Ereignisse zugenommen hat oder nicht. Gerade bei extremen Ereignissen, die also nur selten vorkommen, ist es besonders wichtig, einen sehr langen Zeitraum zur betrachten. Ob der Klimawandel nun ein bestimmtes Unwetterereignis verstärkt hat, kann nicht ohne weiteres oder gar pauschal

beantwortet werden. Zwar konnte bereits mittels Attributionsforschung für ausgewählte Extremereignisse (z. B. Hitzewellen) gezeigt werden, dass durch den Klimawandel die Eintrittswahrscheinlichkeit erhöht wurde; dies bedarf aber im Einzelfall umfangreicher Untersuchungen (van Oldenborg et al., 2021). Für den Parameter Niederschlag zeigt eine kürzlich veröffentlichte Studie zu täglichen Maxima des Niederschlags auf globaler Ebene, dass die Intensivierung von Starkniederschlägen, zum Beispiel in Mitteleuropa, zumindest teilweise durch den anthropogenen Klimawandel verstärkt wurde (Madakumbura et al., 2021).

Eine unter Beteiligung von DWD, BfG und Vertretern des Landesamtes für Umwelt Rheinland-Pfalz anlässlich des Juli-Hochwassers durchgeführte Studie der World Weather Attribution Initiative verwendete verschiedene Beobachtungs- und Modelldatenprodukte sowie Methoden der Informationserweiterung (Ereignispooling über eine größere Region) um Änderungen der Eintrittswahrscheinlichkeit von Extremniederschlägen des "Ahr-Typs" infolge des anthropogenen Klimawandels zu ermitteln (Kreienkamp et al., 2021). Demnach ist ein solches Niederschlagsereignis unter den derzeitigen klimatischen Bedingungen an einem bestimmten Ort zwischen den Alpen und der Nordsee im Durchschnitt alle 400 Jahre zu erwarten. Die Wahrscheinlichkeit hat sich damit gegenüber einem um 1,2 °C kühleren Klima um einen Faktor zwischen 1,2 und 9 erhöht und würde sich unter Annahme steigender Temperaturen weiter erhöhen (Faktor 1,2 bis 1,4). Die Studie zeigte auch einen Anstieg der Intensität der Niederschlagsereignisse mit steigender Temperatur (Bezug jeweils 1- und 2-Tagesniederschlagssummen).

5 Informationsbereitstellung seitens der Bundesbehörden vor und während des Ereignisses

5.1 Informationen und Warnungen des Deutschen Wetterdienstes

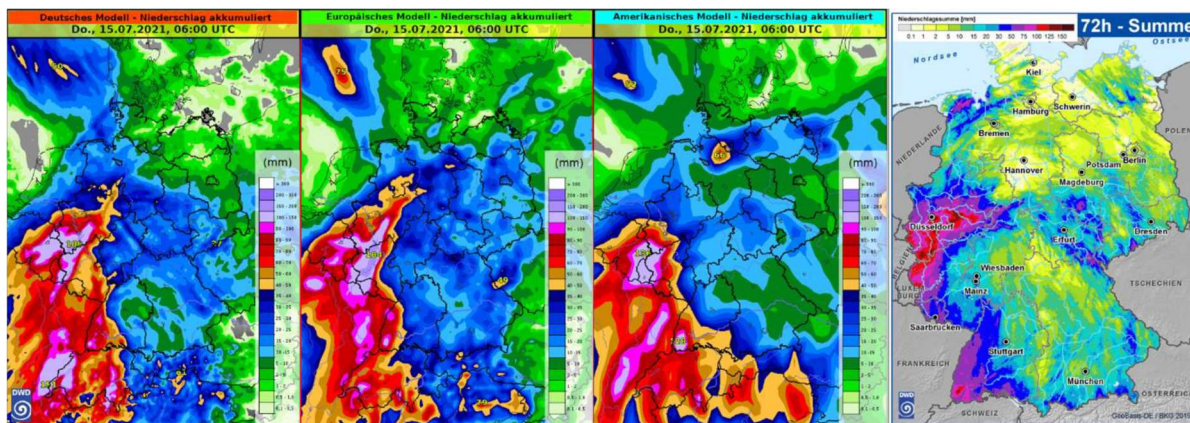
Der Deutsche Wetterdienst (DWD) betreibt im Rahmen seines gesetzlichen Auftrags zur Daseinsvorsorge ein strukturiertes System zur Wetterüberwachung und -warnung. Es beruht auf mit den Nutzerinnen und Nutzern abgestimmten Produkten, Daten und Warnkategorien. Die räumliche Strukturierung orientiert sich an der regionalen, Landkreis- oder Gemeindebezogenen Organisation des Katastrophenschutzes. Die Zusammenarbeit mit den Behörden des Katastrophenschutzes ist durch Verwaltungsvereinbarungen mit den jeweiligen Bundesländern etabliert.

Nachfolgend wird dargestellt, in welchem Umfang der DWD sowohl die Bevölkerung als auch alle anderen relevanten Akteure im Bevölkerungs- und Katastrophenschutz vor und während des Unwetters in NRW und Rheinland-Pfalz in Verbindung mit dem Tief „Bernd“ im Zeitraum um den 12. - 15. Juli 2021 informiert und beraten hat. Neben dem generellen Ablauf der Ereignisse wird dargestellt, auf Basis welcher Informationen wann welche Warnungen erstellt wurden und an welche Nutzergruppen die meteorologischen Warnungen und begleitenden Informationen ausgegeben wurden sowie welche weiteren Daten, Produkte und speziellen Informationsportale bzw. Abgabewege zur Verfügung standen.

Numerische Wettervorhersagen als Grundlage zur Erstellung der Warnungen

Die ersten Hinweise auf extreme Regenfälle waren schon am Sonntag (11.07.2021) in den numerischen Wettervorhersagen zu erkennen. Am Montag zeigte sich eine ungewöhnlich gute Übereinstimmung aller Modellergebnisse hinsichtlich der Niederschlagsprognosen, so dass zu diesem Zeitpunkt schon der betroffene Bereich mit hoher Wahrscheinlichkeit eingegrenzt werden konnte (siehe Abb. 6). Die Folgeläufe der Modelle erhöhten diese Sicherheit und deshalb wurden auch schon relativ früh extreme Unwetterwarnungen ausgegeben.

Abb. 6: Übereinstimmung der akkumulierten Niederschlagsvorhersagen in verschiedenen numerischen Wettervorhersagen vom 12.07. 02 Uhr über den Zeitraum vom 12.-15.07.2021 (links) und zum



Vergleichen die 72h-Summe des beobachteten Niederschlags im Radar mit Stand 15.07.2021, 07:50 Uhr (rechts, mit leicht verändertem Ausschnitt).

Erstellung der Warnungen für den Katastrophenschutz und die Bevölkerung

Das Warnmanagement der DWD gliedert sich in verschiedene Stufen, in denen die Warninformation gestaffelt von frühzeitigen Erstinformationen, über weiter spezifizierte Vorabinformationen im weiteren Verlauf, bis hin zu konkreten Warnungen näher zum eigentlichen Ereignis, ausgegeben werden. Die Wettersituation wird in einem 24/7-Betrieb rund um die Uhr überwacht, d.h. der aktuelle Warnstatus wird bedarfsgerecht und lückenlos aktualisiert.

Der konkrete zeitliche Ablauf der Ausgabe der verschiedenen Warnprodukte ist in Abb. 7 dargestellt. In der routinemäßig erstellten „Wochenvorhersage Wettergefahren“ wurde bereits am Samstag, 10.07.2021 ein „markantes Niederschlagsereignis“ für die betroffene Region angekündigt. Am Sonntagmorgen, 11.07.2021 wurde um 11 Uhr die Vorhersage entsprechend präzisiert und lautete: „Am Mittwoch in einem Streifen vom Saarland-Eifel bis nach NRW erhöhte Unwettergefahr durch ergiebigen Dauerregen mit teils deutlich über 100 l/qm/24h.“. Diese Erstinformation wurde am Montag den 12.07.2021 um 10:20 Uhr erweitert und eine sogenannte Vorabinformation Unwetter wurde herausgegeben. Am Abend wurde diese Vorabinformation durch die erste konkrete Unwetterwarnung ergänzt, die am Dienstag, 13.07.2021 um 9:40 Uhr zu einer extremen Unwetterwarnung heraufgestuft wurde.

Die erste „amtliche Gefahrenmitteilung“, die vom DWD über das vom BBK betriebene Modulare Warnsystem (MoWas) herausgegeben wurde, erfolgte am gleichen Tag um 11:36 Uhr mit einer Aktualisierung am folgenden Tag, 14.07.2021, um 9:08 Uhr. Vorab, um 7:40 Uhr

wurde schon eine Ausweitung der extremen Unwetterwarnung über das DWD-eigene Warnsystem verteilt.

Vergleich mit beobachteten Ereignissen

Eine deutliche Übereinstimmung zwischen vorhergesagter und eingetretener Lage zeigte sich neben der Beobachtung an amtlichen Messstationen und im Radarnetz auch über die Nutzermeldungen der Warn-Wetter-App. In einem Zeitraum von 48h ab dem 13.07.2021 wurden über 15.000 Niederschlagsmeldungen aufgezeichnet, davon ein erheblicher Anteil in den auswirkungsorientierten Ausprägungen "stark (Überschwemmungen)" und "extrem (Sturzbäche)" (Abb. 8).

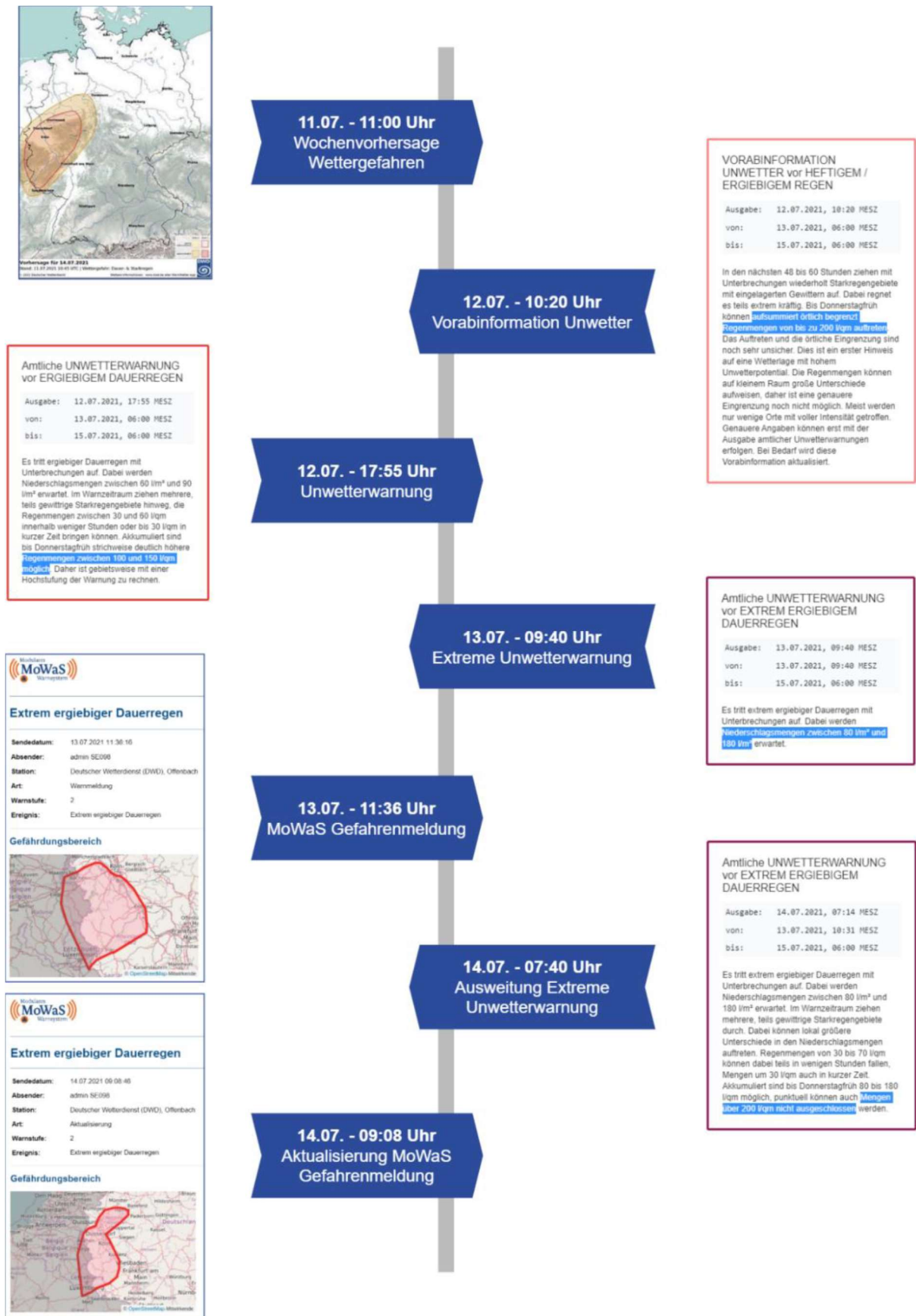


Abb. 7: Zeitliche Einordnung ausgewählter Warnmeldungen, die durch den DWD im Vorlauf und der Entwicklung der Lage ausgegeben wurden.

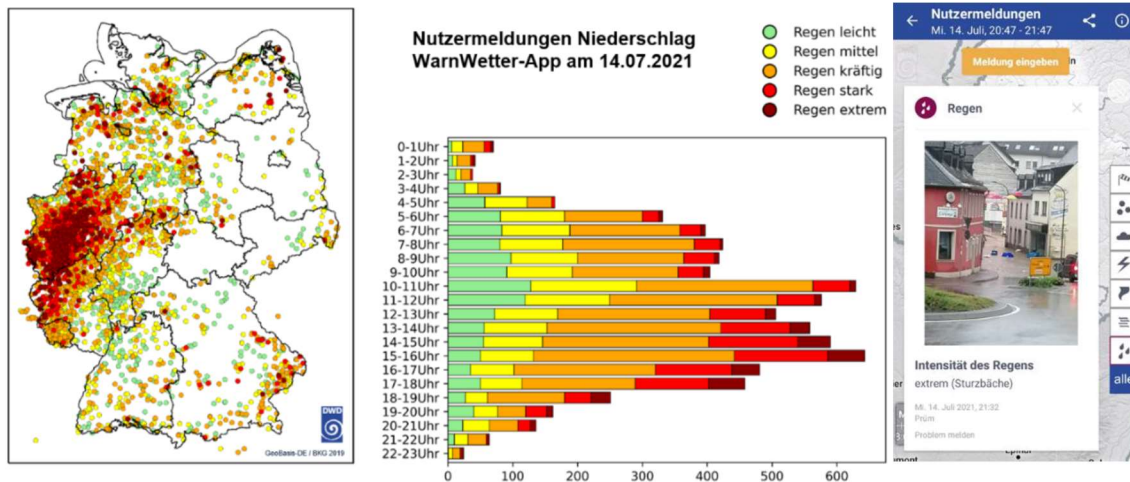
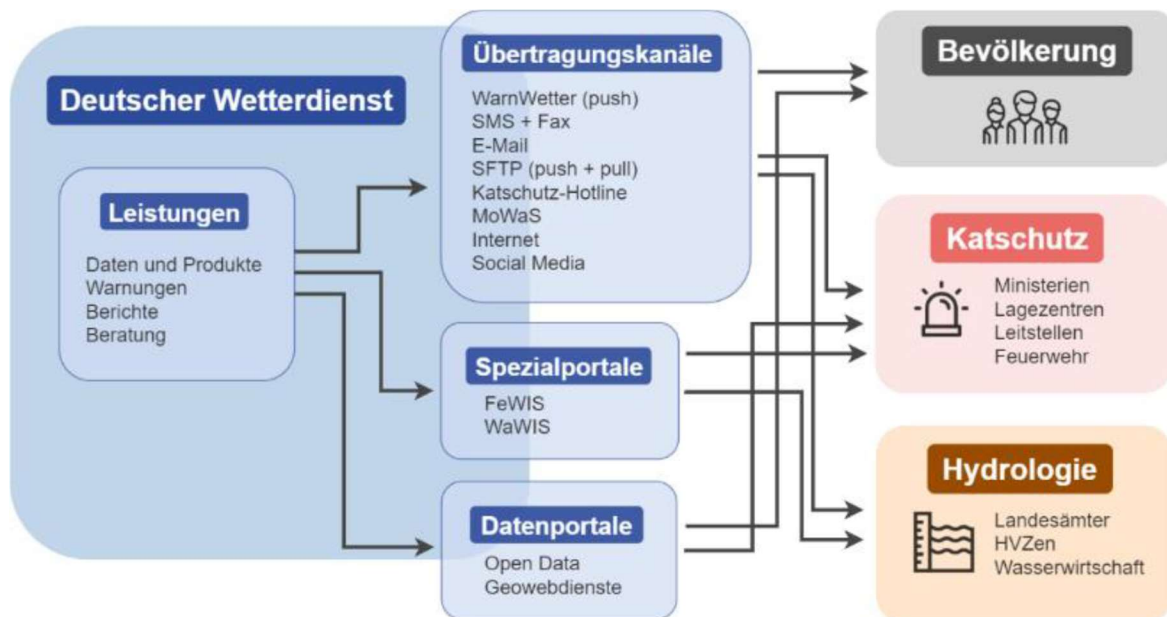


Abb. 8: Niederschlagsmeldungen von Nutzern der Warn-Wetter-App in Gesamtdeutschland am 14.07.2021 (Karte) und im zeitlichen Tagesverlauf, sowie exemplarische Nutzermeldung aus dem überfluteten Prüm.

Abgabewege für Warnungen und weitere Daten und Produkte

Der DWD stellt ein umfangreiches Portfolio an Daten, Produkten und Beratungsleistungen zur Verfügung, die über unterschiedliche Verteilwege vom DWD aktiv versendet werden oder auch von den Nutzern jederzeit individuell angefordert bzw. abgerufen werden können. Die wesentlichen Komponenten dieser Informationskette von der Erzeugung und Bereitstellung der Leistungen bis hin zu den insbesondere in diesem Fall betroffenen Nutzern der Information, sind in Abb. 9 dargestellt.

Abb. 9: Informationskette von der Erzeugung der Warnungen und weiterer Daten und Produkte bis hin



zu den Nutzern der Information

Fazit und Ausblick

Der Deutsche Wetterdienst hat den gesetzlichen Auftrag (§4 DWD-Gesetz) zur „Herausgabe amtlicher Warnungen über Wettererscheinungen, a) die zu einer Gefahr für die öffentliche Sicherheit und Ordnung führen können oder b) die in Bezug zu drohenden Wetter- und Witterungsereignissen mit hohem Schadenspotenzial stehen“. Diesem Auftrag ist der DWD vollumfänglich nachgekommen, was u.a. auch von vielen direkt betroffenen Akteuren aus dem Katastrophenschutzbereich bestätigt wurde. Der DWD hat die meteorologischen Ereignisse klar vorhergesagt und vielfältig kommuniziert. Des Weiteren war der DWD durchgehend und in der Fläche als Berater für Anfragen aus Medien und dem Katastrophenschutz präsent und aktiv.

Angesichts der dennoch großen Zahl von Opfern des Unwetters und seiner Begleiterscheinungen ist zu hinterfragen, welche Defizite in der Kommunikationskette dazu geführt haben könnten und wie diese Defizite möglicherweise zu beheben sind. Betrachtet man die beteiligten Akteure und deren Interaktionen (Abb. 10) werden mögliche Brüche in der Warnkette deutlich.

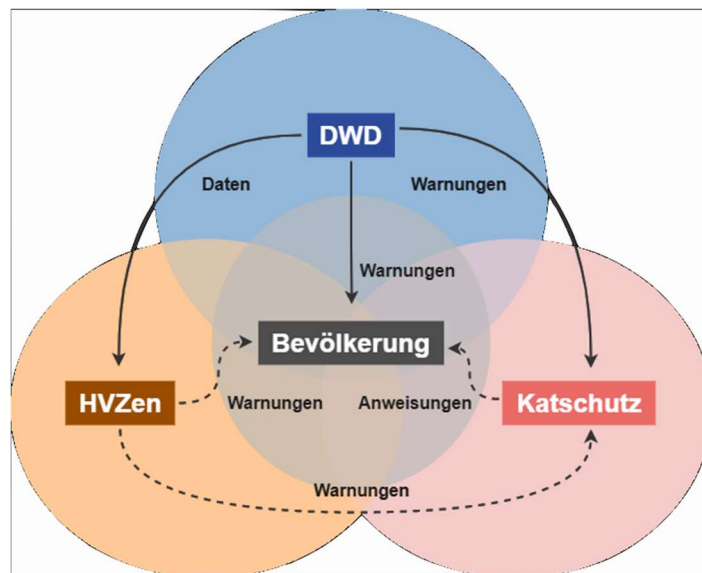


Abb. 10: Konzeptionelle Darstellung der Akteure und Interaktionen in Hochwassersituationen.

Warnungen des DWD vor den meteorologischen Gefahren erfolgten frühzeitig und wurden sowohl an die Bevölkerung als auch die Katastrophenschutzbehörden verteilt. Zusätzlich wurden meteorologische Vorhersagedaten an die Hochwasservorhersagezentralen (HVZen) abgegeben, zur dortigen Erstellung der Hochwasserwarnungen. In wie weit diese Warnungen den Katastrophenschutz und die Bevölkerung umfassend und zeitnah erreichen, kann nur von den HVZen beurteilt werden. Es scheint jedoch essentiell zu sein, dass die Bevölkerung nicht nur schnellst- und bestmöglich reine meteorologische Warnungen erhält, sondern – möglichst eng damit verbunden – auch Informationen über darauf aufbauende hydrologische Folgegefahren und entsprechende Handlungsanweisungen zum Schutz von Leben und Gütern zur Verfügung stehen.

5.2 Informationen des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie (BKG)

Das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) bedient mit seiner fundierten Expertise und einem breiten inhaltlichen Portfolio im Bereich Geoinformationen und Fernerkundungsdaten als zentraler Dienstleister die Bundesverwaltung.

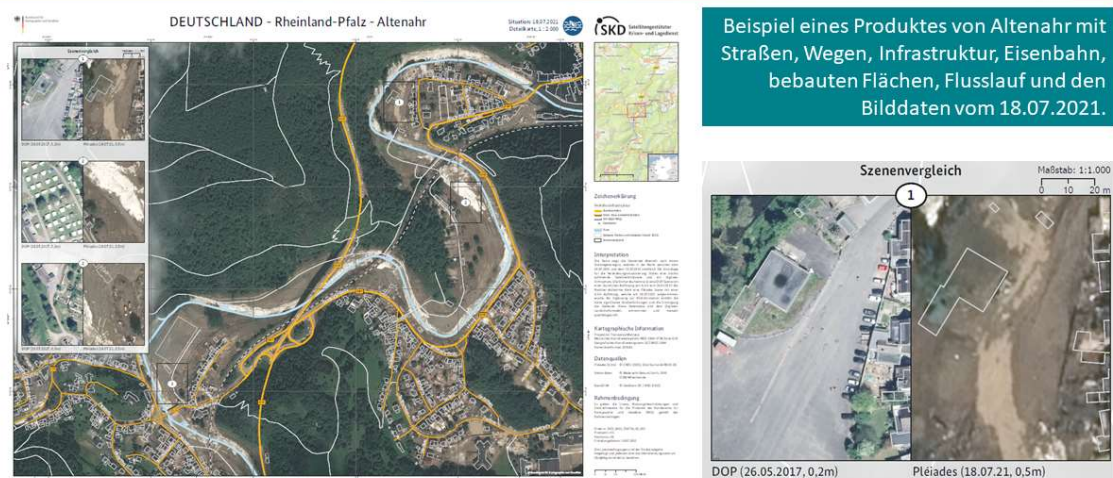
Auch im Rahmen der Hochwasserlage 2021 konnte das BKG seine Fähigkeit zur schnellen Reaktion im Rahmen der unterstützenden Leistungen des BKG für den Stab Hochwasserhilfe Bund (StabHWB) erfolgreich unter Beweis stellen.

Mit Beginn der Ereignisse recherchierten die Mitarbeitenden des Satellitengestützten Krisen- und Lagedienst (SKD) des BKG proaktiv für vier stark betroffene Gebiete nach Satellitenbilddaten. Daher konnte auf die ersten Unterstützungsanfragen am 15. Juli binnen Stundenfrist reagiert werden.

Anforderungen durch Bundeseinrichtungen zu vorhandenen Datenbeständen – z. B. Geoinformationen und aktuelle Satellitenbilder des BKG – konnten direkt durch bestehende SKD-Services erfüllt werden.

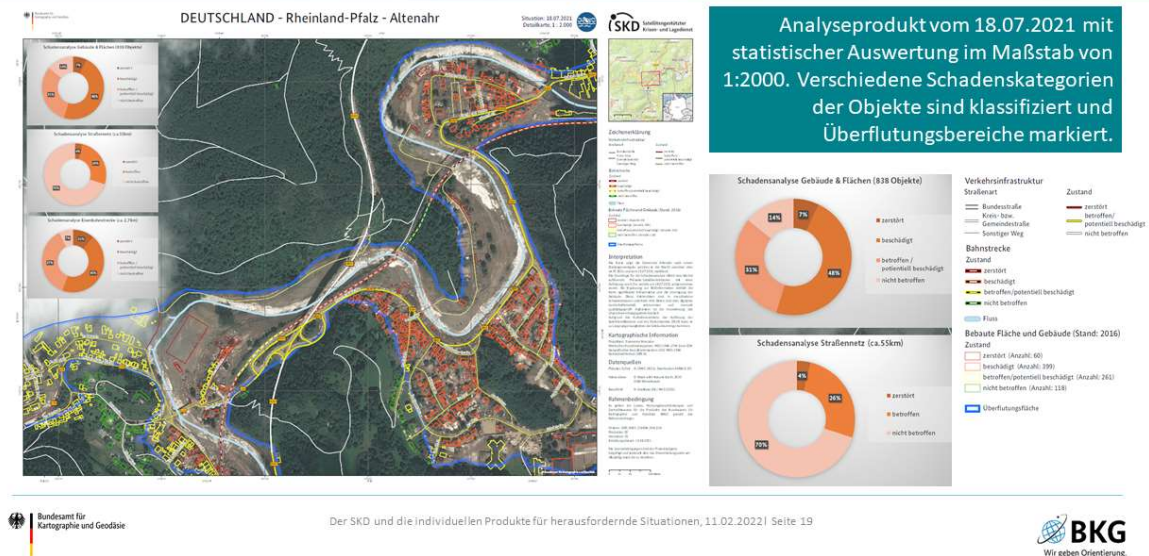
Am Sonntag, 18. Juli, gingen über das BMI Anfragen im SKD ein, die darauf abzielten, einen Überblick zu den Zerstörungsausmaßen zu erhalten. Im Fokus standen dabei kritische Infrastrukturen wie z. B. Energieversorgung. Hier konnten noch am selben Tag für 12 Regionen hochauflösende, aufbereitete Satellitendaten geliefert werden. In den darauffolgenden drei Tagen benannte das BMI acht weitere Schadensregionen, für die der SKD Satellitenbilder recherchierte und auslieferte. Um möglichst zeitnah neue Satellitenbilder bereitstellen zu können, wurden im Zeitraum vom 19. bis zum 26. Juli täglich neue Recherchen durchgeführt. Am 26. Juli stellte der SKD für 18 Schadensregionen auch detaillierte topographische Karten mit Informationen zu den einzelnen Gebäuden in einem größeren Maßstab zur Verfügung. Diese Produkte wurden benötigt, um im Nachgang der Ereignisse die Lage erneut direkt vor Ort zu beurteilen. Nachfolgend sind beispielhaft zwei Produkte mit entsprechenden Detailinformationen dargestellt.

Produkte aus Bilddaten und Geoinformationen des BKG ohne Analyse



Beispiel eines Produktes von Altenahr mit Straßen, Wegen, Infrastruktur, Eisenbahn, bebauten Flächen, Flusslauf und den Bilddaten vom 18.07.2021.

Vorher-Nachher-Vergleich mit Analyse kurz nach dem Event: Detailkarte Altenahr



6 Folgeaktivitäten der Bundesbehörden zur fachlich-wissenschaftlichen Auswertung des Ereignisses sowie zur Weiterentwicklung/Verbesserung der Informationsangebote und Dienste des Bundes

6.1 Stärkung des Bevölkerungsschutzes

Die durch die Erfahrungen aus der CORONA-Pandemie eingeleiteten Prozesse zur Stärkung des Bevölkerungsschutzes in Deutschland und der Neuausrichtung des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe haben durch die Flutkatastrophe 2021 eine neue Dringlichkeit gewonnen, denn die Flut hat auf eindringliche Weise Schwachstellen und Verbesserungsbedarf unter anderem im Bereich der ebenen- und akteursübergreifenden Zusammenarbeit, der Nutzung von unterschiedlichen Warnmitteln des Modulare Warnsystems und der Koordinierung der Kräfte aufgezeigt.

Um den vertikalen und horizontalen Informationsaustausch von Bund und Ländern zu verbessern und die Zusammenarbeit im Bevölkerungsschutz zu intensivieren, wird ein Gemeinsames Kompetenzzentrum Bevölkerungsschutz (GeKoB) beim Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) errichtet. Das GeKoB ist eine auf Dauer angelegte, strukturiert organisierte Kooperationsplattform und wird von Bund und Ländern als originäre Aufgabenträger für den Bevölkerungsschutz getragen. Weitere Akteure wie z.B. die Hilfsorganisationen und die kommunalen Spitzenverbände werden eingeladen, sich am GeKoB zu beteiligen. Im GeKoB werden sich Verbindungspersonen in einer arbeitstäglichen

Zusammenarbeit zu allen bevölkerungsschutzrelevanten Themen austauschen, Informationen einbringen und diese in einem Gemeinsamen Lagebild Bevölkerungsschutz zusammenführen. In Krisen kann das GeKoB die zuständigen politisch-strategischen und administrativen Krisenstäbe in Bund und Ländern u.a. mit umfassenden Lagedarstellungen und -bewertungen, aussagekräftigen Prognosen oder auch Fachexpertise vor Ort unterstützen. Es ist geplant, dass das GeKoB im Jahr 2022 die Arbeit aufnehmen wird.

Die Flutkatastrophe hat deutlich gemacht, wie wichtig eine rechtzeitige und effektive Warnung der Bevölkerung in Gefahrensituationen ist. Um die Bevölkerung im Ereignisfall mit Warnungen auf möglichst vielen Wegen erreichen zu können, sollen dabei sowohl digitale als auch analoge Warnmittel eingesetzt werden können. Die Bundesregierung verfolgt daher das Ziel, den Warn-Mix in Deutschland auszubauen.

Unmittelbar nach der Flutkatastrophe hat der Bund mit dem „Aufbauhilfegesetz 2021“ auch die Gesetzesgrundlage für die Einführung von Warnbenachrichtigungen auf Mobiltelefone mittels Cell Broadcast geschaffen. Es wurde ein neuer § 164a in das Telekommunikationsgesetz eingefügt. Die Regelung verpflichtet die Mobilfunknetzbetreiber, technische Einrichtungen vorzuhalten und organisatorische Vorkehrungen zu treffen, um jederzeit unverzügliche Warnungen aussenden zu können. Ziel dieser Vorgaben ist es, die Warninfrastruktur in Deutschland um ein reichweitenstarkes Warnmittel zu ergänzen. Mit einer Warnung über Cell Broadcast können alle Mobilfunkteilnehmenden, die mit ihrem Endgerät in einer Mobilfunkzelle eingebucht sind, erreicht werden.

Der Bund fördert zudem den Ausbau der Sireneninfrastruktur im Bundesgebiet mit einem Förderprogramm in Höhe von 88 Millionen Euro aus dem Konjunkturpaket. Der Ausbau des Sirenenetzes in den Ländern soll dabei helfen, eine wichtige Lücke im Warnmittelmix zu schließen, da Sirenen eine wichtige Ergänzung des Warnmittel-Mixes mit einer hohen Akzeptanz in der Bevölkerung darstellen und durch ihren unverwechselbaren Heulton einen sog. „Weckeffekt“ erzielen können.

Das Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) erstellt zudem gemeinsam mit den Ländern ein Warnmittelkataster, zur Erfassung der im Bundesgebiet genutzten Warnmittel. In Ergänzung dazu soll die Notfall-Informations- und Nachrichten-App (NINA), die von über zwölf Millionen Bürgerinnen und Bürgern genutzt wird, zur Bundeswarn-App ausgebaut werden.

Weitere Anpassungen zur Stärkung des Bevölkerungsschutzes betreffen unter anderem den Ausbau strategischer Reserven von Mineralöl, Gas und Ernährung, die Bevorratung von Notstromaggregaten bzw. Netzersatzanlagen und breit angelegte Informationskampagnen zu den Fokusthemen Extremwetter, Bevorratung, Stromausfall und Dokumentensicherung/Notgepäck in zielgruppengerechten Formaten.

Um die Resilienz gegenüber unterschiedlichen Gefahren zu steigern, erarbeitet die Bundesebene derzeit die Deutsche Strategie zur Stärkung der Resilienz gegenüber Katastrophen (Resilienzstrategie) als Teil des deutschen Umsetzungsprozesses des Sendai-Rahmenwerkes der Vereinten Nationen. Im Rahmen ihrer Umsetzung soll künftig die Katastrophenvorsorge und das Katastrophenrisikomanagement auch mit Blick auf Extremwetterereignisse und andere Katastrophenarten verbessert werden.

6.2 Forschungstätigkeiten und Anpassung laufender Forschungsarbeiten

Angesichts des Flutereignisses im Sommer 2021 und seiner verheerenden Folgen hat das BMBF im Bereich der Sicherheitsforschung eine Sofortmaßnahme in Form eines wissenschaftlichen Verbundvorhabens initiiert. Im Rahmen des Forschungsprojektes „Governance und Kommunikation im Krisenfall des Hochwasserereignisses im Juli 2021“ (HoWas2021) werden das Handeln der Akteure des Bevölkerungsschutzes und die stattgefundenene Krisenkommunikation sowohl auf behördlicher Ebene, als auch mit der betroffenen Bevölkerung wissenschaftlich analysiert. Im Fokus stehen die Gefahrenvorhersagen sowie die Handlungsketten von Warnung, Alarmierung, Kriseneinsatz und akuter Schadensbewältigung. Ziel ist das „Lernen aus der Katastrophe“ im Sinne einer verbesserten Prävention bei zukünftigen Ereignissen. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse werden Handlungsempfehlungen für eine optimierte Krisenkommunikation und ein verbessertes Krisenmanagement erarbeitet. Das Vorhaben will insbesondere dazu beitragen, verteilt vorhandenes Wissen zu identifizieren, zusammenzuführen und bei zukünftigen Krisen für eine übergreifende Lagebewältigung zugänglich zu machen. Weitere Ziele sind die generelle Sensibilisierung für Katastrophenlagen und eine Beförderung des allgemeinen Risikobewusstseins bei Verantwortungsträgern und Bevölkerung. Das BMBF fördert das Projekt seit Dezember 2021 mit rund 1,5 Millionen Euro. Die Laufzeit beträgt 18 Monate.

Extreme Starkregen- und Sturzflutereignisse betreffen viele gesellschaftspolitisch relevante Bereiche, so auch Einrichtungen und Belange des Bundes. Ganz offensichtlich ist z.B. die Betroffenheit des Bundesverkehrssystems aufgrund von Unterbrechungen von Verkehrsströmen und Beschädigungen der Infrastruktur, die im Rahmen der aktuellen Forschungsphase (2020-2025) des BMDV-Expertennetzwerkes untersucht wird. Der Wirkungszusammenhang "Klimawandel, Starkregen, Sturzfluten, Verkehr/Verkehrsinfrastruktur" bildet in der laufenden Forschungsphase des BMDV-Expertennetzwerkes einen Arbeitsschwerpunkt. Ziel ist es hier, eine integrierte Klimawirkungsanalyse durchzuführen, die sowohl das hydrologisch/hydraulische Phänomen als auch die verkehrliche Wirkung von Starkregen und Sturzfluten erfasst, um ggf. aktuelle und zukünftige Prioritätsgebiete für eine Anpassung der Verkehrsinfrastruktur bzw. des Verkehrssystems an den Klimawandel umreißen zu können. Die ursprünglich als "BLUESPOT-Analyse" (Larsen und Knud, 2010) angelegten gemeinsamen Forschungsarbeiten von Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG, FF), Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) und Deutschem Zentrum für Schienenverkehrsforschung (DZSF) werden nun hinsichtlich Zeitplan und Inhalt modifiziert, um die aktuellen Entwicklungen in anderen Bundesbehörden (z.B. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie) und bei den Bundesländern (LAWA AH, KG Starkregen) aufzugreifen und unterstützen zu können.

Auch wenn das betrachtete Niederschlagsereignis als Einzelereignis nicht direkt dem Klimawandel zugerechnet werden kann, so steigt die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten immer extremer Witterungsereignisse mit der globalen Erderhitzung an. Die Flutkatastrophe 2021 führt vor Augen, wie wichtig eine sektorübergreifende und strategische Anpassung an die Folgen des Klimawandels ist.

Im Juni 2021 stellte das Bundesumweltministerium den Entwurf der Nationalen Wasserstrategie vor. Die Nationale Wasserstrategie betrachtet den Wasserhaushalt umfassend, berücksichtigt aber auch die Extreme Hochwasser/Starkregen und Trockenheit. Dieser übergreifende Ansatz erlaubt es insbesondere auch Maßnahmen zu stärken, die sowohl der Vorsorge vor Trockenheit als auch dem Umgang mit Starkregen dienen. Neben der Verankerung der Starkregengefahren- und Starkregenisikokarten in der Nationalen Wasserstrategie sind die vielfältigen Möglichkeiten des Wasserrückhalts in der Fläche, die Verbesserung des Bodenschutzes und der Grundwasserneubildung Beispiele für Maßnahmen, die beide Extreme in den Blick nehmen. Ebenso sind der Schutz des Waldes und die Weiterentwicklung des Leitbildes wassersensible Stadt sowie die verschiedenen Aktionen für ein besseres Wasserbewusstsein wichtige Maßnahmen, die auch für einen verbesserten Umgang mit Starkregenereignissen sorgen werden. Das Umweltbundesamt unterstützt das BMUV fortlaufend bei der Weiterentwicklung der Nationalen Wasserstrategie zu einer ressortabgestimmten Strategie und bringt fachliche Expertise im Thema Starkregen, insbesondere hinsichtlich der erforderlichen Anpassungs- und Vorsorgemaßnahmen ein.

Neu initiierte Forschungsprojekte im Rahmen des Ressortforschungsplans des Bundesumweltministeriums befassen sich unter anderem mit der verbesserten Nutzung von Anpassungsdaten und -wissen für eine vorsorgende Planung in der Praxis von Entscheidungsträgern, dem Aufbau und der Operationalisierung von Datenbankkonzepten zur systematischen Erfassung anpassungsrelevanter Informationen (Klimaschadenskataster, Kataster zur Erfassung öffentlicher Klimaanpassungs-Ausgaben sowie Informationen zu Anpassung auf subnationaler Ebene und in Sektorpolitiken) und den Optionen zur verbesserten Umsetzung der Schwammstadt.

6.3 Erstellung von Starkregenhinweiskarten

Das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) arbeitet derzeit an der Erstellung flächendeckender Hinweiskarten für Starkregengefahren. Diese Hinweiskarten erlauben die Identifikation besonders gefährdeter Gebiete bei auftretenden Starkregenereignissen. Auf Basis hochauflösender digitaler Oberflächenmodelle in Kombination mit weiteren Informationen (u.a. Hausumringe, Infrastrukturdaten) werden Starkregenereignisse simuliert und somit neuralgische Gebiete mit hohem Schadensrisiko erkannt.

Die Erstellung der Hinweiskarten erfordert im Vorfeld zahlreiche Vor-Ort-Begehungen um das Geländemodell zu validieren sowie relativ aufwendige Berechnungen im Zuge der Simulation aufgrund der großen Datenmengen. Nach der Veröffentlichung der Hinweiskarten für Starkregengefahren Nordrhein-Westfalen im Oktober 2021 haben nach Gesprächen mit der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) sieben weitere Bundesländer (BE, BB, MV, NI, SN, ST, TH) konkretes Interesse für die Erstellung weiterer Hinweiskarten gezeigt. Ein Auftakttreffen mit den genannten Ländern fand Anfang Dezember 2021 statt. Die Projektergebnisse und die Veröffentlichung von Hinweiskarten für die Gebiete der o.g. Bundesländer werden im Jahr 2023 erwartet.

Für die Analysen des Bundes in Bezug auf die Verkehrsinfrastruktur, aber auch die generelle Konsolidierung und Standardisierung von Vorgehensweisen im Kontext Starkregen/Sturzfluten ist es wichtig, dass die jeweils verwendeten Daten- und Methoden a) bei möglichst vielen

regionalen Akteuren bekannt und akzeptiert sind und b) bundesweit vergleichbar sind. Die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) wird das BKG-Starkregenprojekt fachlich mitbegleiten und unterstützt die Aktivitäten im Hinblick auf einen systematischen Vergleich der bislang eingesetzten Methoden anhand ausgewählter Fallstudiengebiete. Eine vergleichende Bewertung bestehender Kartengrundlagen (Länder, BKG, ggf. Kommunen und weitere) inklusive der eingesetzten Methoden (Berechnungsverfahren, Auflösungen, Zeitverläufe, Rauigkeiten, Bodenparameter etc.) und Auswertungsprodukte (Fließwegkarten, Wassertiefen, Strömungsgeschwindigkeiten), sowie im Bedarfsfall eine Re-Analyse realer Ereignisse wird ebenfalls zu einer bundesweiten Standardisierung der Sturzflut- und Starkregenkartierung beitragen, um diese auch für bundesweite Fragestellungen, z.B. mit Bezug zur Verkehrsinfrastruktur, nutzbar zu machen.

Das Umweltbundesamt (UBA) hat in den vergangenen Jahren wiederholt auf die Bedeutung von Starkregengefahren- und Starkregenrisikokarten hingewiesen. Diese müssen so gestaltet sein, dass sie für den wasserwirtschaftlichen Vollzug in Kommunen geeignet sind. Um die Initiative des BKG auch für die kommunale Ebene nutzbar zu machen, sind die Standards für Starkregenhinweiskarten auf ihre Eignung für die Erstellung von Starkregengefahren- und ggf. Starkregenrisikokarten zu überprüfen, wobei Defizite aufgezeigt sowie Lösungsvorschläge entwickelt werden müssen. Diese Fragen will das UBA über ein Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Ressortforschungsplan 2023 adressieren. Dieser Ressortforschungsplan 2023 befindet sich jedoch derzeit noch in der Aufstellungsphase.

6.4 Beteiligung an Bund-Länder-Arbeitsgruppen und sonstige Zusammenarbeit mit den Ländern

Im Nachgang des Ereignisses der Flutkatastrophe im Juli 2021 im Ahrgebiet steht die BfG im Kontext der Ereignisanalyse des zuständigen Landesamts für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU-RP) mit diesem im fachlichen Austausch. Der Beitrag der BfG sind dabei Rückrechnungen der Hochwasserwelle an der Einmündung der Ahr in den Rhein mit Hilfe hydrodynamischer Simulation mit dem hydraulischen Modells des Rheines der BfG unter Verwendung der oberstrom und unterstrom der Einmündung gemessenen Wasserstände an den Rheinpegeln Andernach, Oberwinter und Bonn. Die bis heute (März 2022) andauernden Untersuchungen des LfU-RP dienen dem Ziel, ein möglichst in sich geschlossenes Bild des Verlaufs des Hochwasserereignisses an allen Orten zu rekonstruieren.

Die Vernetzung zwischen Bundes- und Länderaktivitäten in den Bereichen Klimaanpassung, Hydrologie und Wasserhaushalt wird durch die Mitarbeit der Bundesoberbehörden in verschiedenen Arbeitsgruppen der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) sichergestellt. So bringen sich die Bundesoberbehörden auch in Fachgremien ein, die nach den Hochwasserereignissen 2021 gegründet bzw. (re)aktiviert wurden.

Literatur

- BECKER P., BECKER A., DALELANE C., DEUTSCHLÄNDER T., JUNGHÄNEL T., UND WALTER A., 2016: DIE ENTWICKLUNG VON STARKNIEDERSCHLÄGEN IN DEUTSCHLAND. PLÄDOYER FÜR EINE DIFFERENZIERTE BETRACHTUNG.
https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/_functions/aktuellemeldungen/160713_Entwicklung_Starkniederschlaege_differenziert.html
- BUNDESMINISTERIUM DES INNERN UND FÜR HEIMAT, BUNDESMINISTERIUM DER FINANZEN, 2022:
 BERICHT ZUR HOCHWASSERKATASTROPHE 2021: KATASTROPHENHILFE, WIEDERAUFBAU UND EVALUIERUNGSPROZESSE;
<https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/pressemittelungen/DE/2022/03/bericht-hochwasser-2021.html>
- 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. NATURE GEOSCIENCE, 7(9), 627-637. <https://doi.org/10.1038/ngeo2234>
- KASPAR F, FRIEDRICH K, IMBERY F, 2020: 2019 GLOBAL ZWEITWÄRMSTES JAHR: TEMPERATUR-ENTWICKLUNG IN DEUTSCHLAND IM GLOBALEN KONTEXT. BERICHT DES DEUTSCHEN WETTERDIENSTES.
https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20200128_vergleich_de_global.html
- KREIENKAMP, F., PHILIP, S.Y., TRADOWSKI, J.S., KEW, S.F., LORENZ, P., ARRIGHI, J., BELLEFLAMME, A., BETTMANN, T., CALUWAERTS, S., CHAN, S.C., CIAVARELLA, A., CRUZ, L.D., VRIES, H.D., DEMUTH, N., FERRONE, A., FISCHER, E.M., FOWLER, H.J., GOERGEN, K., HEINRICH, D., HENRICH, Y., LENDERINK, G., KASPAR, F., NILSON, E., OTTO, F.E.L., RAGONE, F., SENEVIRATNE, S.I., SINGH, R.K., SKÅLEVÅG, A., TERMONIA, P., THALHEIMER, L., AALST, M.V., BERGH, J.V.D., VYVER, H.V.D., VANNITSEM, S., OLDENBORGH, G.J.V., SCHAEYBROECK, B.V., VAUTARD, R., VONK, D., WANDERS, N., 2021. RAPID ATTRIBUTION OF HEAVY RAINFALL EVENTS LEADING TO THE SEVERE FLOODING IN WESTERN EUROPE DURING JULY 2021. WWAI RAPID ASSESSMENT. <https://www.worldweatherattribution.org/heavy-rainfall-which-led-to-severe-flooding-in-western-europe-made-more-likely-by-climate-change/>
- LARSEN, M., KNUD, A., 2010. THE BLUE SPOT MODEL. DEVELOPMENT OF A SCREENING METHOD TO ASSESS FLOOD RISK ON NATIONAL ROADS AND HIGHWAY SYSTEMS. SWAMP REPORT 3, DANISH ROAD INSTITUTE. 42 S.
- LANUV NW - LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NRW
<https://www.lanuv.nrw.de/umwelt/wasser/niederschlag/niederschlag-online>
- LFU RP - LANDESAMT FÜR UMWELT RHEINLAND-PFALZ (2022): HOCHWASSER IM JULI 201. BERICHT (ENTWURF) DES LFU MAINZ.
- MADAKUMBURA G. D., THACKERAY C. W., NORRIS J., GOLDENSON N. AND HALL, A., 2021: ANTHROPOGENIC INFLUENCE ON EXTREME PRECIPITATION OVER GLOBAL LAND AREAS SEEN IN MULTIPLE OBSERVATIONAL DATASETS. NAT COMMUN 12, 3944,
<https://doi.org/10.1038/s41467-021-24262-x>

- RAUTHE M., BRENDDEL C., HELMS., LOHRENGEL A.-F., MEINE L., NILSON E., NORPOTH M., RASQUIN C., RUDOLPH E., SCHADE N. H., DEUTSCHLÄNDER T., FORBRIGER M., FLEISCHER C., GANSKE A., HERRMANN C., KIRSTEN J., MÖLLER J., SEIFFERT R., 2020: KLIMAWIRKUNGSANALYSE DES BUNDESVERKEHRSSYSTEMS IM KONTEXT HOCHWASSER: SCHLUSSBERICHT DES SCHWERPUNKTTHEMAS HOCHWASSERGEFAHREN (SP-103) IM THEMENFELD 1 DES BMVI-EXPERTENNETZWERKS.
<https://doi.org/10.5675/ExpNRM2020.2020.04>
- STENDEL, M., FRANCIS, J., WHITE, R., WILLIAMS, P. D., & WOOLLINGS, T., 2021: THE JET STREAM AND CLIMATE CHANGE. IN CLIMATE CHANGE (PP. 327-357). ELSEVIER.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821575-3.00015-3>
- VAN OLDENBORGH G.J., VAN DER WIEL K., KEW S. PHILIP S., OTTO F., VAUTARD R., ANDREW KING A., LOTT F., ARRIGHI J., SINGH R., VAN AALST M., 2021: PATHWAYS AND PITFALLS IN EXTREME EVENT ATTRIBUTION. CLIMATIC CHANGE, 166, 13,
<https://doi.org/10.1007/s10584-021-03071-7>
- WOOLLINGS T., BARRIOPEDRO D., METHVEN J., SON S. W., MARTIUS O., HARVEY B., SILLMANN J., LUPO A. R., SENEVIRATNE S., 2018: BLOCKING AND ITS RESPONSE TO CLIMATE CHANGE. CURRENT CLIMATE CHANGE REPORTS, 4(3), 287-300.
<https://doi.org/10.1007/s40641-018-0108-z>
- WUPPERVERBAND.
<https://www.wupperverband.de/meldung/pressemitteilungen/2021/07/extremereignis-traf-das-gesamte-wuppergebiet> ,
<https://www.wupperverband.de/meldung/2021/07/rueckhalt-in-talsperren-hat-schlimmeres-verhindert>