



RheinlandPfalz

LANDESAMT FÜR UMWELT

BERICHT

Hochwasser im Juli 2021



IMPRESSUM

Herausgeber: Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz
Kaiser-Friedrich-Straße 7
55116 Mainz

Bearbeitung: Sven Berkler
Dr.-Ing. Thomas Bettmann
Mario Böhm (HYDRON GmbH)
Norbert Demuth
Nicole Gerlach
Antonia Hengst
Yvonne Henrichs
Tobias Heppelmann
Christian Iber
Dr. Margret Johst
Heinz Lehmann
Sebastian Stickel
Dr. Sven van der Heijden
Dr.-Ing. Stefan Wallisch (BGS Wasserwirtschaft GmbH)

Titelbild: Pegel Müsch/Ahr nach dem Hochwasser im Juli 2021, Foto: SGD Nord

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|--|-----------|
| Vorwort | 8 |
| Zusammenfassung | 9 |
| 1 Wettergeschehen | 12 |
| 1.1 Witterung im Frühsommer 2021 | 12 |
| 1.2 Wettergeschehen Anfang Juli 2021 | 12 |
| 1.3 Niederschlag am 14.07.2021 in der Eifel | 13 |
| 2 Hochwasserverlauf | 19 |
| 2.1 Rhein-Hochwasser vom 09.07. bis 29.07.2021 | 19 |
| 2.2 Mosel-Hochwasser vom 14.07. bis 18.07.2021 | 20 |
| 2.3 Hochwasserverlauf im Ahr-Einzugsgebiet am 14./15.07.2021 | 22 |
| 2.4 Hochwasserverlauf in der Westeifel am 14./15.07.2021 | 24 |
| 2.5 Ausfälle und Zerstörung von Pegelstationen | 26 |
| 2.6 Höchststände und Jährlichkeiten | 27 |
| 3 Hochwasservorhersagen | 32 |
| 3.1 Vorhersagen für den Rhein | 33 |
| 3.2 Vorhersagen für die Mosel und die Sauer | 33 |
| 3.3 Vorhersagen für die Ahr | 35 |
| 3.4 Vorhersagen für die Prüm und die Kyll | 40 |
| 4 Hochwassermeldungen | 41 |
| 4.1 Einsatzzeiten und Einsatzumfang | 41 |
| 4.2 Hochwassermeldungen | 41 |
| 4.3 Chronologie der Hochwassermeldungen für die Ahr | 43 |
| 5 Analysen zum Ahr-Hochwasser | 45 |
| 5.1 Niederschlagsprodukte | 45 |
| 5.2 Aussagekraft und Verlässlichkeit von EFAS-Vorhersagen | 47 |
| 5.3 Einsatz von Fernerkundung (Copernicus EMS) | 51 |
| 5.4 Ermittlung der Anschlagslinie des Hochwassers | 52 |
| 5.5 Hydrologische Nachrechnung mit dem LARSIM-Wasserhaushaltsmodell | 53 |
| 5.6 Hydraulische Nachberechnung | 56 |
| Literatur | 73 |

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

| | | |
|---------------|--|----|
| Abbildung 1: | Standardisierter Niederschlagsindex SPI für den Zeitraum 14.06. 07:00 Uhr bis 14.07. 07:00 Uhr MEZ in Rheinland-Pfalz (Datenbasis: REGNIE, DWD: Referenzzeitraum 1951 bis 2020)..... | 13 |
| Abbildung 2: | Räumliche Verteilung der Niederschlagssummen [mm] vom 14.07. 07:00 Uhr bis 15.07. 07:00 Uhr MEZ (Datenbasis: InterMet – interpolierte Stationsdaten, LfU). | 14 |
| Abbildung 3: | Räumliche Verteilung der Niederschlagssummen [mm] vom 14.07. 07:00 Uhr bis 15.07. 07:00 Uhr MEZ (Datenbasis: InterMet – interpolierte Stationsdaten, LfU) und rot umrandete Warnregionen in der Eifel. | 15 |
| Abbildung 4: | Stündliche Niederschlagssummen [mm] von 14.07. 07:00 Uhr bis 14.07. 23:00 Uhr MEZ an der DWD-Station Lissendorf (Datenbasis: Messdaten DWD)..... | 17 |
| Abbildung 5: | Gemessene Niederschlagssumme [mm] vom 14.07. 07:00 Uhr bis 14.07. 23:00 Uhr MEZ an der DWD-Station Lissendorf (Datenbasis: Messdaten DWD)..... | 18 |
| Abbildung 6: | Zeitlicher Verlauf der Hochwasserwellen und des Meldedienstes am Rhein. | 20 |
| Abbildung 7: | Zeitlicher Verlauf der Hochwasserwellen und des Meldedienstes an der Mosel. | 21 |
| Abbildung 8: | Niederschlag an der Messstation Blankenheim und Abflussreaktion an vier Pegeln im Ahr-Einzugsgebiet; für Müsch, Altenahr und Bad Bodendorf jeweils Darstellung von Hauptgeber (W.15) und redundantem Messsensor (W_rdu.15). | 23 |
| Abbildung 9: | Niederschlag an der Messstation Lissendorf und Abflussreaktion an drei Pegeln an der Kyll. | 25 |
| Abbildung 10: | Niederschlag an der Messstation Prüm-Watzerath und Abflussreaktion an vier Pegeln im Prüm-Einzugsgebiet..... | 25 |
| Abbildung 11: | Wasserstandsvorhersagen am 14.07. mit VZP 07:00 Uhr am Pegel Rosport (lila: mit ICON-D2 VZP 04:00, rot: mit ICON-D2 VZP 07:00, orange: geänderte Modelleinstellung, schwarz: AROME VZP 01:00), alle Zeitangaben in MEZ..... | 34 |
| Abbildung 12: | Wasserstandsvorhersagen am 14.07. mit VZP 07:00 Uhr und Darstellung des Vorhersageensembles am Pegel Rosport (lila: mit ICON-D2 VZP 04:00, rot: mit ICON-D2 VZP 07:00, orange: geänderte Modelleinstellung, schwarz: AROME VZP 01:00, grün: Ensemble VZP 07:00); alle Zeitangaben in MEZ | 35 |
| Abbildung 13: | Vorhergesagte Höchststände für die Pegel Altenahr, Kordel und Prümzurlay für Vorhersagezeitpunkte vor dem gemessenen Höchststand („gemessener“ Höchststand für Altenahr rekonstruiert). | 36 |
| Abbildung 14: | Spanne der Wasserstandsvorhersagen für den Pegel Altenahr zum Vorhersagezeitpunkt 14.07. 14:00 MESZ unter Verwendung von 20 Ensemble-Wettervorhersagen (ICON-D2-EPS); 20 Einzelvorhersagen (oben) und Quantildarstellung (unten). | 36 |
| Abbildung 15: | Wettervorhersagen des DWD (ICON-D2) zu unterschiedlichen Vorhersagezeitpunkten (VZP) mit 6h-Niederschlagssummen für den 14.07. 14:00 bis 20:00 Uhr (alle Zeiten in MESZ); rote Umrandung: Lage des Ahr-Einzugsgebiets. | 38 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 16: Spannweiten der vorhergesagten 12h-Niederschlagssummen für den 14.07. 10:00 bis 22:00 Uhr MEZ (Gebietsmittel) für das Ahr-Einzugsgebiet in den 20 Ensemble-Niederschlagsvorhersagen des DWD (ICON-D2-EPS) zu unterschiedlichen Vorhersagezeitpunkten; Vergleich zur ICON-D2-Vorhersage und zu gemessenen Werten (InterMet); (Boxplots: Minimum, 25%-Perzentil, Median, 75%-Perzentil, Maximum). | 38 |
| Abbildung 17: Wettervorhersagen des DWD (ICON-D2) am 14.07. VZP 14:00 Uhr (links) und VZP 17:00 Uhr (rechts) mit 6h-Niederschlagssummen für den 14.07. 17:00 bis 23:00 Uhr (alle Zeiten in MESZ); rote Umrandung: Lage des Ahr-Einzugsgebiets. | 39 |
| Abbildung 18: Darstellung der Wasserstands-Messwerte und -Vorhersagen auf www.hochwasser-rlp.de ; Vorhersagezeitpunkt 17:00 Uhr MESZ; Veröffentlichungszeitpunkt 18:25 MESZ. | 40 |
| Abbildung 19: Räumliche Verteilung der Niederschlagssummen [mm] vom 14.07. 07:00 bis 14.07. 21:00 MEZ im Ahr-Einzugsgebiet auf Basis verschiedener Niederschlagsprodukte (InterMet-LfU-RLP online, weitere dargestellte Produkte nachprozessiert). | 47 |
| Abbildung 20: EFAS-Flash-Flood-Notification vom 13.07. 11:25 MESZ für den die Ahr umfassenden Bereich..... | 48 |
| Abbildung 21: Flash-Flood-Gefährdung laut EFAS am 13.07. mit VZP 12:00 UTC. (Quelle: https://www.efas.eu/)..... | 49 |
| Abbildung 22: Flash-Flood-Gefährdung laut EFAS am 14.07. mit 12:00 UTC. (Quelle: https://www.efas.eu/)..... | 49 |
| Abbildung 23: Spannweite der Jährlichkeiten (= Return Period) vorhergesagter akkumulierter Abflüsse am EFAS-Vorhersagepunkt (sog. Flash Flood ERIC Reporting Point) im Bereich der Ahr-Mündung in den Rhein (links: 13.07. VZP 12:00 UTC, rechts: 14.07. VZP 00:00) (Quelle: https://www.efas.eu/). | 50 |
| Abbildung 24: Schadenskartierung aus Copernicus EMS im Bereich Kreuzberg – Altenburg – Altenahr. Quelle: Copernicus Emergency Management Service (© 2021 European Union), EMSR517, verändert: https://emergency.copernicus.eu/mapping/system/files/components/EMSR517_AOI1_5_GRA_MONIT01_r1_RTP04_v3.pdf | 51 |
| Abbildung 25: Anschlagslinie des LfU RP (rot) mit Luftbildern der Sonderbefliegung des LVerMGeo RP im Bereich Altenahr (Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung)..... | 53 |
| Abbildung 26: Gemessene (Daten 14.07. Uhr 19:30 – 22:00 Uhr unplausibel) und simulierte Abflussganglinie am Pegel Müsch | 55 |
| Abbildung 27: Gemessene und simulierte Abflussganglinie am Pegel Altenahr..... | 55 |
| Abbildung 28: Gemessene und simulierte Abflussganglinie am Pegel Bad Bodendorf | 56 |
| Abbildung 29: Ausschnitt aus dem 3D-Flussschlauch der Ahr im Bereich des Pegelmodells Altenahr mit eingearbeiteten Brückenwiderlagern und -pfeilern (Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung)..... | 57 |
| Abbildung 30: Materialbelegung im Pegelmodell Bad Bodendorf (Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung)..... | 58 |
| Abbildung 31: Ausschnitt aus dem Pegelmodell Altenahr, Nachbildung der Brücken als vollständig verlegt (Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung)..... | 58 |
| Abbildung 32: Umgriff Pegelmodell Bad Bodendorf mit Standort Pegel Bad Bodendorf (Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung). | 59 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 33: Kontrollpunkte im Bereich des Pegels Bad Bodendorf (Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung) | 60 |
| Abbildung 34: Rekonstruierte (Anschlagslinie) und berechnete ($Q = 753 \text{ m}^3/\text{s}$) Überschwemmungsflächen im Bereich des Pegels Bad Bodendorf (Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung) | 61 |
| Abbildung 35: Rekonstruierte (Anschlagslinie) und berechnete ($Q = 1.200 \text{ m}^3/\text{s}$) Überschwemmungsflächen im Bereich des Pegels Bad Bodendorf (Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung) | 61 |
| Abbildung 36: Rekonstruierte (Anschlagslinie) und berechnete ($Q = 1.200 \text{ m}^3/\text{s}$, rau Variante) Überschwemmungsflächen im Bereich des Pegels Bad Bodendorf (Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung) | 62 |
| Abbildung 37: Situation am Kontrollpunkt Josef-Hardt-Allee 2 (LVerMGeo RP 2021) | 63 |
| Abbildung 38: Situation am Kontrollpunkt Pegel Bad Bodendorf (Foto: LVerMGeo RP 2021) | 64 |
| Abbildung 39: Umgriff Pegelmodell Altenahr mit Standort Pegel Altenahr (Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung) | 65 |
| Abbildung 40: Kontrollpunkt am Pegel Altenahr, Brücken unverlegt (Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung) | 66 |
| Abbildung 41: Kontrollpunkte an der Kläranlage Altenahr, Brücken unverlegt (Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung) | 66 |
| Abbildung 42: Rekonstruierte und berechnete ($Q = 753 \text{ m}^3/\text{s}$, unverklaust) Überschwemmungsflächen im Bereich des Pegels Altenahr (Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung) | 67 |
| Abbildung 43: Rekonstruierte und berechnete ($Q = 753 \text{ m}^3/\text{s}$, verklaust) Überschwemmungsflächen im Bereich des Pegels Altenahr (Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung) | 68 |
| Abbildung 44: Umgriff Pegelmodell Müsch mit Standort Pegel Müsch (Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung) | 69 |
| Abbildung 45: Kontrollpunkte Bergstraße 1 und Gartenstraße 3 (Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung) | 70 |
| Abbildung 46: Rekonstruierte und berechnete Überschwemmungsflächen ($Q = 508 \text{ m}^3/\text{s}$, unverklaust) im Bereich des Pegels Müsch (Vorland und Flussschlauch rauer) (Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung) | 71 |
| Abbildung 47: Rekonstruierte und berechnete Überschwemmungsflächen ($Q = 508 \text{ m}^3/\text{s}$, unverklaust) im Bereich des Pegels Müsch (Flussschlauch rauer) (Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung) | 72 |

TABELLENVERZEICHNIS

| | | |
|-------------|--|----|
| Tabelle 1: | Gebietsniederschlag [mm] im Zeitraum 14.07. 07:00 Uhr bis 15.07. 07:00 Uhr MEZ in den rheinland-pfälzischen Warnregionen der Eifel im Vergleich zur langjährigen mittleren Monatssumme im Juli. Zusätzlich dargestellt ist der Gebietsniederschlag für das gesamte Ahr-Einzugsgebiet (inkl. NRW-Anteil)..... | 16 |
| Tabelle 2: | Ausgewählte Messstationen mit Niederschlagsmengen mit einer Wiederkehrzeit von deutlich größer 100 Jahren. | 16 |
| Tabelle 3: | Erreichte Höchststände und deren Jährlichkeiten an ausgewählten Rheinpegeln. ... | 20 |
| Tabelle 4: | Kennwerte wichtiger Pegel im Mosel-Einzugsgebiet. Werte für Pegel an kleineren Moselzuflüssen siehe Tabelle 5. | 22 |
| Tabelle 5: | Höchststände der Hochwasser in der Eifel am 14./15.07.2021 (teilweise vorläufig).. | 28 |
| Tabelle 6: | Aktiv verbreitete Hochwassermeldungen gemäß Regionalem Hochwassermeldeplan (Normaldruck) sowie <i>automatisch versendete Zusatzinformationen (Kursivdruck)</i> | 42 |
| Tabelle 7: | Aktiv verbreitete Hochwassermeldungen für das Ahr-Einzugsgebiet vor dem Höchststand am Pegel Bad Bodendorf (automatischer Versand direkt nach der Vorhersageberechnung). Weitere am 14./15.07. auf https://www.hochwasser-rlp.de veröffentlichte Vorhersagen nach manuellen Zusatzberechnungen mit Uhrzeit [MESZ] und Höchststand am Pegel Altenahr: 19:57 530 cm; 20:43 692 cm; 22:24 707 cm; 15.07. 01:06 706 cm. | 44 |
| Tabelle 8: | Gebietsniederschlag im gesamten Einzugsgebiet der Ahr im Zeitraum 14.07. 07:00 Uhr bis 14.07. 21:00 Uhr MEZ auf Basis verschiedener Niederschlagsprodukte. Langjährige mittlere Monatssumme für Juli: 69 mm..... | 46 |
| Tabelle 9: | Simulierte Maximalabflüsse am Pegel Altenahr mit dem WHM LARSIM unter Verwendung des Produkts InterMet-LfU-RLP und der nachprozessierten Produkte RADOLAN-RL-DWD, Radar-ITWH-Ahr und Uni-Stuttgart-PWS als Niederschlagsinput (vgl. Abschnitt 5.1)..... | 54 |
| Tabelle 10: | Verwendete Materialien und Strickler-Beiwerte. | 59 |
| Tabelle 11: | Berechnung des Wasserstandes im Bereich Pegel Bad Bodendorf (blau: höchste Übereinstimmung von Berechnung mit Aufzeichnung). | 63 |
| Tabelle 12: | Berechnung des Wasserstandes unter Berücksichtigung der Verklausung der Brücken im Bereich Pegel Altenahr (blau: höchste Übereinstimmung von Berechnung mit Aufzeichnung)..... | 67 |
| Tabelle 13: | Berechnung des Wasserstandes unter Berücksichtigung der Verklausung der Brücken im Bereich KA Altenahr (blau: höchste Übereinstimmung von Berechnung mit Aufzeichnung)..... | 68 |
| Tabelle 14: | Berechnung des Wasserstandes bei einem Abfluss von 508 m ³ /s unter Berücksichtigung der Verklausung der Brücken bzw. rauer Verhältnisse im Bereich Pegel Müsch (blau: höchste Übereinstimmung von Berechnung und Rekonstruktion) | 70 |

VORWORT

Der Frühsommer 2021 war in Rheinland-Pfalz geprägt von Tiefdrucklagen. Wiederholte Regenereignisse sättigten die Böden auf und ließen die Hochwassergefahr in weiten Teilen des Landes steigen. Mitte Juli spitzte sich die Situation mit dem Tief „Bernd“, das extremen Stark- und Dauerregen brachte, zu und führte in der Nacht vom 14.07.2021 auf den 15.07.2021 in der gesamten Eifel zu dramatischem Hochwasser, im Ahrtal zu einer Flutkatastrophe. 135 Menschen verloren allein in Rheinland-Pfalz auf tragische Weise ihr Leben, Ztausende erlitten Schäden an Leib und Gut. Das gesamte Ahrtal wurde von der Flut verwüstet. Die Folgen werden noch in Jahrzehnten sichtbar sein.

Der nachfolgende Bericht analysiert Bedingungen, die zu dieser Unglücksnacht führten, skizziert den Verlauf des Hochwassergeschehens, rekonstruiert anhand von Modellberechnungen, wie es zu den enormen Flutwellen kommen konnte, und reflektiert die Arbeit des Landesamtes für Umwelt in Bezug auf Hochwasservorhersagen und Hochwassermeldungen.

ZUSAMMENFASSUNG

Nach einem überdurchschnittlich nassen Juni 2021 und wiederholten Regenfällen Anfang Juli strömten ab dem 12.07. warme und sehr feuchte Luftmassen aus dem Mittelmeerraum in einer Drehbewegung um das Bodentief „Bernd“ nach Südwestdeutschland. Nach anhaltendem Regen am 13.07. mit Tagessummen von 10 bis 30 mm fiel in der Eifel am 14.07. extremer Stark- und Dauerregen mit Tagessummen bis deutlich über 100 mm, kleinflächig sogar über 150 mm. Teilweise wurde der Regen zum Ende des Ereignisses intensiver. Der 24-stündige Gebietsniederschlag im gesamten Ahr-Einzugsgebiet betrug 103 mm und lag mit dem 1,5-fachen deutlich über der langjährigen mittleren Monatssumme von 69 mm. Laut einer Studie der World Weather Attribution ist unter den gegenwärtigen Klimabedingungen zu erwarten, dass eine bestimmte Region in Westeuropa etwa einmal in 400 Jahren von ähnlichen Ereignissen heimgesucht wird.

Die wiederholt auftretenden Juli-Niederschläge bei bereits hoher Bodenfeuchte führten ab dem 08.07. zu Hochwasser an Rhein (Schwerpunkt Oberrhein, 09.07. bis 22.07.) mit Höchstständen eines 2- bis 10-jährlichen Hochwassers und zu Hochwasser an der Mosel (Schwerpunkt Untermosel, 14.07. bis 18.07.) mit Höchstständen im Bereich eines 5- bis 10-jährlichen Hochwassers. Am Oberrhein wurde durch den Einsatz dreier gesteuerter Rückhaltemaßnahmen der Wasserstand deutlich abgesenkt. An der Mosel wurden die für ein 5- bis 7-jährliches Hochwasser bemessenen Hochwasserschutzanlagen in Zell, Briedel und Alf überflutet.

Infolge des extremen Stark- und Dauerregens am 14.07. kam es in der Nacht auf den 15.07. in der gesamten Eifel zu Hochwasser mit katastrophalem Ausmaß und Wasserständen, die die bisher gemessenen Höchststände deutlich – teilweise um mehrere Meter – überschritten. Im Ahrgebiet wurden drei Pegelstationen durch das Hochwasser vollkommen zerstört, weitere acht rheinland-pfälzische Pegelstationen wiesen Schäden auf. Aufgrund der zer- bzw. gestörten Strom- und Mobilfunknetze war die Datenfernübertragung für über die Hälfte der insgesamt 42 Eifel-Pegel während der Hochwasserwelle unterbrochen.

Am durch das Hochwasser zerstörten Ahr-Pegel Altenahr (Einzugsgebiet 747 km²) lag der anhand von Hochwassermarken rekonstruierte Höchststand am 15.07. gegen 2 Uhr bei 10 m. Der mittlere Wasserstand beträgt dort 0,75 m und der bisher höchste gemessene Wert (Messzeitreihe von 1946 bis 2020) 3,7 m. Am Abend des 14.07. stieg der Wasserstand am Pegel Altenahr innerhalb von sechs Stunden um etwa sieben Meter an. Am Kyll-Pegel Kordel (Einzugsgebiet 819 km²) lag der höchste Wasserstand bei 5,9 m (bisher höchster Messwert: 4,8 m), am Prüm-Pegel Prümzurlay (Einzugsgebiet 574 km²) bei 7 m (bisher höchster Messwert: 4,9 m). Für 28 Pegel in der Eifel sind die Höchststände am 14./15.07.2021 als Extremwasserstände (d.h. weit über einem 100-jährlichen Hochwasser) einzurufen.

Vor allem an der Ahr führte die durch Schwemmgut verursachte Verklausung von Brückendurchlässen zu einem Rückstau von Wasser und damit zu einer zusätzlichen Erhöhung der Wasserstände oberhalb der Brücken. Ein plötzlicher Zusammenbruch der Brücken verursachte infolge der dann auftretenden Schwallwelle eine zusätzliche Erhöhung des Wasserstands unterhalb der brechenden Brücke. Für den Pegel Altenahr ist beispielsweise davon auszugehen, dass der höchste Wasserstand ohne diesen Rückstau und die Schwallwellen 2 bis 3 m niedriger gelegen hätte als aufgrund von Hochwassermarken rekonstruiert. Der Maximalabfluss am Pegel Altenahr wird auf 750 bis 1000 m³/s geschätzt.

Über die Hochwasservorhersagezentrale am Landesamt für Umwelt in Mainz wurden von Ende Juni bis Anfang August an 23 Tagen Hochwassermeldungen verbreitet. Vom 08.07. bis 19.07. erfolgte der Dienst rund um die Uhr (24 h). Es wurden die Informationsplattformen des Hochwassermeldedienstes (Internetseite, Videotext, telefonische Wasserstandansage und Länderübergreifendes Hochwasserportal) bestückt sowie Meldungen per E-Mail, SMS und Fax versendet und für die Warn-Apps KATWARN, NINA und „Meine Pegel“ bereitgestellt.

Für den Rhein wurden an insgesamt 23 Tagen Hochwasserberichte erstellt und verbreitet. Für die Mosel inklusive Saar und Sauer wurden ab dem 12.07. insgesamt sieben Hochwasserberichte erstellt und verbreitet. Am 13.07. und dann verstärkt am 14.07. wurde auf die hohe Vorfeuchte, die Wetterwarnungen des Deutschen Wetterdienstes und die daraus resultierende Hochwassergefahr auch für die Mosel-Zuflüsse hingewiesen. Der am 15.07. am Pegel Trier gegen 18 Uhr erreichte Höchststand von 934 cm war seit dem Morgen mit hoher Genauigkeit vorhergesagt worden.

Für die Eifelflüsse inklusive der Ahr war die regionsbezogene Hochwasserfrühwarnung am späten Vormittag des 14.07. auf die Warnstufe „rot“ (hohe Hochwassergefährdung) gesetzt worden. Ab 17:17 Uhr wurde zunächst für das Ahr-Warngebiet und sukzessive für weitere Warngebiete der Eifel die höchste Warnstufe „lila“ (sehr hohe Hochwassergefährdung) gesetzt, wodurch auch entsprechende KATWARN-Meldungen ausgelöst wurden. In den pegelbezogenen Vorhersagen variierten die Höchststand-Vorhersagen am Pegel Altenahr (Ahr) zwischen 2,5 m morgens und 7 m spät-abends (tatsächlich eingetreten, durch Rückstau beeinflusst: ca. 10 m), am Pegel Kordel (Kyll) zwischen 4 m und 7 m (tatsächlich eingetreten: 5,9 m) und am Pegel Prümzurlay (Prüm) zwischen 4,8 m und 8 m (tatsächlich eingetreten ca. 7 m). Die Unsicherheit der Wasserstandsvorhersage war primär durch die Unsicherheit der Wettervorhersage und im Hochwasserverlauf auch durch die fehlenden Pegeldaten bedingt.

Tragische Folge der Hochwasserkatastrophe in Rheinland-Pfalz sind 135 Tote. Laut rheinland-pfälzischem Innenministerium wurden insgesamt 65.000 Menschen geschädigt. Im Ahrtal haben mindestens 17.000 Menschen Hab und Gut verloren oder sind von erheblichen Schäden betroffen. Über 9.000 Gebäude wurden an der Ahr zerstört oder stark beschädigt. Viele Straßen und Versorgungsleitungen sowie etwa zwei Drittel der 112 Brücken im Schadensgebiet wurden komplett zerstört. Mobilfunk und Internet waren vielerorts für längere Zeit unterbrochen. Rettungs- und Hilfsorganisationen aus ganz Deutschland und den europäischen Nachbarländern starteten den größten Rettungseinsatz in der deutschen Geschichte.

Am Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz wurden und werden umfangreiche Analysen zur Flutwelle im Ahrtal durchgeführt, die zum Zeitpunkt der Berichterstattung noch nicht abgeschlossen sind. Mittels Satellitendaten und Luftbildern wurde der Überflutungsbereich, das Schadensausmaß sowie die abgelaufenen Erosionsprozesse im Gewässerlauf der Ahr (u.a. Kolkbildung an Brücken) rekonstruiert. Extreme Niederschläge im Westen und Südwesten Deutschlands aber auch in den westlichen Nachbarländern wurden bereits früh von der Wettervorhersage erfasst. Die Analyse der Niederschlagsvorhersagen zeigt aber auch, dass es bezogen auf die verschiedenen Einzugsgebiete große Unsicherheiten hinsichtlich der räumlichen und zeitlichen Verteilung und den zu erwartenden Niederschlagsmengen gab. Im Einzugsgebiet der Ahr lagen die tatsächlich gefallenen Niederschläge meist im Bereich der vorhergesagten Maximalwerte der Ensemble-Vorhersagen, zum Teil sogar darüber. Der aus Stationsmessdaten abgeleitete Gebietsniederschlag war nach derzeitiger Einschätzung ca. 15% zu niedrig, jener aus den Radarprodukten sogar bis etwa 30 %.

Die Zusammenschau der Vorabwarnungen unterschiedlicher Warnsysteme inklusive jener des LfU macht die Fülle der Hinweise auf ein sehr großes Hochwasser deutlich. Die an der Ahr eingetretene Flutwelle mit einem Höchststand von rund 10 m am Pegel Altenahr war mit den vor der Katastrophe verfügbaren Daten und vor allem aufgrund der selbstverstärkenden Effekte (Erosionsprozesse, neue Fließwege, Rückstau an Brücken, Schwallwellen u.ä.) jedoch nicht vorhersagbar.

1 WETTERGESCHEHEN

1.1 Witterung im Frühsommer 2021

Im Juni 2021 traten in mehreren Phasen lokal wiederholt unwetterartige Starkregen mit Gewittern auf. Als Starkregen werden in diesem Bericht Niederschlagsereignisse definiert, die nach den Warnkriterien für Unwetterwarnungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) Mengen von mindestens 25 mm pro Stunde bzw. 35 mm in 6 Stunden aufweisen. Im ersten Drittel des Juni 2021 haben Tiefdruckgebiete mit feucht-labilen Luftmassen, wie die Tiefe „Olger“ und „Peter“, das Wettergeschehen in Rheinland-Pfalz geprägt. In feuchtwarmer Luft bildeten sich vor allem tagsüber zahlreiche Gewitter mit lokalen Starkniederschlägen, die nur langsam zogen. Teilweise wuchsen die Gewitter zu größeren Gewitter-Clustern zusammen. Dadurch konnten sich extrem heftige Starkregen in kurzer Zeit und auch über mehrere Stunden entwickeln. Betroffen von den Starkregenereignissen waren zahlreiche Orte in Rheinland-Pfalz, auch in der Eifel traten Starkregen auf. Nachdem am 11.06. die letzten Niederschläge abgeklungen waren, blieb es im ganzen Land für etwa eine Woche trocken. Ab dem 18.06. war der Monat wieder von wiederkehrendem Niederschlag geprägt, wiederholt wurden auch lokal unwetterartige Starkniederschläge mit Gewittern verzeichnet. In der Eifel traten ab dem 18.06. bis zum Ende des Monats Niederschlagssummen von etwa 15 mm bis über 100 mm auf, im Ahr-Einzugsgebiet von etwa 30 mm bis 100 mm und in der Westeifel von etwa 25 mm bis 85 mm (Datenbasis: RADOLAN-RW, DWD).

Der nasse Juni verzeichnete einen deutlichen Niederschlagsüberschuss. Die Niederschlagssumme betrug landesweit 99 mm und lag damit 50 % über der mittleren Monatssumme von 66 mm (Datenbasis: REGNIE, DWD; 1991-2020).

1.2 Wettergeschehen Anfang Juli 2021

Vom 01.07. bis 12.07. trat in Rheinland-Pfalz immer wieder schauerartiger Regen, teilweise auch lokal unwetterartiger Starkregen auf, mit Summen von etwa 20 bis 40 mm in der Westeifel und etwa 40 bis 80 mm in der Osteifel (Datenbasis InterMet, LfU). Ab dem 12.07. strömten warme und sehr feuchte Luftmassen aus dem Mittelmeerraum in einer Drehbewegung um das Bodentief „Bernd“ nach Deutschland (JUNGHÄNEL ET AL. 2021). Am 13.07. fiel Regen infolge dieses Tiefdruckgebiets zunächst verstärkt in der Westeifel mit Tagessummen von etwa 10 bis 30 mm, in den Abendstunden auch in der Osteifel mit Summen von etwa 10 bis 25 mm (Datenbasis InterMet, LfU).

Durch die in den etwa dreieinhalb Wochen vor dem Ahr-Hochwasser wiederkehrend aufgetretenen Niederschlagsereignisse waren die Böden regional bereits gut gefüllt. So war vor allem in der Vorderpfalz, in Teilen von Rheinhessen, an der Mosel und in dem Bereich des Mittelrheins ab Koblenz die Vorfeuchte am Morgen des 14.07. extrem hoch, wie in Abbildung 1 anhand des 30-tägigen standardisierten Niederschlagsindex SPI (Standardized Precipitation Index), der zu den gebräuchlichsten Niederschlagsindizes zur Identifikation von Niederschlagsüberschüssen und -defiziten (MCKEE ET AL. 1993) zählt, dargestellt ist. Im Ahr-Einzugsgebiet war die Vorfeuchte am Morgen des 14.07. sehr bis extrem hoch, wohingegen in der Westeifel mäßig feuchte Verhältnisse vorherrschten.

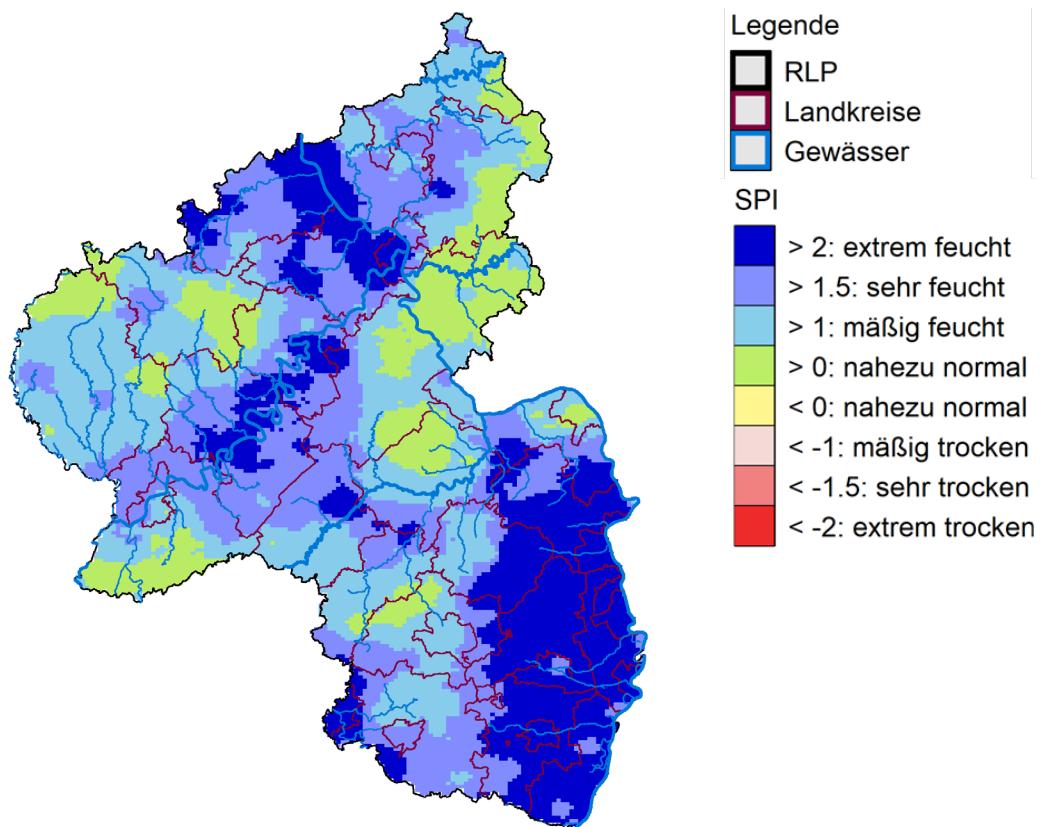


Abbildung 1: Standardisierter Niederschlagsindex SPI für den Zeitraum 14.06. 07:00 Uhr bis 14.07. 07:00 Uhr MEZ in Rheinland-Pfalz (Datenbasis: REGNIE, DWD: Referenzzeitraum 1951 bis 2020).

Im südlichen Rheineinzugsgebiet wurden durch einige länger anhaltende Regenfälle sowie heftige kurze Gewittergüsse bereits im ersten Monatsdrittel gebietsweise die üblichen Juli-Monatssummen überschritten. Am 12.07. kam es zwischen dem südwestlichen Moseleinzugsgebiet und dem Neckar zu Niederschlagsmengen von verbreitet 30 bis 60 mm, im Schwarzwald lokal bis zu 80 mm in 24 Stunden. Im Moselgebiet kam es am 13.07. zu weiteren schauerartigen Regenfällen, die lokal kräftig ausfielen.

1.3 Niederschlag am 14.07.2021 in der Eifel

Durch erzwungene Hebung (orografisch und dynamisch) und leichte Staueffekte an den westlichen Mittelgebirgen kam es am 14.07. großflächig zu anhaltendem Starkregen (JUNGHÄNEL ET AL. 2021), in der Eifel fielen extreme Niederschlagsmengen (Abbildung 2 und Abbildung 3). Im rheinland-pfälzischen Teil der Eifel wurden Tagessummen von etwa 15 mm im äußersten Osten bis zu lokal 145 mm im nördlichen Ahr-Einzugsgebiet registriert. Im nordrhein-westfälischen Teil des Ahr-Gebietes fielen kleinräumig über 150 mm Niederschlag. Großflächig fielen Niederschlagsmengen zwischen 75 und 135 mm vom Landkreis Ahrweiler über die Vulkaneifel bis zum Landkreis Bitburg-Prüm und über die Landesgrenze hinweg. Im unteren Ahrtal traten Regenmengen von etwa 40 bis 70 mm auf. Der 24-stündige Gebietsniederschlag im gesamten Ahr-Einzugsgebiet (inkl. NRW-Anteil) betrug 103 mm (Datenbasis: InterMet, LfU) und lag mit dem 1,5-fachen deutlich über der langjährigen mittleren Monatssumme von 69 mm (Datenbasis: HYRAS, DWD; 1991 bis 2020).

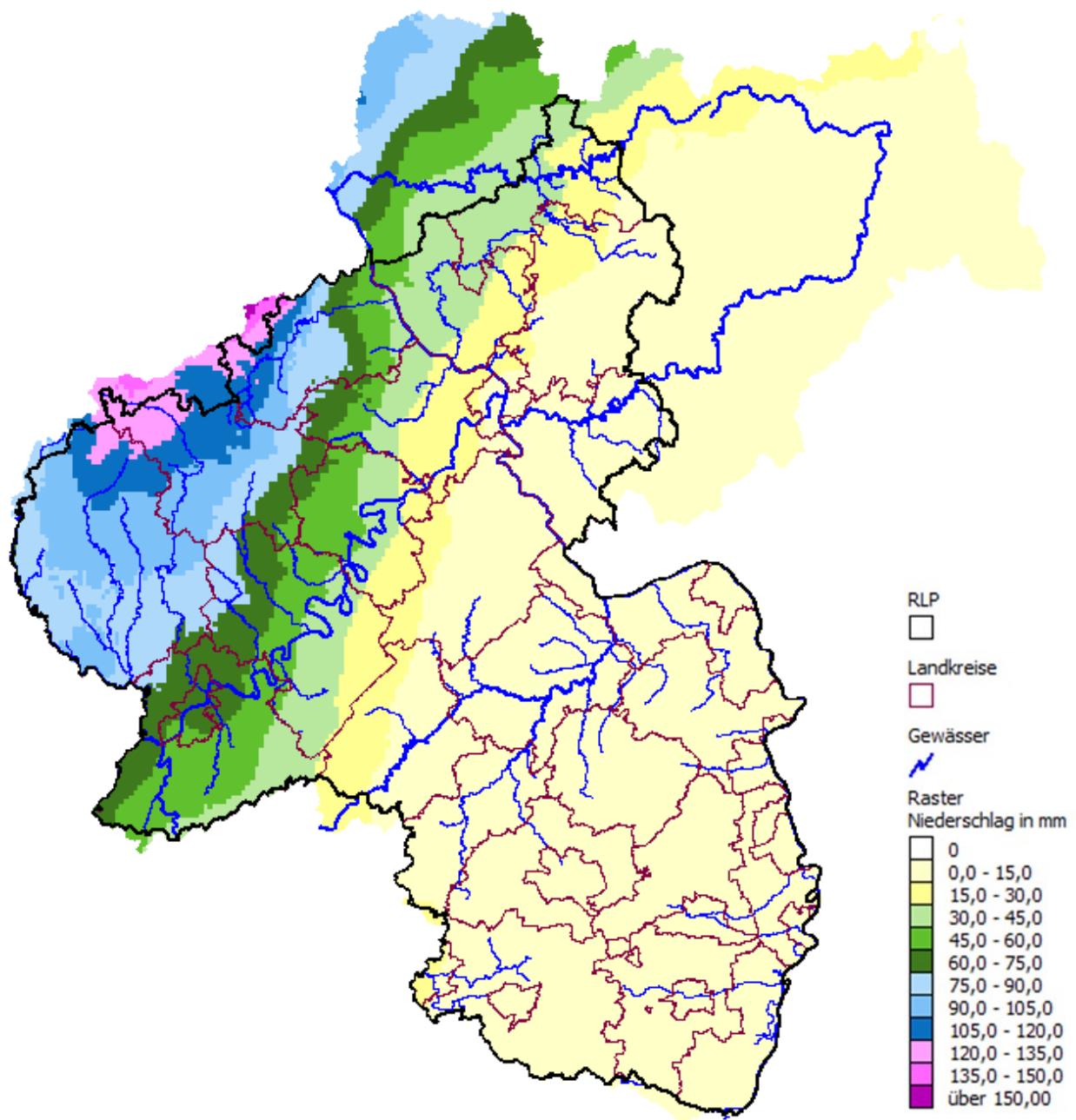


Abbildung 2: Räumliche Verteilung der Niederschlagssummen [mm] vom 14.07. 07:00 Uhr bis 15.07. 07:00 Uhr MEZ (Datenbasis: InterMet – interpolierte Stationsdaten, LfU).

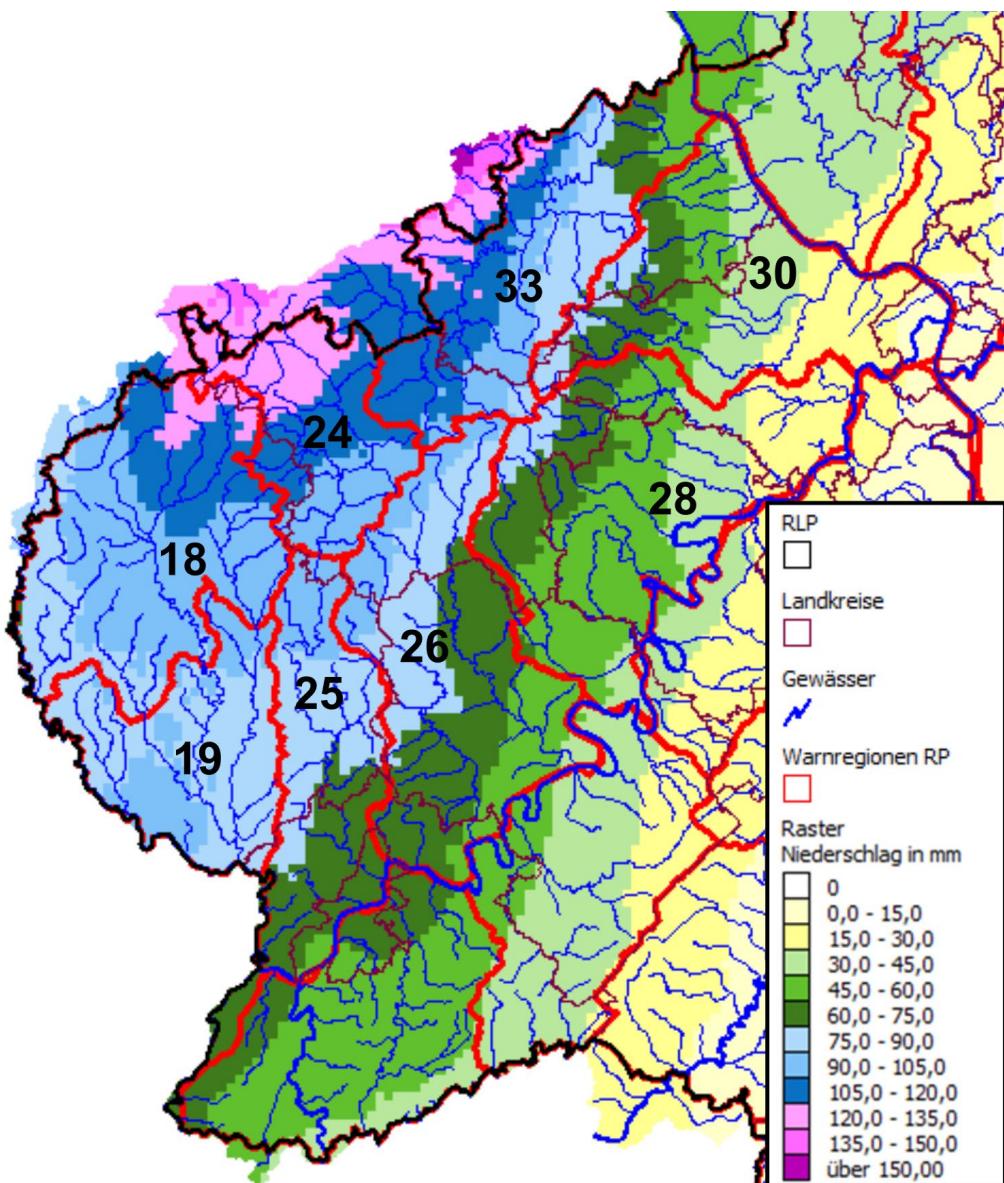


Abbildung 3: Räumliche Verteilung der Niederschlagssummen [mm] vom 14.07. 07:00 Uhr bis 15.07. 07:00 Uhr MEZ (Datenbasis: InterMet – interpolierte Stationsdaten, LfU) und rot umrandete Warnregionen in der Eifel.

Die Auswertung der Gebietsniederschläge (Tabelle 1) in den acht Warnregionen der Eifel (Abbildung 3) zeigt, dass die Tagessumme in sechs Regionen über der mittleren Monatssumme für den Juli der Referenzperiode 1991 bis 2020 lag. Die höchsten Werte traten neben dem Ahr-Einzugsgebiet in den Warnregionen „Prüm- und Our-Einzugsgebiet (18)“, „Zuflüsse der unteren Sauer (19)“ sowie „Oberes Kyll-Einzugsgebiet“ (24) auf. In Letzterem wurde an diesem Tag sogar annähernd das 1,5-fache der mittleren Monatssumme im Juli erreicht.

Tabelle 1: Gebietsniederschlag [mm] im Zeitraum 14.07. 07:00 Uhr bis 15.07. 07:00 Uhr MEZ in den rheinland-pfälzischen Warnregionen der Eifel im Vergleich zur langjährigen mittleren Monatssumme im Juli. Zusätzlich dargestellt ist der Gebietsniederschlag für das gesamte Ahr-Einzugsgebiet (inkl. NRW-Anteil).

| Gebiets-ID | Warnregion | Tagessumme (InterMet LfU) | Mittlere Monatssumme Juli (REGNIE DWD 1991-2020) |
|------------|---|----------------------------------|--|
| 18 | Prüm- und Our-Einzugsgebiet | 99 mm | 76 mm |
| 19 | Zuflüsse der unteren Sauer | 88 mm | 72 mm |
| 24 | Oberes Kyll-Einzugsgebiet | 113 mm | 77 mm |
| 25 | Zuflüsse der unteren Kyll | 78 mm | 71 mm |
| 26 | Salm- und Lieser-Einzugsgebiet | 73 mm | 69 mm |
| 28 | Nördliche Moselzuflüsse unterhalb Traben-Trarbach | 50 mm | 65 mm |
| 30 | Nette-Einzugsgebiet | 45 mm | 66 mm |
| 33 | Ahr-Einzugsgebiet | 96 mm | 72 mm |
| | Flusseinzugsgebiet | Tagessumme (InterMet LfU) | Mittlere Monatssumme Juli (HYRAS DWD 1991-2020) |
| - | Ahr gesamt (inkl. NRW-Anteil) | 103 mm | 69 mm |

Am 14.07. wurden an zahlreichen Messstationen Niederschlagsmengen mit einer Wiederkehrzeit von weit über 100 Jahren registriert, wie aus Tab. 2 für ausgewählte Messstationen zu entnehmen ist. Infolge der hohen Niederschlagsmengen, der Überschwemmungen und der Stromausfälle fielen fünf Niederschlagsmessstationen in der Eifel (RLP) während des Niederschlagsereignisses aus.

Tabelle 2: Ausgewählte Messstationen mit Niederschlagmengen mit einer Wiederkehrzeit von deutlich größer 100 Jahren.

| Station / Gebiet | Datum | Dauer | Höhe [mm] | Jährlichkeit* |
|--|-------------------|----------------|-----------|---------------|
| Rheinbach-Todenfeld (Erftverband NRW) / Ahr-EZG | 14.07. | 13h | 157 | >>>100 |
| Lissendorf (DWD) / Kyll-EZG | 14.07. | 14h | 118 | >>>100 |
| Schneifel-Forsthaus (DWD) / Kyll-EZG, Prüm-EZG | 14.07. | 15h | 124 | >>>100 |
| Prüm-Wutzerath (DWD) / Prüm-EZG | 14.07. | 16h | 105 | >>100 |
| Wascheid (FAWF) / Prüm-EZG | 14.07. | 15h | 130 | >>>100 |
| Meisburg (WWV) / Salm-EZG | 14.07. | 13h | 97 | >>100 |
| Langjähriges Mittel RLP Monat Juli (zum Vergleich) (REGNIE DWD 1991 – 2020) | 01.-31.07. | 31 Tage | 72 | |

* Abschätzung basierend auf KOSTRA-DWD-2010R (JUNGHÄNEL ET AL. 2017) und Praxisrelevanten Extremwerten des Niederschlags (PEN LAWA 2010)

Das Niederschlagsereignis begann in den Morgenstunden und dauerte in einigen Regionen bis etwa Mitternacht an. In der Westeifel sowie am Oberlauf und an den nördlichen Zuflüssen der Ahr nahm die Intensität des Regens am Nachmittag und am Abend des 14.07. noch zu. Beispielhaft ist der Niederschlagsverlauf an der DWD-Station Lissendorf (Kyll-Einzugsgebiet) in Abbildung 4 und Abbildung 5 dargestellt.

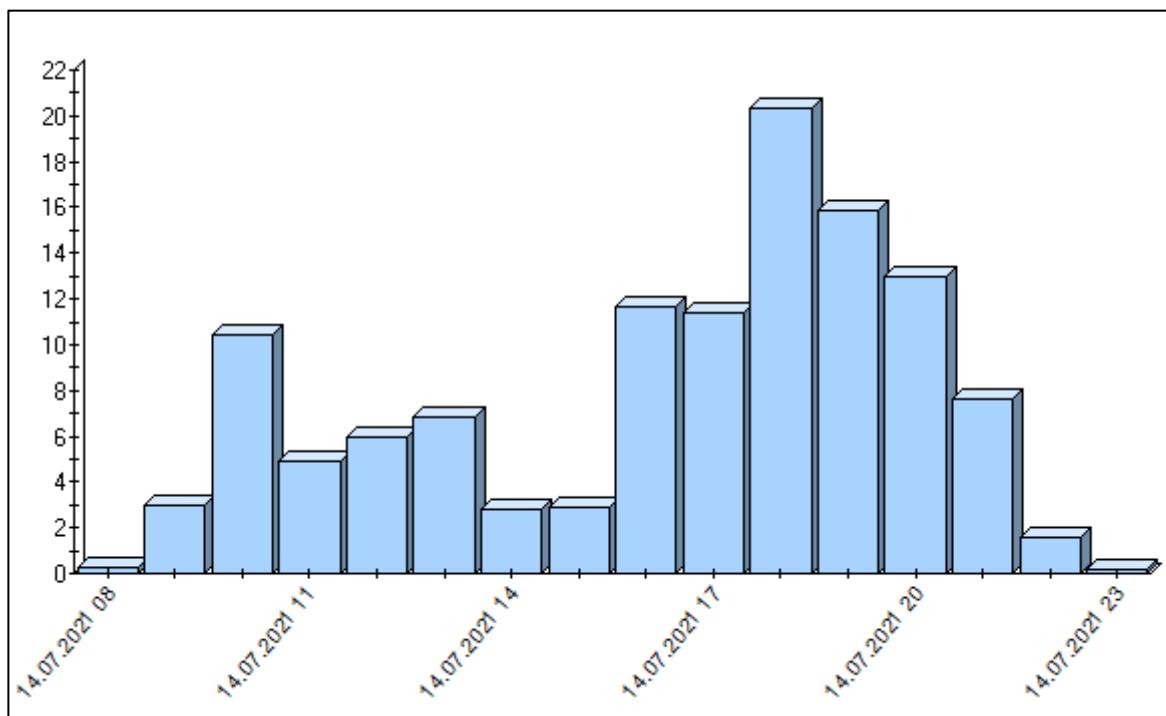


Abbildung 4: Stündliche Niederschlagssummen [mm] von 14.07. 07:00 Uhr bis 14.07. 23:00 Uhr MEZ an der DWD-Station Lissendorf (Datenbasis: Messdaten DWD).

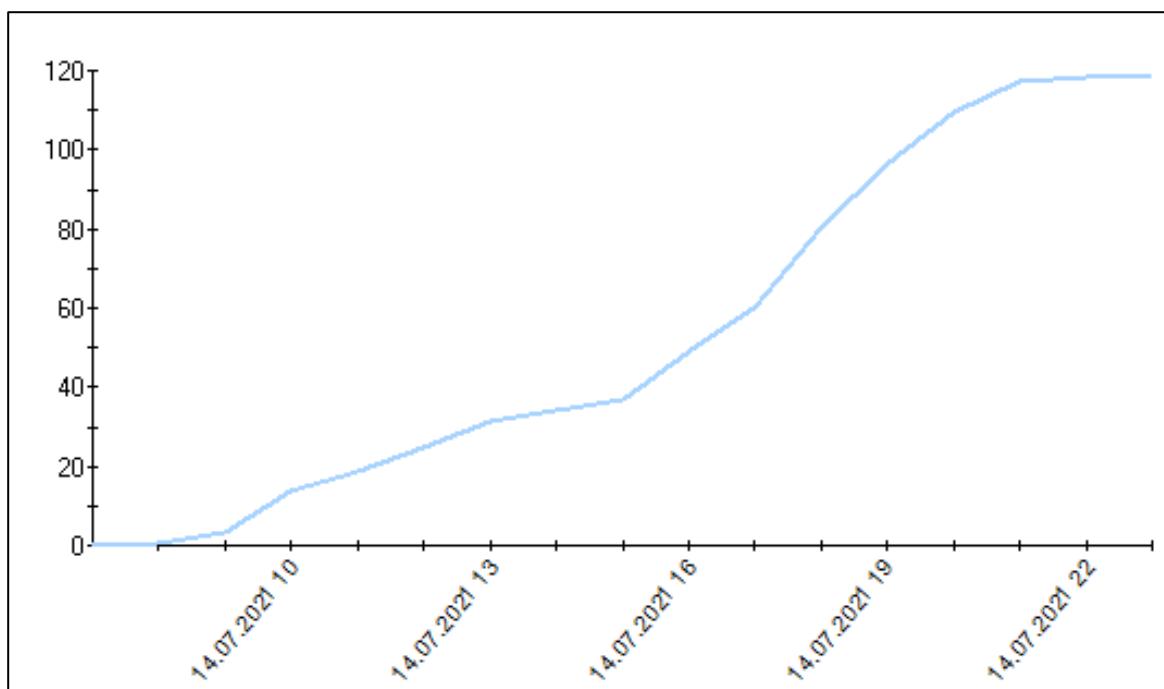


Abbildung 5: Gemessene Niederschlagssumme [mm] vom 14.07. 07:00 Uhr bis 14.07. 23:00 Uhr MEZ an der DWD-Station Lissendorf (Datenbasis: Messdaten DWD).

An den Stationen Lissendorf (DWD) und Schneifel-Forsthaus (DWD) fielen ab 16:00 Uhr MESZ innerhalb von 6 Stunden etwa 80 bzw. 73 mm Niederschlag. Die Warnkriterien des DWD definieren extrem heftigen Starkregen mit > 60 mm in 6 Stunden und extrem ergiebigen Dauerregen mit > 70 mm in 12 Stunden bzw. > 80 mm in 24 Stunden. Diese Einordnung des DWD verdeutlicht noch einmal den extremen Charakter der am 14.07. gefallenen Regenmengen. Das Niederschlagsereignis lässt sich somit als extrem ergiebiger Dauerregen mit eingelagertem extrem heftigen Starkregen beschreiben.

In der Zirkulation des umfangreichen mitteleuropäischen Tiefdruckkomplexes zogen die Niederschlagsgebiete zunächst nach Nordosten, dann nach Norden, bevor sie über Norddeutschland nach Westen drehten und schließlich ihren Weg nach Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz fanden. Untersuchungen deuten darauf hin, dass eine außergewöhnlich hohe Oberflächenverdunstung über der Nord- und Ostsee möglicherweise als eine bedeutende Feuchtigkeitsquelle vor dem Ereignis diente (MOHR ET AL. 2022).

Laut einer Studie der World Weather Attribution (WWA) ist unter den gegenwärtigen Klimabedingungen zu erwarten, dass eine bestimmte Region in Westeuropa wie zum Beispiel die Eifel-Ardennen-Region im Juli 2021 etwa einmal in 400 Jahren von ähnlichen Ereignissen heimgesucht wird (WWA 2021, TRADOWSKY ET AL. 2022).

2 HOCHWASSERVERLAUF

2.1 Rhein-Hochwasser vom 09.07. bis 29.07.2021

Infolge der alpinen Schneeschmelze treten am Oberrhein im Frühsommer häufig hohe Wasserstände auf. Im Juni 2021 kamen zur Schnee- und Gletscherschmelze wiederholt Regenereignisse hinzu, die sich im Juli fortsetzten. Die direkte Folge dieser wiederkehrenden Niederschläge auf bereits feuchte Böden war ein Anstieg der Wasserstände am Oberrhein mit einer Ausbildung mehrerer Spitzen im zeitlichen Verlauf. Am Pegel Maxau wurde die Meldehöhe von 700 cm ab dem 30.06. zunächst kurzzeitig und ab dem 09.07. für 20 Tage überschritten (Abbildung 6). Im Anschluss bewegte sich der Wasserstand bis zum 09.08. noch um die Meldehöhe, erst danach entspannte sich die Hochwassersituation am Oberrhein. Der Höchstwasserstand am Pegel Maxau erreichte am 17.07. um 16:15 Uhr einen Wert von 865 cm, was einem Abfluss von ca. 4.220 m³/s und einem etwas mehr als 10-jährlichen Wiederkehrintervall entspricht. Mit nur 3 cm unterhalb des Höchststandes des Hochwassers vom Juni 2013 war dies der dritthöchste Messwert innerhalb der vergangenen vier Jahrzehnte.

Gemäß dem deutsch-französischen Reglement wurden im Verlauf des Rheinhochwassers zwischen Basel und Worms mit dem Polder Erstein (Frankreich), dem Kulturwehr Kehl und dem Polder Altenheim (beide Baden-Württemberg) drei gesteuerte Rückhaltemaßnahmen eingesetzt. Durch den Einsatz der Rückhaltemaßnahmen wurden die Hochwasserstände im Oberrhein deutlich abgesenkt und damit die Schutzdämme entlang der freien Rheinstrecke nördlich der letzten Staustufe bei Iffezheim entlastet.

Am Mittel- und Niederrhein bildeten sich ebenfalls Hochwasserwellen aus, die im Unterschied zum Oberrhein durch nur eine dominante Spitze mit vorausgehendem starken Anstieg und anschließendem raschen Rückgang der Wasserstände charakterisiert waren. Die durch das Moselhochwasser bedingten Höchstwasserstände traten zeitlich vor Eintreffen der Welle aus dem Oberrhein auf, so dass eine Überlagerung erst im unkritischen abfallenden Ast stattfand. Am Pegel Koblenz war die Meldehöhe von 500 cm vom 15.07. bis 18.07. überschritten, der Höchstwasserstand lag am 16.07. um 16:00 Uhr bei 661 cm. Am Pegel Duisburg-Ruhrort lagen die Wasserstände vom 15.07. bis 20.07. über der Meldehöhe von 800 cm, der Höchststand von 923 cm, entsprechend einem Abfluss von ca. 7.130 m³/s, wurde am 17.07. um 08:00 Uhr registriert. Am gesamten Mittel- und Niederrhein lag das Hochwasser im Bereich eines 2-jährlichen Ereignisses (Tabelle 3).

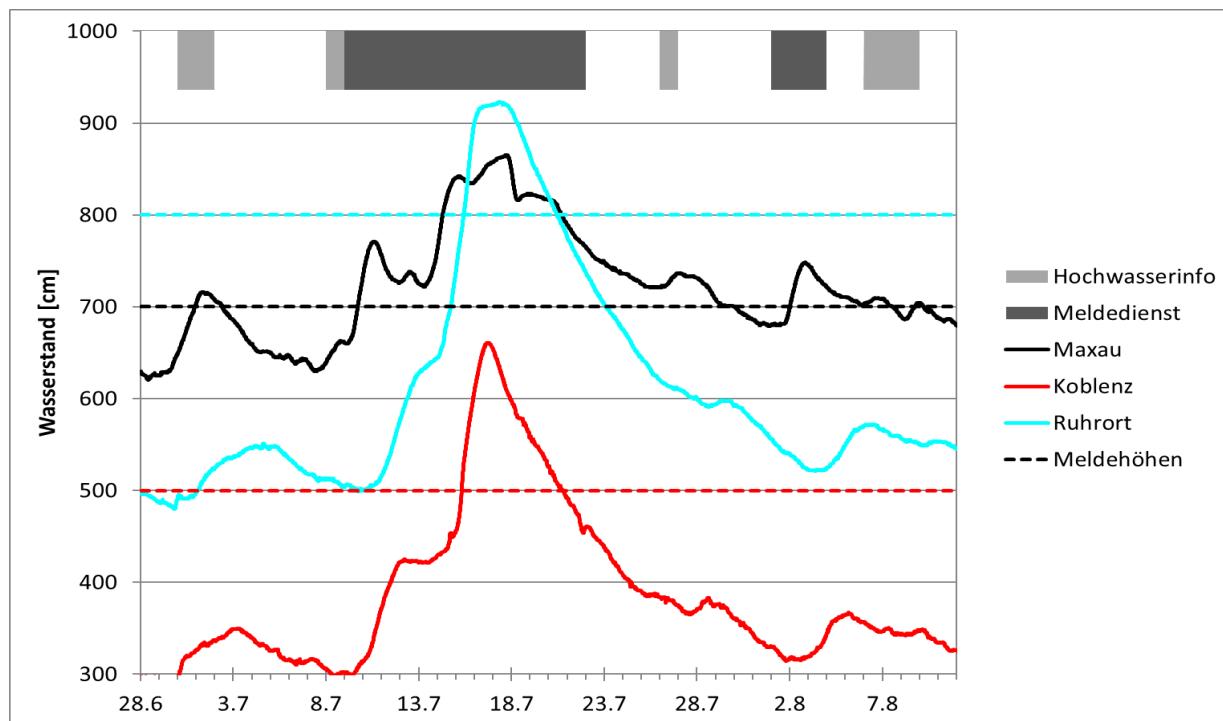


Abbildung 6: Zeitlicher Verlauf der Hochwasserwellen und des Meldedienstes am Rhein.

Tabelle 3: Erreichte Höchststände und deren Jährlichkeiten an ausgewählten Rheinpegeln.

| Pegel | Meldehöhe [cm] | W [cm] | Q [m³/s] | Datum Uhrzeit [MESZ] | Jährlichkeit |
|-----------|----------------|--------|----------|----------------------|--------------|
| Rhein | | | | | |
| Maxau | 650/700 | 865 | 4.220 | 17.07. 16:15 | > HQ10 |
| Mainz | 550 | 568 | 4.140 | 19.07. 00:00 | ~ HQ2 |
| Kaub | - | 553 | 4.180 | 19.07. 05:30 | < HQ2 |
| Koblenz | 450/500 | 661 | - | 16.07. 16:00 | k.A. |
| Andernach | - | 743 | 6.520 | 16.07. 18:30 | > HQ2 |
| Ruhrort | 800 | 923 | 7.130 | 17.07. 08:00 | ~ HQ2 |

2.2 Mosel-Hochwasser vom 14.07. bis 18.07.2021

Die ergiebigen Regenfälle am 12./13.07. an der Obermosel und im Saar-Einzugsgebiet führten an der Mosel ab dem 13.07. zu einem zunächst mäßigen Ansteigen des Wasserstands am Pegel Trier. Die extremen Regenmengen des 14.07. in der Eifel bewirkten ab dem Mittag des 14.07. einen rasanten Wasserstandanstieg, sodass am Pegel Trier die Meldehöhe von 600 cm in der zweiten Tagesshälfte des 14.07. überschritten und bereits am 15.07. gegen 18 Uhr ein Höchststand von 934 cm erreicht wurde (Abbildung 7).

Der Zufluss der Sauer lieferte bei diesem Moselhochwasser die größten Abflussmengen. Am Sauer-Pegel Rosport umfasste der Scheitelabfluss rund $1.620 \text{ m}^3/\text{s}$, was in etwa zwei Drittel des Scheitel-abflusses am Pegel Trier mit rund $2.590 \text{ m}^3/\text{s}$ entspricht. Die Prüm trug hier knapp die Hälfte zum Gesamtabfluss in Rosport bei. Die französische Obermosel sowie die Saar leisteten hingegen einen verhältnismäßig geringen Beitrag zur Hochwasserwelle. In Fremersdorf erreichte die Saar am frühen Morgen des 15.07. einen Maximalabfluss von $353 \text{ m}^3/\text{s}$. Am Pegel Perl wurde am frühen Nachmittag des 17.07. ein Höchstwert von $862 \text{ m}^3/\text{s}$ erreicht.

Am Pegel Trier lag der höchste Wasserstand von 934 cm im Bereich eines 5-jährlichen Hochwassers (Tabelle 4). Aufgrund der hohen Niederschlagssummen in der Eifel trugen die nördlichen Mosel-Zuflüsse unterhalb des Pegels Trier verhältnismäßig stark zu den Abflüssen der Untermosel bei. Am Pegel Cochem erreichte die Hochwasserwelle ihren Höchststand von 838 cm am Morgen des 16.07. im Bereich eines 5- bis 10-jährlichen Hochwassers. Bei Zell an der Untermosel wurden die auf ein 5- bis 7-jährliches Hochwasser ausgelegten Hochwasserschutzanlagen (Briedel, Zell und Alf) überströmt.

Der am 15.07. gemessene Höchststand am Pegel Bollendorf von 635 cm entspricht einem Wiederkehrintervall von etwa 100 Jahren. Der am Pegel Rosport beobachtete Abfluss mit einem Wasserstand von 967 cm lag infolge der hohen Abflussmengen der Prüm hingegen noch deutlich über dem eines 100-jährlichen Ereignisses.

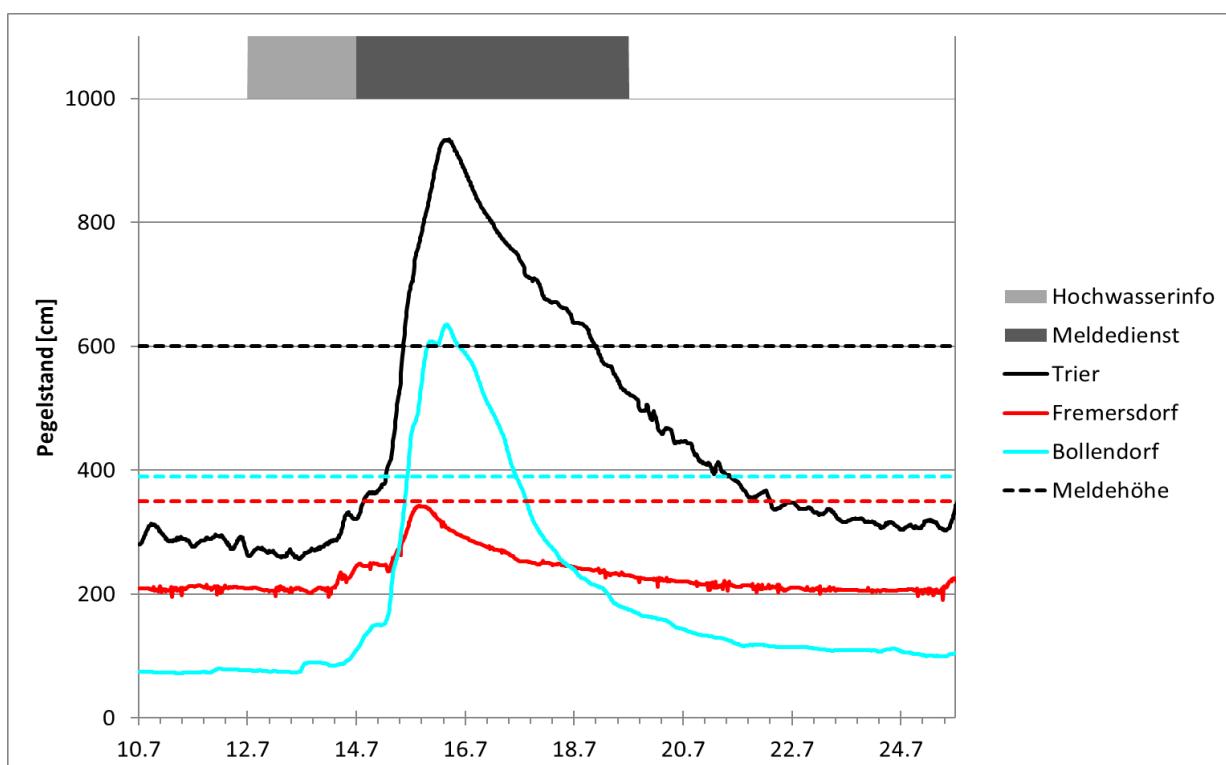


Abbildung 7: Zeitlicher Verlauf der Hochwasserwellen und des Melddienstes an der Mosel.

Tabelle 4: Kennwerte wichtiger Pegel im Mosel-Einzugsgebiet.
Werte für Pegel an kleineren Moselzuflüssen siehe Tabelle 5.

| Pegel | Meldehöhe [cm] | W [cm] | Q [m³/s] | Datum Uhrzeit [MESZ] | Jährlichkeit |
|-------------------|----------------|--------|----------|----------------------|---------------------------|
| Mosel-EZG | | | | | |
| Perl | - | 521 | 862 | 17.07. 14:15 | < HQ2 |
| Trier | 500/ 600 | 934 | 2590 | 15.07. 17:45 | ~ HQ5 (1910-1995) |
| Cochem | - | 838 | 2850 | 16.07. 10:00 | HQ5 – HQ10 |
| Bollendorf/ Sauer | 350 | 635 | 913 | 15.07. 16:30 | HQ50-HQ100 (1959-2020) |
| Rosport/ Sauer | - | 967 | 1620 | 15.07. 12:00 | > HQ100 |
| Fremersdorf/ Saar | 390 | 342 | 353 | 15.07. 04:00 | < HQ2 |

2.3 Hochwasserverlauf im Ahr-Einzugsgebiet am 14./15.07.2021

Infolge des am Vormittag des 14.07. einsetzenden, im Tagesverlauf intensiver werdenden Regens stieg der Wasserstand an den Ahr-Pegeln zunächst mäßig, ab dem Nachmittag zunehmend steiler an (Abbildung 8). Am Pegel Altenahr betrug der Anstieg um 14 Uhr 13 cm pro Stunde, um 18 Uhr 44 cm pro Stunde und kurz vor dem Ausfall des Pegels (20:45 Uhr) 150 cm pro Stunde. Augenzeugen berichten von einem Anstieg mit 200 cm pro Stunde im weiteren Verlauf des Abends (EBERZ, 2021). Die Höchststände wurden um Mitternacht im Bereich von 1000 cm erreicht (Tabelle 5). Demzufolge ist der Wasserstand am Pegel Altenahr innerhalb von etwa 12 Stunden um rund neun Meter angestiegen, am Abend des 14.07. sogar über sieben Meter in sechs Stunden. Der bisher gemessene Höchststand am Pegel Altenahr von 371 cm (Juni 2016), der nach damaliger Pegelstatistik einem 100-jährlichen Hochwasser entsprach, wurde um rund sechseinhalb Meter überschritten.

Für die Pegel an der Ahr und den Pegel Kreuzberg am linksseitigen Ahrzufluss Sahrbach konnten die genauen Höchststände aufgrund des Ausfalls dieser Pegel (siehe Abschnitt 2.5) nicht gemessen werden. Sie wurden mit Hilfe von Hochwassermarken rekonstruiert. Die Nebenflüsse rechtsseitig der Ahr (Trierbach, Adenauer Bach und Kesselinger Bach) führten wegen der dort geringeren Niederschläge kein Extremhochwasser, jedoch wurden auch dort die bisher höchsten Wasserstände seit Beginn der Messung aufgezeichnet. Der Pegel Denn am Kesslinger Bach war der einzige Pegel im Ahr-Einzugsgebiet, der durchgängig und verlässlich die Wasserstände aufgezeichnet hat (Abbildung 8). Für den Pegel Müsch an der oberen Ahr lieferte der redundante Messsensor nach einem zunächst relativ frühen Ausfall der Datenübertragung und nach der Zerstörung der Pegelstation am späten Abend des 14.07. nochmals eindeutig fehlerhafte Werte, die aber nicht in die Vorhersageberechnung (Abschnitt 3.3) eingegangen sind.

Die Abflussspenden werden für die linksseitigen Ahrzuflüsse (u.a. Sahrbach und Armuthsbach) unter Verwendung von rekonstruierten Maximalabflüssen auf bis zu 3.500 l/(s·km²) geschätzt. Zum Vergleich sei die maximale Abflussspende von rund 3.000 l/(s·km²) der 2002er-Hochwasser im Ostererzgebirge genannt (LfUG 2004). Die 100-jährlichen Abflussspenden für die Ahr-Zuflüsse waren vor dem Juli-Hochwasser zwischen 420 und 1070 l/(s·km²).

Die Wassermassen im Ahr-Einzugsgebiet führten zu großflächigen und zerstörerischen Überschwemmungen. Der Überflutungsbereich war deutlich ausgedehnter, als dies auf den bisherigen Hochwassergefahrenkarten für Extremhochwasser angegeben war (Abschnitt 5.3).

An den Brücken des Ahrtals sammelte sich das, infolge der zerstörerischen Kraft des Wassers sehr umfangreiche Schwemmgut. Diese Verklausung von Brückendurchlässen führte zu einem Rückstau des Wassers und damit zu einer zusätzlichen Erhöhung der Wasserstände oberhalb der Brücken. Der Zusammenbruch der Brücken verursachte wiederum eine Schwallwelle und eine zusätzliche oder erneute Erhöhung des Wasserstands unterhalb der brechenden Brücke. Hydraulische Nachberechnungen für mehrere Brücken (Abschnitt 5.6) zeigen, dass der höchste Wasserstand ohne diese Effekte zwischen 2 m und 3 m niedriger gelegen hätte als aufgrund von Hochwassermärkten rekonstruiert. Ein Ortsansässiger aus Ahrweiler berichtet, dass sich eine Flutwelle unbeschreiblichen Ausmaßes über Ahrweiler ergossen habe, als die Brücken oberhalb gebrochen seien (Email von M. BERTRAM 2021 vom 22.08.2021).

Die Aufsichts- und Dienstleistungsdirektion geht davon aus, dass im Ahrtal mindestens 17.000 Menschen ihr Hab und Gut verloren haben oder von erheblichen Schäden betroffen sind (MDI 2022). 134 Menschen verloren ihr Leben. Fast 9.000 Gebäude wurden an der Ahr zerstört oder stark beschädigt, darunter zahlreiche Schulen, Kinderbetreuungseinrichtungen und Krankenhäuser. Von 112 Brücken im Schadensgebiet waren anfangs nur 35 nutzbar und weitere 17 eingeschränkt nutzbar. Viele Straßen, Gas-, Strom- und Wasser- und Abwasserleitungen wurden zerstört. Der Mobilfunk und die Internetversorgung waren vielerorts für längere Zeit unterbrochen.

Rettungs- und Hilfsorganisationen, Feuerwehren, Bundeswehrkräfte aus ganz Deutschland und den europäischen Nachbarländern beteiligten sich an dem größten und längsten Rettungseinsatz in der deutschen Geschichte. Laut rheinland-pfälzischem Innenministerium wird der materielle Gesamtschaden an privatem Eigentum und öffentlicher Infrastruktur in Rheinland-Pfalz auf bis zu 20 Milliarden Euro geschätzt, wovon rund 15 Milliarden nicht durch Versicherungen gedeckt sind (MDI 2022).

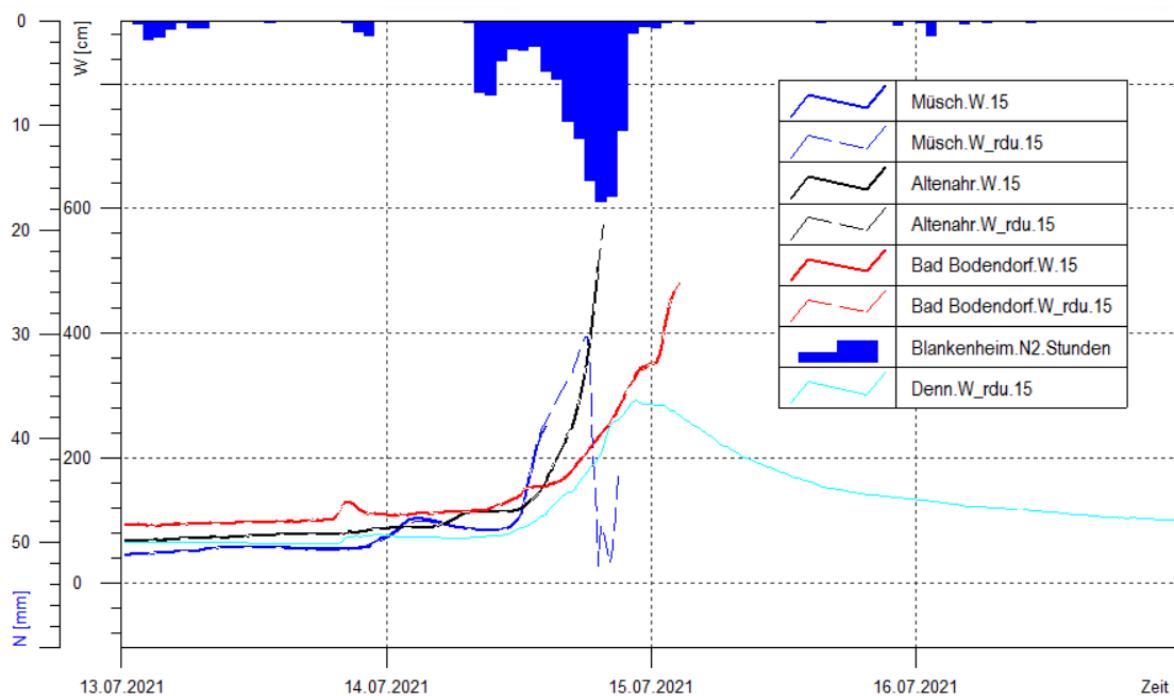


Abbildung 8: Niederschlag an der Messstation Blankenheim und Abflussreaktion an vier Pegeln im Ahr-Einzugsgebiet; für Müsch, Altenahr und Bad Bodendorf jeweils Darstellung von Hauptgeber (W.15) und redundantem Messsensor (W_rdu.15).

2.4 Hochwasserverlauf in der Westeifel am 14./15.07.2021

Auch in der Westeifel fiel am 14.07. extrem intensiver Dauerregen, der gegen Ende in Starkregen überging (endbetontes Niederschlagsereignis). Für die Oberläufe von Kyll, Prüm und Our wurden ähnlich hohe Regenmengen wie im Ahr-Einzugsgebiet beobachtet (Tabelle 1). An nahezu allen Eifelflüssen kam es zu extremen Hochwasserereignissen. Lediglich die Moselzuflüsse der östlichen Eifel blieben von größerem Hochwasser verschont.

An den Pegeln von Kyll, Nims, Prüm, Salm und Our sowie an deren Nebengewässern wurden Höchststände erreicht, die deutlich über einem 100-jährlichen Hochwasser lagen (Tabelle 5). Sehr hohe Wasserstände im Bereich von einem 50 bis über 100-jährlichen Hochwasser wurden an der Lieser sowie der Alf aufgezeichnet. Extremes Hochwasser trat auch an der Sauer sowie deren Zuflüsse Our und Irsen auf. So erreichte der Wasserstand am Sauer-Pegel Rosport einen Höchststand im Bereich eines über 100-jährlichen, am Pegel Bollendorf im Bereich ein 50 bis 100-jährlichen Hochwassers. An den Pegeln Gemünd/Our und Gemünd/Irsen wurde jeweils ein 100-jährliches Hochwasser überschritten.

Am Pegel Kordel stieg der Wasserstand am Abend des 14.07. zunächst bis etwa Mitternacht, kam dann vermutlich infolge des Überströmens des Hochwasserschutzes oberhalb von Ehrang einige Stunden zum Stillstand um am Morgen des 15.07. weiter zu steigen, bis um 10:30 Uhr ein Höchststand von 594 cm erreicht wurde (Abbildung 9). Damit wurde am Pegel Kordel der bisher gemessene Höchststand von 480 cm um rund 110 cm überschritten. Auch am Pegel Prümzurlay wurde der Höchststand von 698 cm am Morgen des 15.07. erreicht, der sogar rund 200 cm über dem bisher gemessenen Höchststand von 490 cm lag. Während des Ereignisses lieferte der Pegel Prümzurlay ab einem Wasserstand von 587 cm keine Daten mehr, da die Datenfernübertragung des Pegels (vermutlich durch Stromausfall bzw. Zusammenbruch des Mobilfunknetzes) gestört wurde (Abbildung 10).

Die Stauseen an der oberen Kyll (Kronenburger See) und an der Prüm (Bitburger Stausee) beeinflussten das Hochwasserereignis vor allem im Anstieg der Hochwasserwelle. Am Kronenburger See führten die extremen Zuflüsse am Abend des 14.07. zu großen Abgaben über die Betriebsschütze und die Hochwasserentlastung, was zu Schäden in den Unterliegerorten führte. Auch am Bitburger Stausee wurden die Wassermassen über die Hochwasserentlastung abgeführt.

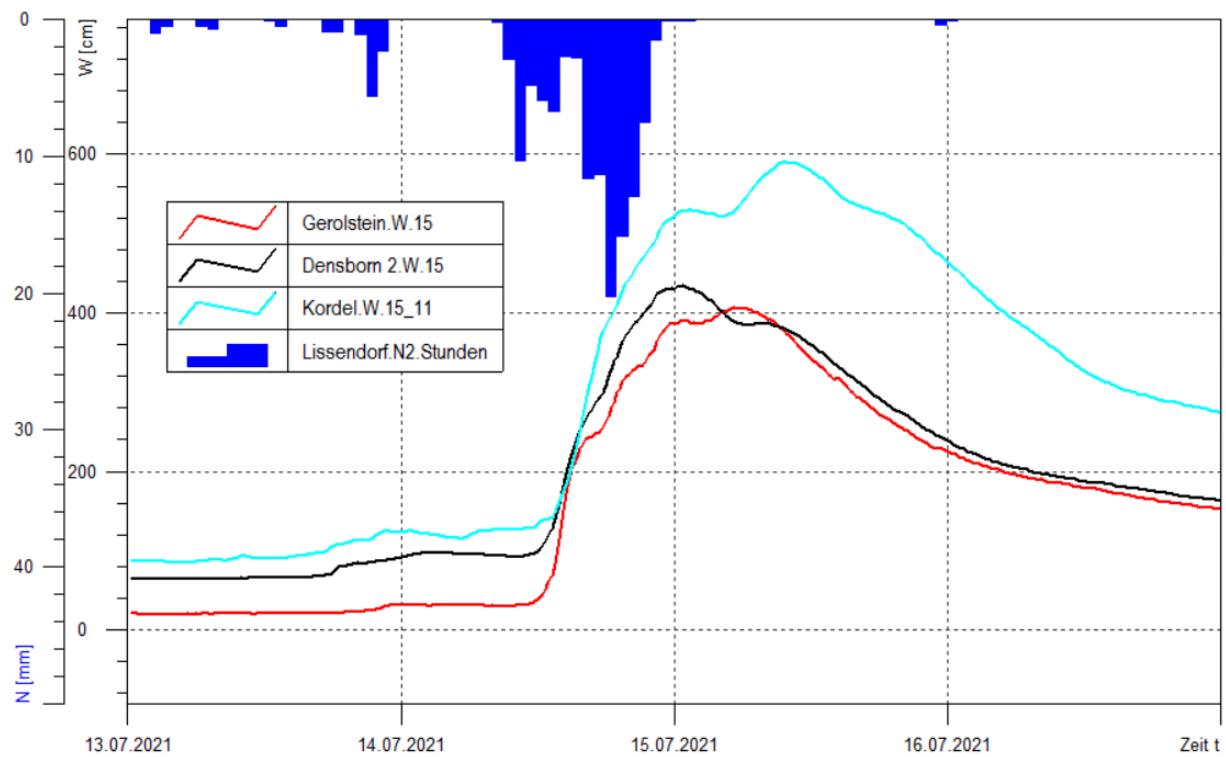


Abbildung 9: Niederschlag an der Messstation Lissendorf und Abflussreaktion an drei Pegeln an der Kyll.

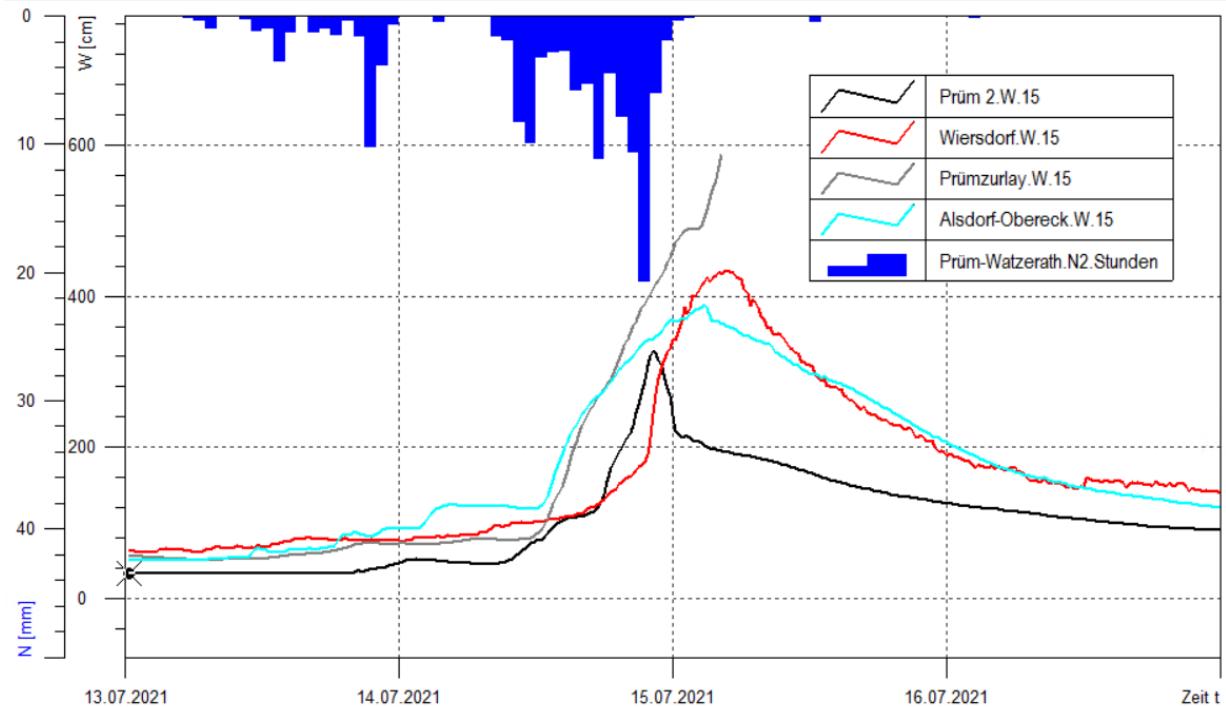


Abbildung 10: Niederschlag an der Messstation Prüm-Watzerath und Abflussreaktion an vier Pegeln im Prüm-Einzugsgebiet.

2.5 Ausfälle und Zerstörung von Pegelstationen

In der Nacht vom 14. auf den 15.07. war die Datenfernübertragung der gemessenen Wasserstandsdaten für zahlreiche Pegel unterbrochen. Hintergrund waren großflächige Ausfälle der Stromversorgung und des Mobilfunknetzes. Da die Datenlogger an den meisten Pegeln nicht zerstört wurden, konnten die Wasserstandsdaten für die Nacht vom 14. auf dem 15.07. im Nachgang an zahlreichen Pegeln jedoch noch abgerufen werden.

Im Einzugsgebiet der Ahr wurden die Pegel Müsch/Ahr, Altenahr/Ahr und Kreuzberg/Sahrbach komplett zerstört. An acht weiteren Pegeln in der Eifel wurden durch die Wassermassen z.T. massive Schäden verursacht.

Die Wasserstandsaufzeichnung am Pegel Müsch/Ahr endete am 14.07. um 19:15 Uhr MESZ bei 395 cm (redundanter Geber), wobei bereits um 15:30 Uhr MESZ der Hauptgeber ausgefallen war und am Nachmittag die Datenfernübertragung infolge des vorübergehenden Ausfalls des Strom- und/oder Mobilfunknetzes unterbrochen war, so dass die Pegeldaten nicht zur Verfügung standen. Der Abbruch der Wasserstandsaufzeichnung am Pegel Altenahr/Ahr trat am 14.07. um 20:45 Uhr MESZ bei 575 cm ein. Am Pegel Bad Bodendorf/Ahr brach die Wasserstandsaufzeichnung am 15.07. um 3:45 Uhr MESZ bei 483 cm ab.

Die Instandsetzungsarbeiten an einigen beeinträchtigten Pegeln einschließlich der Räumung der Messstrecken dauern zum Zeitpunkt der Berichtserstellung noch an. Da der Pegel Müsch/Ahr aufgrund der Bedingungen vor Ort nicht am alten Standort wiederaufgebaut werden kann, wurde ein neuer Standort flussaufwärts bestimmt. Für die Pegel Müsch und Kreuzberg müssen neue Abflusskurven – es liegen noch keine gewässerkundlichen Messwerte vor – rechnerisch hydraulisch ermittelt werden. Bis zur Inbetriebnahme neuer Pegelstationen wurden simulierte Wasserstände aus dem operationellen Wasserhaushaltsmodell LARSIM (LARSIM-ENTWICKLERGEMEINSCHAFT 2022) veröffentlicht.

Von den 42 in Tabelle 5 aufgeführten Messstellen des Landespegelnetzes waren 23 bei der Evaluierung der Pegel gemäß der „Handlungsempfehlungen zur weiteren Verbesserung von Grundlagen und Qualität der Hochwasservorhersage an den deutschen Binnengewässern“ (LAWA 2021) als „hochwasserrelevant“ eingestuft worden. Alle 23 Pegel waren/sind redundant ausgestattet, was den Messwertgeber, den Datensammler, die Stromversorgung und die Datenfernübertragung betrifft. Bis auf Nettegut/Nette waren alle 23 Pegel durch verschiedene Maßnahmen für ein 100-jährliches Hochwasserereignis gesichert, davon 17 zusätzlich gegen ein Extremereignis, wobei das bis zum Ereignis im Juli maßgebliche Extremereignis je nach Pegel statistisch einem 200-jährlichen bis 1000-jährlichen Ereignis entspricht.

Eine Untersuchung der tatsächlich vorhandenen Ausfallsicherheit für einige Pegel, die in der Flutnacht von Datenausfall oder Zerstörung betroffen waren, ergibt zum Zeitpunkt der Berichterstellung folgendes Bild: Von den Pegeln Müsch/Ahr und Altenahr/Ahr wurde der Wasserstand bis zu einer Höhe aufgezeichnet, die um 96 cm (Musch) bzw. 164 cm (Altenahr) über den zugehörigen Wasserstand des bisherigen statistischen Extremereignisses hinausging, bevor die Pegel durch die Wassermassen zerstört wurden. Der Pegel Echtershausen/Prüm fiel bei einem Wasserstand aus, der 9 cm unter dem Extremereignis lag. Der Pegel Prüm 2/Prüm zeichnete bis 114 cm und der Pegel Gerolstein/Kyll bis 60 cm über dem bisherigen Extremereignis auf. Nach derzeitigem Kenntnisstand spielte der Ausfall der Strom- und Mobilfunknetze in der Flutnacht eine große Rolle, was die Ursachen für die zeitweilige Störung oder den kompletten Abbruch der Datenfernübertragung an den Pegeln betrifft. Ohne die obigen Aussagen für alle 42 Pegel verallgemeinern zu können, haben sich die bisherigen Maßnahmen zur Verbesserung der Ausfallsicherheit (redundante Ausstattung, Höherle-

gung von Messtechnik und elektrischen Equipment in den Pegelhäusern) bewährt. Eine umfassende Aufarbeitung und das Festlegen individueller Maßnahmen zur weiteren Optimierung an den Pegeln, auch im Hinblick auf ein neu festzulegendes höheres Extremereignis und ausfallsichere Datenübertragung, sind seitens des Gewässerkundlichen Dienstes am LfU und bei der SGD Nord erforderlich.

2.6 Höchststände und Jährlichkeiten

Die in Tabelle 5 aufgelisteten Höchststände und Jährlichkeiten sind vorläufige Werte, da die Auswertung zum Zeitpunkt der Berichterstellung noch nicht abgeschlossen ist und die statistisch ermittelten Jährlichkeiten bei nachträglicher Änderung der vorläufigen Höchststände nochmals überarbeitet werden müssen. Für folgende Pegel mit fehlender Wasserstandsmessung wurden die Höchststände und zum Teil die Ganglinien rekonstruiert:

- Müsch, Altenahr und Bad Bodendorf an der Ahr,
- Kreuzberg am Sahrbach,
- Dreis an der Salm,
- Prümzulay und Echtershausen an der Prüm,
- Müllenborn am Oosbach,
- Seffern an der Nims,
- Gemünd am Irsen sowie
- Wernerseck und Nettegut an der Nette.

Die Rekonstruktion erfolgte anhand der Aufzeichnungen umliegender Pegel (auch in NRW) und der Einnivellierung von Geschwemmsellinien und Hochwassermarken (direkt nach der Flutkatastrophe durch das Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation). Für die so rekonstruierten Ganglinien wurden anschließend die Volumina geprüft und ggf. in weiteren Schritten die Ganglinien iterativ nachbearbeitet. Als zusätzliche Informationen wurden Luftbilder, Fotos und Videos vom Hochwassereignis genutzt. Bei vielen Pegeln mussten die Wasserstand-Abfluss-Beziehungen neu aufgestellt bzw. bis in extreme Bereiche hinein extrapoliert werden. Die Unsicherheiten sind besonders groß für die Pegel im Ahr-Einzugsgebiet (siehe auch ROGGENKAMP & HERGET 2022), da es hier neben den oben genannten Unsicherheitsfaktoren vielerorts zu zeitweiligen erheblichen Stau-Effekten nach Zerstörung und/oder Verklausung von Brücken durch Treibgut kam (vgl. Abschnitt 5.6).

Zur Ermittlung der Maximalabflüsse an den Pegeln im Ahr-Einzugsgebiet wurden drei verschiedene Ansätze verfolgt:

- a) Nachrechnung des Hochwassers mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM unter Verwendung unterschiedlicher Niederschlagsprodukte und mit unterschiedlichen Modelleinstellungen (vgl. Abschnitt 5.1 und Abschnitt 5.5)
- b) Klassische Betrachtungen von Abflussspenden und Abflussvolumina unter Verwendung der Daten aus 1-dimensionalen Wasserspiegellagenberechnungen und Querprofilen aus dem transnationalen TIMIS-Projekt zur Erstellung von Hochwassergefahrenkarten in Rheinland-Pfalz
- c) Abschätzung des mündungsnahen Maximalabflusses durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde mithilfe des SOBEK-Modells durch Betrachtung der Abflussdifferenzen zwischen den Rhein-Pegeln Bonn bzw. Oberwinter (nächstgelegener Abflusspegel im Rhein stromab der Ahrmündung) und dem Pegel Andernach (nächstgelegener Abflusspegel im Rhein stromauf der Ahrmündung)

Die Spannweiten des mit diesen drei Ansätzen abgeschätzten Maximalabflusses für die drei Hauptpegel Müsch, Altenahr und Bad Bodendorf sind beträchtlich (Tabelle 5).

Die statistische Einordnung des Juli-Hochwassers ist aufgrund dessen enormer Größenordnung bei vielen Pegeln vom Grundsatz her problematisch. An allen 23 „hochwasserrelevanten“ Pegeln wurde der bisher gültige Wert eines Extremereignisses überschritten, an den Pegeln Müsch/Ahr bzw. Altenahr/Ahr sogar um das zwei bis dreifache bzw. drei bis vierfache. Lediglich an sieben der 42 Pegel in Tabelle 5 lagen die Höchststände niedriger als das bisherige 100-jährliche Hochwasser (HQ100).

Bei denjenigen Pegeln, an denen der Scheitelabfluss im Juli 2021 ein Mehrfaches des bisherigen HQ-Wertes beträgt, lässt sich aus hydrologischer Sicht keine sinnvolle Jährlichkeit ermitteln, wenn die statistische Einordnung auf der Grundlage der bisher gültigen Hochwasserstatistik (also ohne das Jahr/ Ereignis von 2021) erfolgt. Es lässt sich auch keine theoretische Verteilungsfunktion an die bis 2021 verlängerte Zeitreihe anpassen, denn das Ereignis von 2021 liegt bei allen Funktionen weit außerhalb des Vertrauensbereiches.

Tabelle 5: Höchststände der Hochwasser in der Eifel am 14./15.07.2021 (teilweise vorläufig).

| Pegel | EZG [km ²] | W [cm] | Q [m ³ /s] | Datum Uhrzeit [MESZ] | Jährlichkeit (Reihe) |
|----------------------------|---------------------------|-----------|--------------------------|-------------------------|--|
| Ahr-EZG | | | | | |
| Müsch | 353 | 625 ± 20 | 440-510 | 14.07.2021 ca. 22:00 | >HQ500 (geschätzt) |
| Altenahr | 747 | 1000 ± 20 | 750-1000 | 15.07.2021 ca. 02:00 | ca.HQ850 (1947-2021) (mit Daten von Pegel Reimerzhoven) |
| Bad Bodendorf | 861 | 480 ± 10 | 710-1400 | 15.07.2021 04:30 | ca.HQ500 (1995-2021) |
| Kirmutscheid/Trierbach | 88 | 307 | 127 | 14.07.2021 20:00 | K.A. |
| Niederadenau/Adenauer Bach | 57 | 204 | 40,4 | 14.07.2021 22:45 | K.A. |
| Denn/Kesselinger Bach | 95 | 293 | 69,2 | 14.07.2018 23:45 | K.A. |
| Kreuzberg/Sahrbach | 46 | 500 | 158 | 14.07.2021 ca. 19:00 | K.A. |
| Brohlbach | | | | | |
| Zerwasmühle | 77 | 82 | 9,81 | 14.07.2021 20:00 | ca. HQ20 (2012-2021) |
| Nette | | | | | |
| Wernerseck | 242 | 253 | 102 | 15.07.2021 06:15 | HQ150 (1973-2021) |
| Nettegut | 368 | 353 | 109 | 15.07.2021 09:00 | HQ230 (1954-2021) |
| Elzbach | | | | | |
| Elztal | 219 | 251 | 69,2 | 15.07.2021 06:15 | HQ160 (1973-2021) (mit Daten von Pegel Lohbrücke) |
| Endertbach | | | | | |
| Cochem 2 | 59 | 91 | 9,77 | 15.07.2021 02:15 | HQ2-HQ5 (1977-2021) |

| Pegel | EZG [km ²] | W [cm] | Q [m ³ /s] | Datum Uhrzeit [MESZ] | Jährlichkeit (Reihe) |
|----------------------------|---------------------------|-----------|--------------------------|-------------------------|--|
| Alf-EZG | | | | | |
| Hasborner Mühle/Sammetbach | 22 | 90 | 11,6 | 15.07.2021 01:45 | HQ10 – HQ15 (1973-2021) |
| Peltzerhaus/Üssbach | 176 | 241 | 54,2 | 15.07.2021 01:15 | HQ30-HQ40 (1956-2021) |
| Saxler Mühle | 40 | 214 | 21,7 | 15.07.2021 01:30 | HQ120 (1973-2021) |
| Bengel | 138 | 214 | 40 | 15.07.2021 12:15 | HQ10-HQ15 (2003-2021) (mit Daten von Pegel Höllenthal) |
| Salm | | | | | |
| Eisenschmitt | 50 | 248 | 58,9 | 14.07.2021 22:30 | > HQ100 (1967-2020) |
| Dreis 2 | 192 | 403 | 138 | 15.07.2021 00:15 | > HQ100 (1973-2020) |
| Kyll-EZG | | | | | |
| Hallschlag/Taubkyll | 25 | 211 | 31,7 | 14.07.2021 23:45 | > HQ100 (1979-2011) |
| Duppach 2/Oosbach | 23 | 208 | 65,8 | 14.07.2021 22:00 | > HQ100 (1973-2007) |
| Müllenborn/Oosbach | 63 | 390 | 138 | 14.07.2021 22:30 | >HQ100 (1973-2007) |
| Steinebrück | 48 | 205 | 59,2 | 14.07.2021 22:45 | >HQ100 (1979-2020) |
| Kronenburg UP | 80 | 509 | 86,2 | 15.07.2021 01:30 | > HQ100 (HQ-Regio) |
| Jünkerath | 176 | 369 | 202 | 15.07.2021 00:45 | > HQ100 (1973-2020) |
| Gerolstein | 301 | 407 | 231 | 15.07.2021 07:30 | >HQ100 (1977-2020) |
| Densborn | 472 | 435 | 407 | 15.07.2021 01:45 | >HQ100 (1973-2020) |
| Kordel | 819 | 594 | 620 | 15.07.2021 10:30 | >HQ100 (1968-2021) |
| Lieser | | | | | |
| Daun | 43 | 269 | 73,7 | 14.07.2021 21:00 | HQ60 (1978-2021) |
| Plein | 275 | 363 | 189 | 15.07.2021 02:00 | HQ120 (1988-2021) |
| Platten 2 | 378 | 363 | 212 | 15.07.2021 04:45 | HQ150 (1973-2021) |
| Nims | | | | | |
| Giesdorf | 18 | 180 | 32,0 | 14.07.2021 22:00 | > HQ100 (1958-2011) |
| Seffern | 136 | 397 | 201 | 15.07.2021 00:15 | > HQ100 (1974-2011) |
| Alsdorf-Oberecken | 264 | 388 | 280 | 15.07.2021 03:45 | >HQ100 (1957-2011) |
| Prüm-EZG | | | | | |
| Sinspelt/Enz | 101 | 255 | 116 | 15.07.2021 01:30 | HQ110 (1976-2021) |
| Prüm 2 | 53 | 327 | 118 | 14.07.2021 23:15 | >HQ100 (1976-2011) |
| Echtershausen | 327 | 420 | 431 | 15.07.2021 05:30 | >HQ100 (1973-2018) |
| Wiersdorf | 341 | 435 | 436 | 15.07.2021 05:45 | >HQ100 (1973-2018) |
| Prümzurlay | 574 | 698 | 596 | 15.07.2021 12:30 | >HQ100 (1973-2018) |

| Pegel | EZG [km ²] | W [cm] | Q [m ³ /s] | Datum Uhrzeit [MESZ] | Jährlichkeit (Reihe) |
|------------------|---------------------------|-----------|--------------------------|-------------------------|----------------------|
| Our und Sauer | | | | | |
| Gemünd/Irsen | 125 | 262 | 111 | 15.07.2021 03:15 | HQ280 (1977-2021) |
| Gemünd/Our | 613 | 477 | 418 | 15.07.2021 11:30 | HQ150 (1973-2021) |
| Bollendorf/Sauer | 3222 | 635 | 913 | 15.07.2021 16:30 | HQ70 (1959-2021) |
| Rosport/Sauer* | 4232 | 967 | 1625 | 15.07.2021 12:00 | > HQ100 |

*Datenquelle für Pegel Rosport/Sauer: Administration de la gestion de l'eau Luxembourg

Vorläufige Varianten-Berechnungen für Pegel Altenahr/Ahr haben gezeigt, dass hydrologisch belastbare Rechenergebnisse für die statistischen Hochwasserabflüsse nur dann zustande kommen, wenn bei der Berechnung zusätzliche Verfahren zur Erweiterung der Informationsgrundlagen eingesetzt werden. Der Analyse und Berücksichtigung historischer Hochwassereignisse kommt dabei eine große Bedeutung zu. An Pegeln in den Regionen, bei denen größere Hochwasserabflüsse verstärkt in den Sommermonaten auftreten, können alternativ so genannte Mischverteilungen (d.h. getrennte Verteilungsfunktionen für Winter- und Sommerhalbjahr) angewandt werden. Letztlich wird die konkrete Datensituation darüber entscheiden, welche Methode zielführend ist.

Für Pegel Altenahr/Ahr und Bad Bodendorf/Ahr wurden unter Annahme vorläufiger Scheitelabflüsse und unter Einbeziehung der rekonstruierten bzw. daraus abgeleiteten historischen Hochwassereignisse von 1804, 1888, 1910, 1918 und 1920 (ROGGENKAMP & HERGET 2014, ROGGENKAMP & HERGET 2015) neue vorläufige statistische Hochwasserabflüsse berechnet. Eine erste Einordnung des Juli-Ereignisses ergab für Pegel Altenahr eine Jährlichkeit von ca. 850 Jahren unter der Annahme eines Scheitelabflusses von 1.000 m³/s und für den Pegel Bad Bodendorf eine Jährlichkeit von ca. 500 Jahren unter der Annahme eines Scheitelabflusses von 1.100 m³/s. Für beide Pegel wurde das statistische Verfahren der Allgemeinen Extremwertverteilung für die Anpassung verwendet. Die Anwendung einer Mischverteilung dagegen ergab für Pegel Altenahr eine Jährlichkeit zwischen 450 und 550 Jahren. Abschließende Berechnungen mit den endgültig festgelegten Scheitelabflüssen stehen noch aus. VOROGUSHYN ET AL. (2022) schätzen die Jährlichkeit des Scheitelabflusses am Pegel Altenahr mittels generalisierter Extremwertverteilung und unter Berücksichtigung historischer Hochwasser auf 850 bis 9000 Jahre mit einem Median von rund 2000 Jahren.

Für die Pegel im Einzugsgebiet von Sauer, Our, Lieser, Alf und Nette sowie am Brohlbach, Endertbach und Elzbach wurden ebenfalls bereits vorläufige statistische Auswertungen unter Einbeziehung des Juli-Hochwassers, jedoch ohne Berücksichtigung (noch unbekannter) historischer Hochwasser, vorgenommen.

Für andere betroffene Pegel in Rheinland-Pfalz wie die Pegel an den Ahrzuflüssen, der Kyll, der Prüm, der Nims und der Salm wurden die Hochwasserstatistiken noch nicht aktualisiert. Bezogen auf die bisher gültigen statistischen Werte liegen die Jährlichkeiten bei den meisten dieser Pegel in unrealistischen Größenordnungen, jedoch vorläufig geschätzt bei mindestens 100 Jahren. Die Angabe „> 100 Jahre“ in der Spalte „Jährlichkeit (Reihe)“ ist also nicht in erster Linie quantitativ zu verstehen, sondern als Hinweis auf die oben beschriebene Problematik gedacht. Für den Pegel Kordel an der Kyll wurde zwar eine vorläufige statistische Auswertung unter Einbeziehung des Juli-Hochwassers durchgeführt, allerdings gibt es derzeit noch größere Unsicherheiten bezüglich der W-Q-

Beziehung nach dem Ereignis. Deshalb wird auch bei Pegel Kordel die Jährlichkeit vorerst mit „>100 Jahre“ angegeben.

Der Pegel Kronenburg UP an der Kyll gehört nicht zum gewässerkundlichen Pegelnetz und wird deshalb nicht hochwasserstatistisch ausgewertet. Für diesen Pegel erfolgte eine vorläufige Einordnung anhand der regionalisierten statistischen Hochwasserabflüsse (HQ-Regio).

3 HOCHWASSERVORHERSAGEN

In der Hochwasservorhersagezentrale (HVZ) des Landesamts für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU) werden die Wasserstandsvorhersagen für alle Flüsse außer den Rhein mit dem hydrologischen Wasserhaushaltsmodell LARSIM berechnet und regulär alle drei Stunden, das heißt mit jeder neuen Kurzfrist-Wettervorhersage des Deutschen Wetterdienstes (DWD), aktualisiert. In LARSIM sind die Gebietseigenschaften (u.a. Relief, Landnutzung und aktuelle Bodenfeuchte) in hoher räumlicher Auflösung abgebildet. Im Hochwasserfall werden in der HVZ zusätzlich zu den automatischen Vorhersageberechnungen weitere Berechnungen durchgeführt (z. B. unter Verwendung unterschiedlicher Niederschlagsdaten und unterschiedlicher Einstellungen des hydrologischen Modells). Zeichnet sich kurzfristig eine Änderung in den vorhergesagten Wasserständen ab, dann werden die Vorhersagen häufiger als alle drei Stunden veröffentlicht.

In den nachfolgenden Kapiteln wird – nach einem kurzen Abriss zu den Vorhersagen am Rhein – für die Mosel, Sauer und die Eifel-Flüsse beispielhaft gezeigt, welche Herausforderungen bei der Wasserstandsvorhersage bestehen und inwieweit die am 14./15.07. tatsächlich eingetretenen Höchststände mit den verfügbaren Daten vorhersagbar waren.

In der HVZ stehen für die Wasserstandsvorhersage zu einem bestimmten Vorhersagezeitpunkt (VZP) für einen Vorhersagezeitraum von 48 Stunden insgesamt 26 Wettervorhersagen zur Verfügung. Neben der ICON-D2-Kurzfristwettervorhersage des DWD sind dies 20 ICON-D2-EPS-Ensemblevorhersagen (= 20 mögliche Wetterentwicklungen mit gleicher Wahrscheinlichkeit), die AROME- und ARPEGE-Wettervorhersagen von Météo-France, die ICON-EU-Mittelfristwettervorhersage des DWD, die ICON-Langfristvorhersage des DWD sowie die ECMWF-Langfristvorhersage aus Großbritannien. Da die Kurzfristvorhersagen deutlich häufiger berechnet und bereitgestellt werden, dabei die aktuellsten Klimamessdaten berücksichtigt werden und Kurzfristvorhersagen konvektionsbedingte Starkniederschläge besser abbilden als Mittel- und Langfristvorhersagen, werden in der HVZ für die kommenden 48 Stunden in der Regel die 22 Kurzfristvorhersagen (ICON-D2-EPS und ICON-D2 des DWD sowie AROME von Météo-France) verwendet.

Der vorhergesagte Wasserstandsverlauf wird im Internet für die Pegel an den großen Flüssen Rhein, Mosel, Sauer, Saar, Nahe, Glan, Lahn und Sieg bei Meldediensteröffnung als durchgezogene Linien dargestellt und als „Vorhersage“ bezeichnet. Für Pegel an kleineren Flüssen wird der vorhergesagte Wasserstandsverlauf lediglich als gepunktete Linie für maximal 24 Stunden dargestellt und als „Abschätzung“ bezeichnet (Abbildung 18), da dort die Vorhersagen eine geringere Verlässlichkeit haben als an den großen Flüssen. Im Folgenden wird nicht zwischen Abschätzung und Vorhersage unterschieden. Zukünftig werden die Wasserstandsvorhersagen mit einem Unsicherheitsband dargestellt, so dass dann keine Unterscheidung zwischen Vorhersage und Abschätzung mehr notwendig ist.

3.1 Vorhersagen für den Rhein

In der HVZ Rhein wird für die Hochwasservorhersage das hydrodynamische WAVOS-Modell der Bundesanstalt für Gewässerkunde eingesetzt. Im Juni und Juli 2021 wurden für den Rhein an insgesamt 23 Tagen Hochwasserberichte erstellt und verbreitet (Abbildung 6), darunter sieben sogenannte „Hochwasserinformationen“. Hochwasserinformationen werden dann verbreitet, wenn der Wasserstand an den Meldepeginen unterhalb oder im Bereich der Meldehöhe bzw. Schlussmeldehöhe liegt und kein Meldedienst notwendig ist, es aber dennoch einen Informationsbedarf zur kommenden oder ablaufenden Hochwasserwelle gibt.

Insgesamt wurden die tatsächlich erreichten Höchststände an den Rheinpegeln sowohl quantitativ als auch zeitlich gut vorhergesagt. Für den Pegel Maxau konnte der am 17.07. um 16:15 Uhr gemessene Höchststand von 865 cm drei Tage vor Eintritt in seiner Höhe sehr präzise, zeitlich jedoch etwas zu früh vorhergesagt werden. Für den Pegel Mainz wurde der am 19.07. um 02:00 Uhr gemessene Höchststand von 568 cm noch zwei Tage vor Eintritt leicht überschätzt und einige Stunden später vorhergesagt als eingetreten.

Mit Eröffnung des Meldedienstes für den Mittel- und Niederrhein am 14.07. wurde der Höchststand der Rheinwelle am Pegel Koblenz mit einer Spanne von 660 bis 670 cm angegeben, bei einem erreichten Wert von 661 cm am 16.07. um 16 Uhr. Die seit dem 14.07. fehlenden Wasserstandsmesswerte des Pegels Altenahr wurden im Vorhersagemodell für den Rhein durch Modellsimulationen der HVZ ersetzt, so dass die Vorhersageberechnungen für den Mittel- und Niederrhein lückenlos durchgeführt werden konnten.

Im Verlauf des Rheinhochwassers wurden zwischen Basel und Worms mit dem Polder Erstein (Frankreich), dem Kulturwehr Kehl und dem Polder Altenheim (beide Baden-Württemberg) drei gesteuerte Rückhaltemaßnahmen eingesetzt. Die Auswirkungen dieser Retentionsmaßnahmen wurden in den Wasserstandsvorhersageberechnungen der HVZ der LUBW in Karlsruhe (bis einschließlich Pegel Worms) und somit auch in den Hochwasservorhersagen der HVZ Mainz (ab dem Pegel Mainz) berücksichtigt.

3.2 Vorhersagen für die Mosel und die Sauer

In den ICON-D2-Niederschlagsvorhersagen des Deutschen Wetterdienstes vom 13.07. wurden sehr hohe Niederschlagsmengen für die Obermosel, das französische Mosel- und das Saar-Einzugsgebiet vorhergesagt, so dass zunächst deutlich mehr Abfluss von der Obermosel und der Saar erwartet wurde. Am 14.07. lagen die vorhergesagten und schließlich auch gefallenen Niederschlagsmengen in diesen Regionen viel niedriger, so dass an der Saar die Meldehöhe von 390 cm am Pegel Fremersdorf nicht erreicht wurde. Im Hochwasserbericht der Eröffnungsmeldung am 14.07. wurde für den Pegel Trier ein möglicher Anstieg des Wasserstands bis in den Bereich von 900 cm am 15.07. formuliert. Der Wasserstand am Pegel Trier lag zu diesem Zeitpunkt noch unter 400 cm.

Die Niederschlagsvorhersagen für das nördliche Moseleinzugsgebiet wiesen auch am 14.07. noch große Unsicherheiten auf. Die vorhergesagten Niederschlagsmengen und ihr räumliches Auftreten variierten deutlich. Am Beispiel der Wasserstandsvorhersage mit VZP 07:00 Uhr MEZ für den Pegel Rosport wird im Folgenden erläutert, welche Herausforderungen bei der Modellierung auftraten. In Abbildung 11 sind beispielhaft die Variantenrechnungen für den Pegel Rosport dargestellt, die am Morgen des 14.07. für den VZP 07:00 Uhr MEZ mit dem LARSIM-Modell vorgenommen wurden.

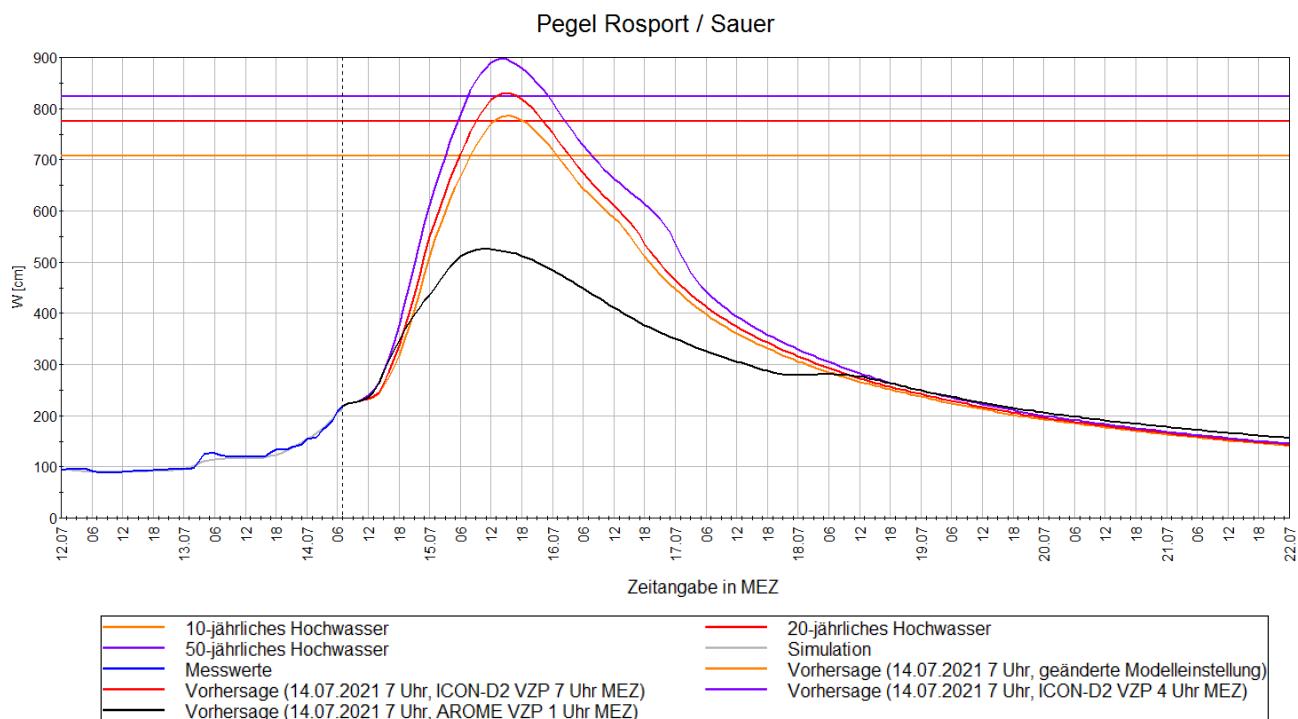


Abbildung 11: Wasserstandsvorhersagen am 14.07. mit VZP 07:00 Uhr am Pegel Rosport (lila: mit ICON-D2 VZP 04:00, rot: mit ICON-D2 VZP 07:00, orange: geänderte Modelleinstellung, schwarz: AROME VZP 01:00), alle Zeitangaben in MEZ.

Die lilafarbene Ganglinie stellt die Vorhersage des automatischen LARSIM-Modelllaufs auf Grundlage der ICON-D2-Vorhersage mit dem VZP 04:00 Uhr MEZ dar. Normalerweise wird für diesen Lauf die aktuelle Wettervorhersage mit VZP 07:00 Uhr MEZ verwendet, doch diese lag zum automatischen Berechnungsbeginn noch nicht vor. Manuell wurden drei Varianten gerechnet: die rote Ganglinie basiert auf der verspätet eingegangenen aktuellen ICON-D2-Vorhersage mit VZP 07:00 Uhr MEZ, die orangefarbene Ganglinie ist das Resultat einer Vorhersageberechnung mit einer für diesen Lauf nur leicht geänderten Modelleinstellung und die schwarze Ganglinie zeigt die Wasserstandsvorhersage mit der zu diesem Zeitpunkt aktuellen französischen AROME-Wettervorhersage von Meteo-France mit einem VZP 01:00 Uhr MEZ. Allein diese drei verwendeten Wettervorhersagen bewirkten bei den vorhergesagten Höchstständen eine Spannweite von fast vier Metern am Sauer-Pegel Rosport.

Die Ensemble-Läufe auf Basis der ICON-D2-EPS des DWD wurden auch bei diesem Ereignis in die Bewertungen der Wasserstandsvorhersagen einbezogen. Aufgrund der hohen Unsicherheiten wurde mit der Veröffentlichung der Vorhersagen gewartet, bis die Berechnungsergebnisse dieser Modellläufe vorlagen. In Abbildung 12 sind die oben beschriebenen Wasserstandsvorhersagen im Vergleich zu den Ensemble-Vorhersagen mit VZP 07:00 Uhr MEZ dargestellt.

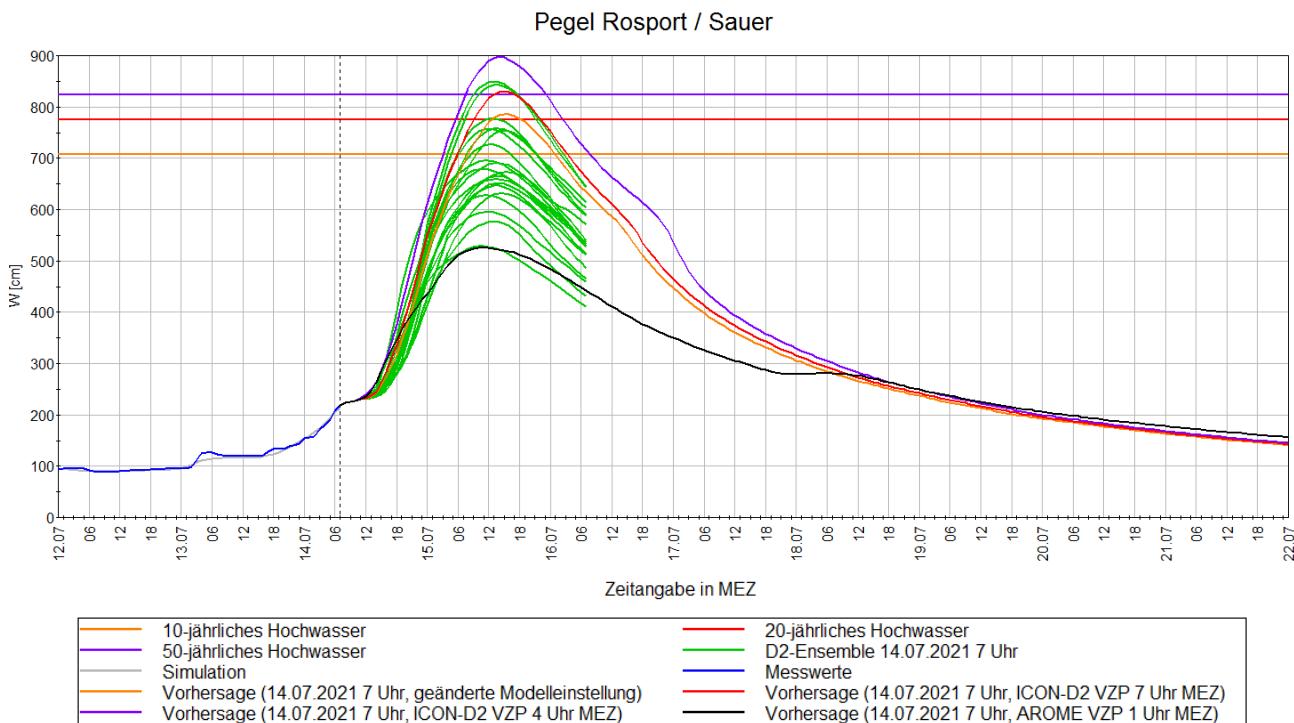


Abbildung 12: Wasserstandsvorhersagen am 14.07. mit VZP 07:00 Uhr und Darstellung des Vorhersageensembles am Pegel Rosport (lila: mit ICON-D2 VZP 04:00, rot: mit ICON-D2 VZP 07:00, orange: geänderte Modelleinstellung, schwarz: AROME VZP 01:00, grün: Ensemble VZP 07:00); alle Zeitangaben in MEZ.

Diese Ensemble-Wasserstandsvorhersagen mit VZP 07:00 Uhr wiesen eine Spannweite von über drei Metern auf. Aus Abbildung 12 ist ersichtlich, dass die französische AROME-Wettervorhersage mit VZP 01:00 MEZ (schwarze Linie) zu einer Wasserstandsvorhersage von nur rund 5 m führte und damit am unteren Rand der Ensemble-Spannweite lag. Die ICON-D2-Vorhersage mit VZP 04:00 Uhr (lila Linie) lag mit rund 9 m über der Ensemble-Spannweite, und die ICON-D2-Vorhersage mit VZP 07:00 Uhr (orange Linie) im oberen Drittel. Der vorhergesagte Niederschlagsinput nahm in dieser Region in den ICON-D2-Vorhersagen von VZP 04:00 Uhr über VZP 07:00 Uhr bis VZP 10:00 Uhr MEZ ab.

Im Hochwasserbericht am Morgen des 15.07. konnte der am Nachmittag am Pegel Trier erreichte Höchststand von 934 cm bis auf 6 cm genau vorhergesagt werden.

3.3 Vorhersagen für die Ahr

Im Laufe des 14.07. wurden für den Pegel Altenahr insgesamt zehn Wasserstandsvorhersagen mit Höchstständen zwischen 225 cm am Morgen des 14.07. und 707 cm am späten Abend als Abschätzung veröffentlicht (Abbildung 13). Diese weite Spanne der vorhergesagten Höchststände verdeutlicht die Unsicherheiten und damit auch die Grenzen der Vorhersagbarkeit extremer Hochwasser.

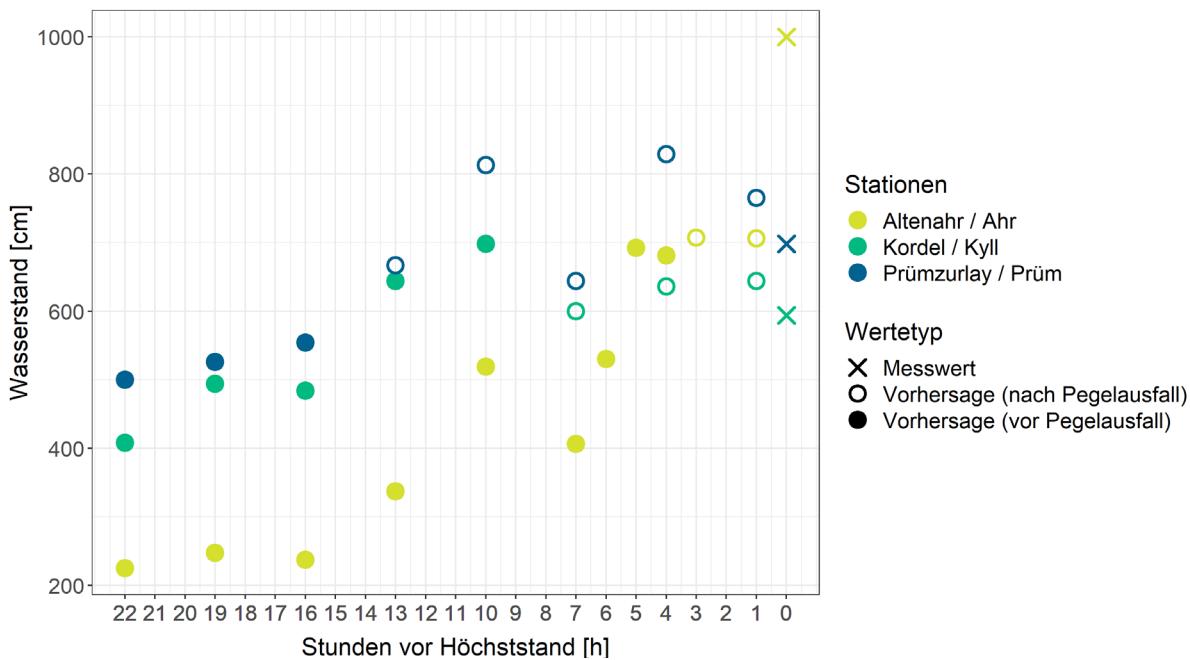


Abbildung 13: Vorhergesagte Höchststände für die Pegel Altenahr, Kordel und Prümzurlay für Vorhersagezeitpunkte vor dem gemessenen Höchststand („gemessener“ Höchststand für Altenahr rekonstruiert).

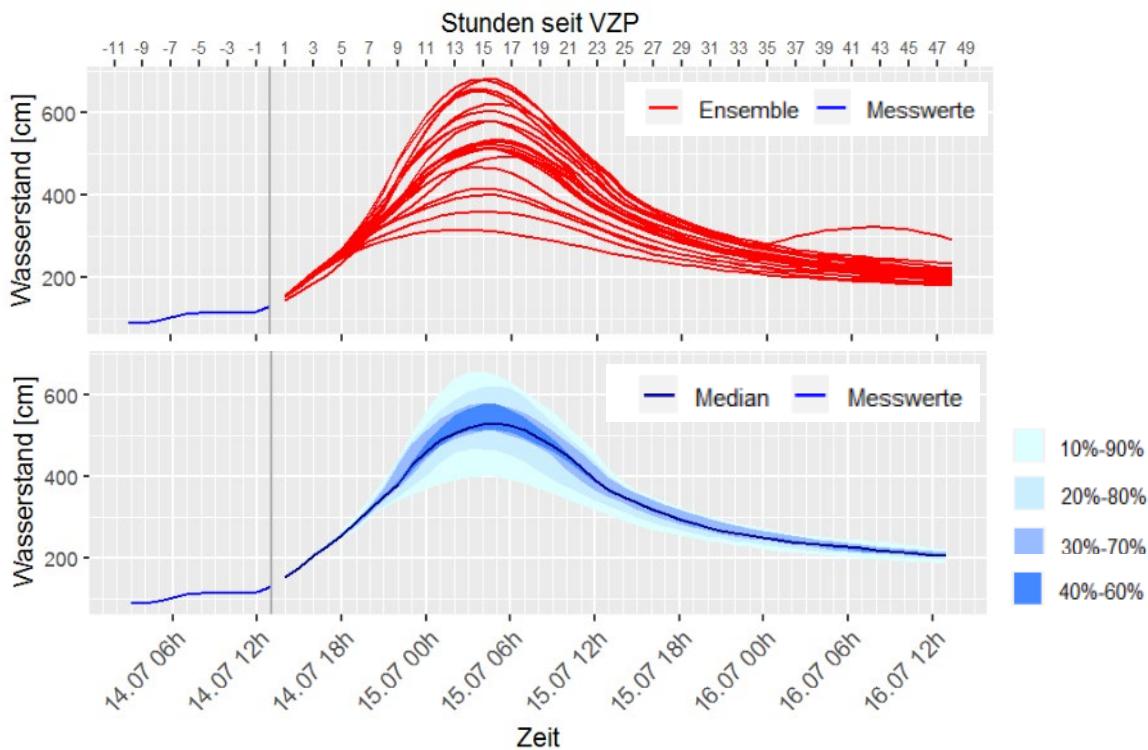


Abbildung 14: Spanne der Wasserstandsvorhersagen für den Pegel Altenahr zum Vorhersagezeitpunkt 14.07. 14:00 MESZ unter Verwendung von 20 Ensemble-Wettervorhersagen (ICON-D2-EPS); 20 Einzelvorhersagen (oben) und Quantildarstellung (unten).

Die Ursachen für die Vorhersageunsicherheit sind vielfältig. Bis zum späten Nachmittag des 14.07. wurden sie zunächst vor allem durch die Unsicherheiten der Wettervorhersagen bestimmt. Abbildung 14 zeigt die Ensemble-Wasserstandsvorhersagen für den Pegel Altenahr auf Basis der meteorologischen Vorhersagen des Modells ICON-D2-EPS des DWD für den Vorhersagezeitpunkt 14.07. 14 Uhr MESZ. Die Berechnungen zeigen für den Höchststand am Pegel Altenahr eine Spanne von mehr als 350 cm – allein aufgrund der Unterschiede im vorhergesagten Niederschlag zwischen den einzelnen Ensemblemitgliedern des Modells ICON-D2-EPS.

Die ICON-D2-Vorhersage vom 14.07. 17 Uhr MESZ lieferte gegenüber der vorherigen Wettervorhersage geringere Niederschlagssummen für das Ahrgebiet (Abbildung 17). Dies trug maßgeblich dazu bei, dass mit der um 18:25 Uhr MESZ veröffentlichten Abschätzung der zu erwartende Höchststand am Pegel auf 406 cm abgesenkt wurde. Dieser Wert liegt etwa einen Meter unter dem um 15:26 MESZ veröffentlichten Wert von 519 cm, jedoch noch deutlich über einem 100-jährlichen Hochwasser nach der zum damaligen Zeitpunkt geltenden Statistik. Im weiteren Verlauf des Abends wurde der zu erwartende Höchststand dann auf 530 bis 707 cm angehoben (Abbildung 13). Der im Nachhinein rekonstruierte Höchststand am Pegel Altenahr im Bereich von 1000 cm wurde in den Abschätzungen nicht erreicht.

Die Unterschiede in den Wettervorhersagen speziell für das Ahr-Einzugsgebiet werden anhand Abbildung 15, Abbildung 16 und Abbildung 17 veranschaulicht. Die stärksten Niederschläge im Ahr-Einzugsgebiet am Nachmittag und Abend des 14.07. kamen im Zusammenhang mit verstärkter Konvergenz- und Hebungsprozessen zustande, die durch die Entwicklung eines Randtiefdruckgebietes beeinflusst waren. Die Vorhersage der Lage und der Zugbahn dieses kleinräumigen Tiefdruckgebietes hat entscheidende Auswirkungen auf Ort und Zeit der höchsten vorhergesagten Niederschlagsmengen durch die Wettermodelle.

In Abbildung 15 wird deutlich, dass die zu erwartenden Niederschlagsmengen einige Stunden vor dem Ereignis nur schwer durch die Wettervorhersagen lokalisierbar waren. Das hochaufgelöste und konvektionsauflösende Modell ICON-D2 verortet die höchsten Niederschlagsmengen am 14.07. zwischen 14:00 und 20:00 Uhr MESZ je nach Vorhersagezeitpunkt sehr unterschiedlich. Die Vorhersage zeigt eine örtliche Schwankung, die sich entsprechend in den Wasserstandsvorhersagen fortsetzte. In der Vorhersage vom 13.07. VZP 08:00 Uhr ist für den Folgetag der Schwerpunkt der Niederschläge im Nahe-Einzugsgebiet zu finden. Zum Vorhersagezeitpunkt 14.07. VZP 02:00 Uhr, d.h. 12 Stunden vor dem betrachteten Niederschlagszeitraum, sind die höchsten Niederschlagsmengen für den Nachmittag westlich und zum Teil weit außerhalb von Rheinland-Pfalz vorhergesagt. Mit der Vorhersage am 14.07. um 08:00 Uhr fallen die höchsten Niederschläge dann in einem Streifen nordwestlich und nördlich des Ahr-Einzugsgebietes.

In Abbildung 16 wird die Spannweite der für das Ahr-Einzugsgebiet vorhergesagten Niederschlagsmengen im Vergleich zum gemessenen Gebietsniederschlag von rund 100 mm in 12 Stunden dargestellt. Es zeigt sich, dass die durch ICON-D2-EPS vorhergesagten Niederschlagsmengen niedriger, zum Teil sogar deutlich niedriger waren als der später gemessene Wert und dass die Unsicherheitsspanne sehr groß war. Zudem weisen die Ensemble-Vorhersagen eine zwischenzeitliche Abnahme der Maxima im Verlauf der Nacht auf den 14.07. auf. Bis zum Morgen des 14.07. lag der Median der 12h-Niederschlagssumme zwischen 45 und 65 mm und die deterministische ICON-D2-Vorhersage bei nur 40 mm mit dementsprechend niedrigen Wasserstandsvorhersagen für den Pegel Altenahr (Abbildung 13). Wie oben geschildert war die Wettervorhersageunsicherheit auch im Verlauf des 14.07. noch groß. Die vorhergesagten 6h-Niederschlagssummen für den Zeitraum zwischen 17:00 und 23:00 Uhr MESZ der ICON-D2-Vorhersage vom 14.07. 17 Uhr MESZ für das Ahr-Einzugsgebiet lagen deutlich unter den Niederschlagssummen der Wettervorhersage um 14:00 Uhr MESZ (Abbildung 17).

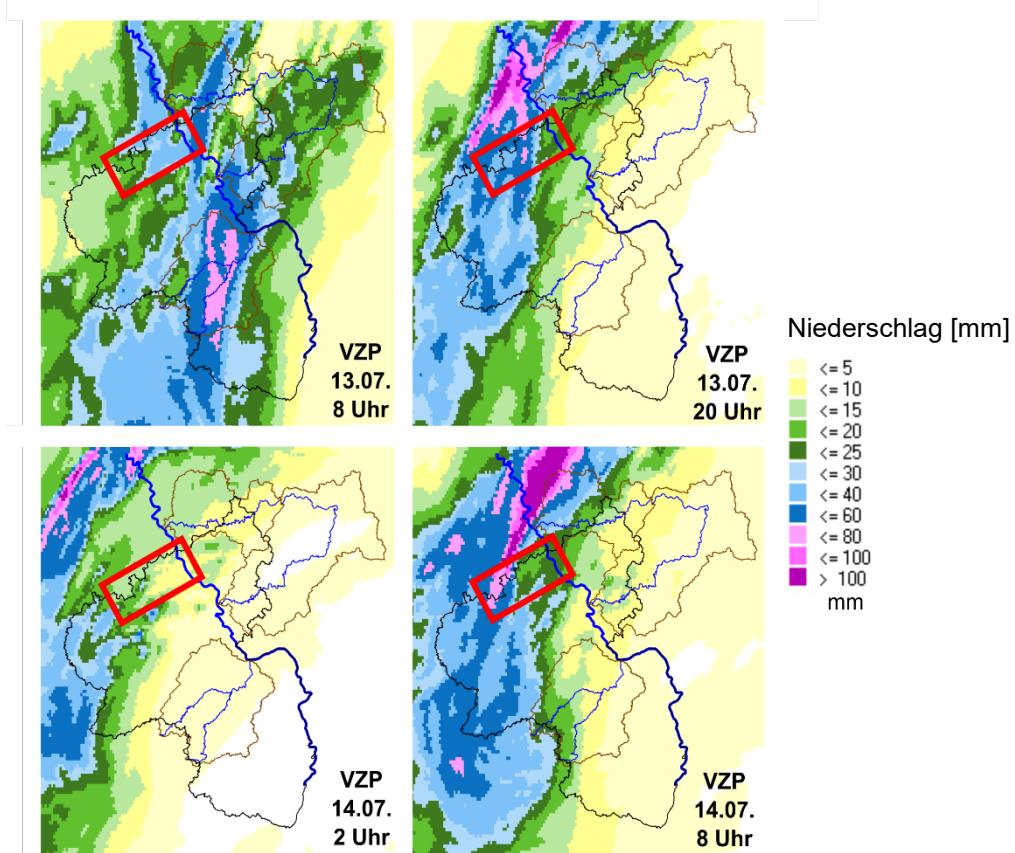


Abbildung 15: Wettervorhersagen des DWD (ICON-D2) zu unterschiedlichen Vorhersagezeitpunkten (VZP) mit 6h-Niederschlagssummen für den 14.07. 14:00 bis 20:00 Uhr (alle Zeiten in MESZ); rote Umrandung: Lage des Ahr-Einzugsgebiets.

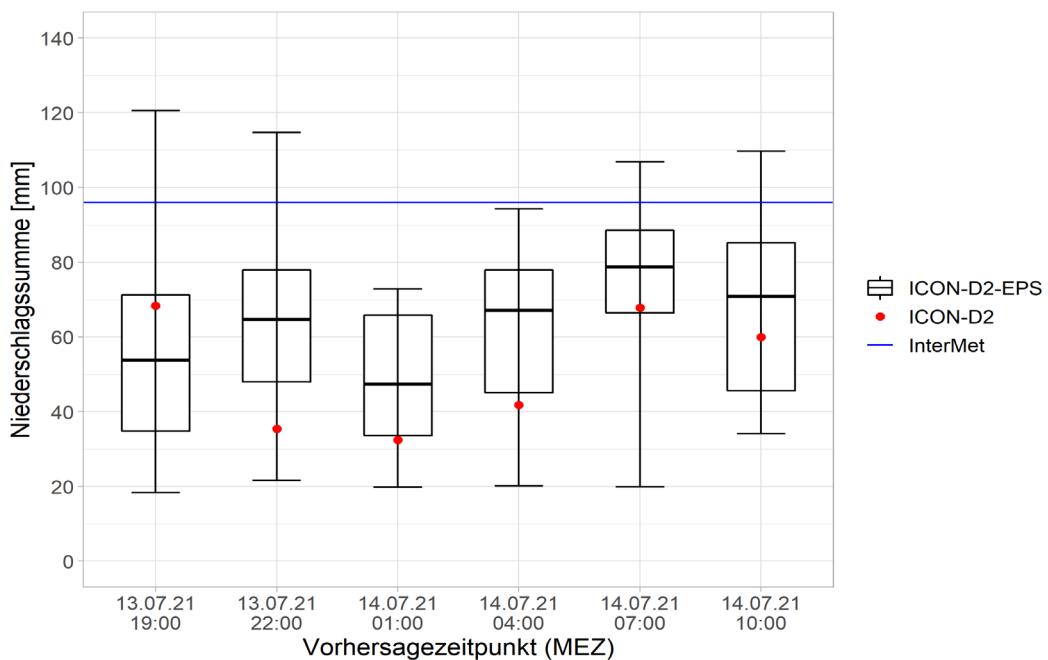


Abbildung 16: Spannweiten der vorhergesagten 12h-Niederschlagssummen für den 14.07. 10:00 bis 22:00 Uhr MEZ (Gebietsmittel) für das Ahr-Einzugsgebiet in den 20 Ensemble-Niederschlagsvorhersagen des DWD (ICON-D2-EPS) zu unterschiedlichen Vorhersagezeitpunkten; Vergleich zur ICON-D2-Vorhersage und zu gemessenen Werten (InterMet); (Boxplots: Minimum, 25%-Perzentil, Median, 75%-Perzentil, Maximum).

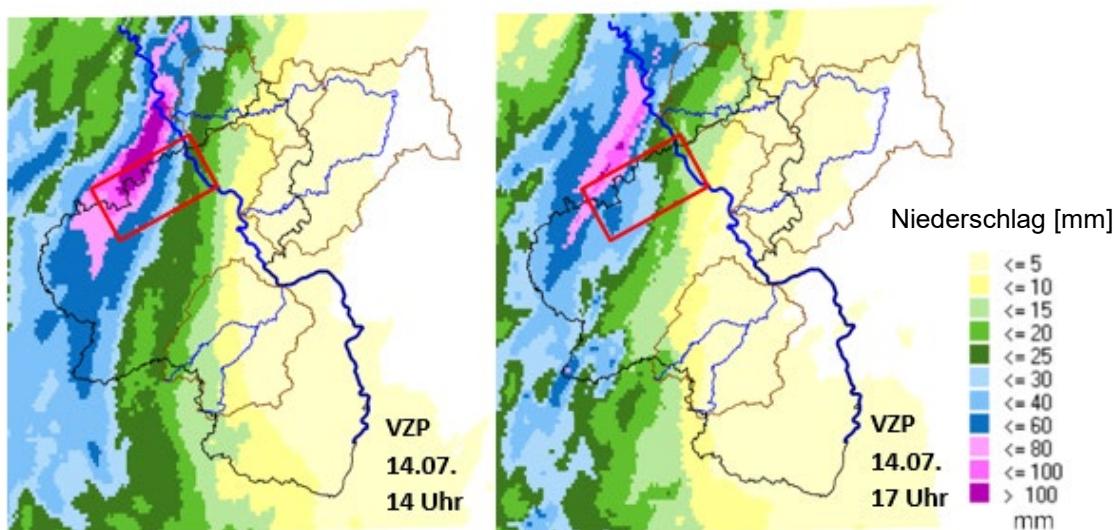


Abbildung 17: Wettervorhersagen des DWD (ICON-D2) am 14.07. VZP 14:00 Uhr (links) und VZP 17:00 Uhr (rechts) mit 6h-Niederschlagssummen für den 14.07. 17:00 bis 23:00 Uhr (alle Zeiten in MESZ); rote Umrandung: Lage des Ahr-Einzugsgebiets.

Ursachen für zu hohe oder zu niedrige Abfluss- und Wasserstands-Vorhersagen sind, neben den Unsicherheiten der meteorologischen Vorhersagen, Ungenauigkeiten in der Messung des fallenden Niederschlags (z.B. aufgrund einer Unter- oder Überschätzung der Radarreflektivitäten, siehe Abschnitt 5.1) und bei der Messung der Wasserstände an den Pegeln. Darüber hinaus entstehen Unsicherheiten durch die Abbildung komplexer Prozesse innerhalb des hydrologischen Vorhersagemodells und durch die Kalibrierung der Modellparameter. Für das Einzugsgebiet der Ahr wurde das Vorhersagemodell nach dem Hochwasser im Juni 2016 neu kalibriert. Die am 14.07. veröffentlichten Berechnungen bis 707 cm Wasserstand zeigen die grundsätzliche Eignung des Vorhersagesystems zur Abschätzung auch extremer, vorher noch nie gemessener Wasserstände, wie auch bereits in BREMICKER ET AL. 2011 gezeigt. Der höchste gemessene Wasserstand war im Juni 2016 mit 371 cm erfasst worden.

Ein weiterer Unsicherheitsfaktor ist die Wasserstand-Abfluss-Beziehung an einem Pegel, die auf Abflussmesswerten beruht. Bei großem Hochwasser ist die Durchführung von Abflussmessungen stark erschwert oder sogar unmöglich, so dass für diesen Bereich nur selten Abflussmessungen vorliegen. Daher muss die Wasserstand-Abfluss-Beziehung bis in den Extrembereich extrapoliert werden, um im Falle eines Extremhochwassers Umrechnungen durchführen zu können. Diese Extrapolation reichte am Pegel Altenahr bis zu einem Wasserstand von rund 510 cm. Um noch höhere Wasserstände berechnen zu können, wurde die Wasserstands-Abfluss-Beziehung für den Pegel Altenahr am Nachmittag und am Abend des 14.07. in einen noch höheren Extrembereich extrapoliert mit den damit verbundenen Unsicherheiten.

Ab dem frühen Abend des 14.07. zeigte sich, dass die Wasserstände schneller und im weiteren Verlauf des Abends auch höher anstiegen als vorhergesagt (Abbildung 18). Neben den vorgenannten Unsicherheiten wurden aufgrund der extremen Niederschläge und der hohen Vorfeuchte der Böden selbstverstärkende Effekte wirksam, die mit den bestehenden Modellen für derartige extreme Ereignisse nicht oder nicht vollständig abgebildet werden können (DIETZE & ÖTZTÜRK 2021, HAAG ET AL 2022). Zu den selbstverstärkenden Effekten zählen deutlich schnellerer Oberflächenabfluss, die schnellere Abflusskonzentration in den Bächen durch sich bildende Erosionsrinnen, Veränderung

von Fließwegen und der Gewässerprofile sowohl durch Abtragung als auch Ablagerung von Sedimenten. Insbesondere die Verklausung der Brücken führte zu Rückstau und beim Bruch der Brücken zu Schwallwellen (Abschnitt 5.6), so dass die Wassermassen auch höher gelegene Bereiche überfluteten. Diese hydraulischen Effekte können mit hydrologischen Vorhersagemodellen nicht berechnet werden, sie können nur vorab in Form von Worst-Case-Szenarien hydraulisch berechnet werden und als Ergänzung zu den Hochwassergefahrenkarten bei der Bewertung der örtlichen Gefährdung herangezogen werden.

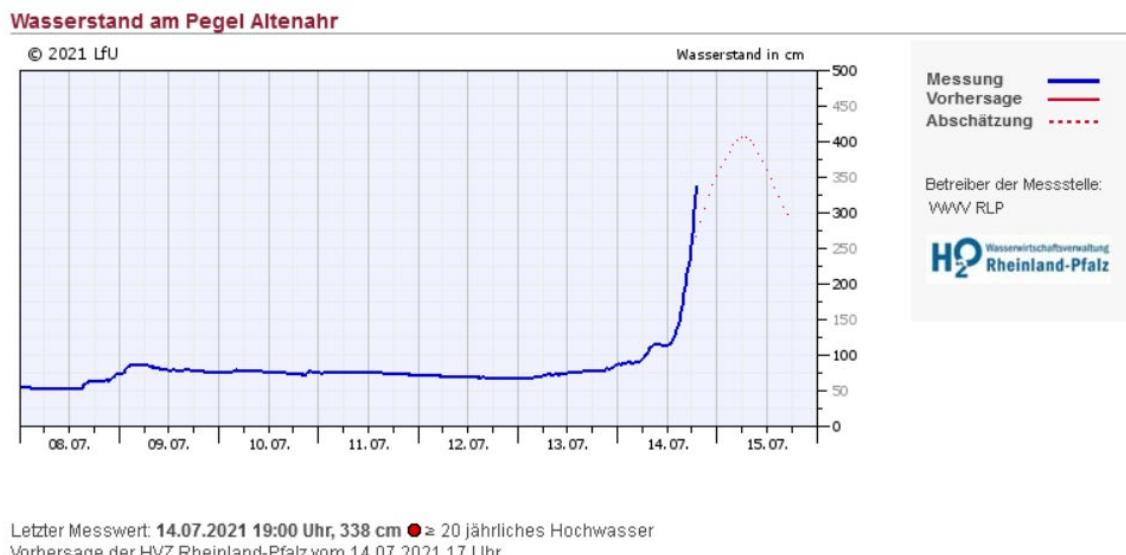


Abbildung 18: Darstellung der Wasserstands-Messwerte und -Vorhersagen auf www.hochwasser-rlp.de; Vorhersagezeitpunkt 17:00 Uhr MESZ; Veröffentlichungszeitpunkt 18:25 MESZ.

3.4 Vorhersagen für die Prüm und die Kyll

Auch für die Pegel in der Westeifel lagen die Wasserstand-Vorhersagen am frühen Morgen des 14.07. niedriger als die tatsächlich eingetretenen Höchststände, an den Pegeln Prümzurlay/Prüm und Kordel/Kyll zwei bis drei Meter (Abbildung 13). Ursache waren auch hier die zu diesem Zeitpunkt zu niedrig vorhergesagten Niederschläge. Ab dem Abend des 14.07. ab etwa 15 Stunden vor den gemessenen Höchstständen waren die Vorhersagen relativ verlässlich, lagen in einzelnen Vorhersagen aber immer noch bis zu einem Meter über den tatsächlich eingetretenen Höchstständen.

4 HOCHWASSERMELDUNGEN

4.1 Einsatzzeiten und Einsatzumfang

Von der Hochwasservorhersagezentrale (HVZ) in Mainz wurden vom 30.06. bis 08.08. an 23 Tagen Hochwassermeldungen verbreitet. Vom 08.07. bis 19.07. waren Rund-um-die-Uhr-Dienste (24 h) eingerichtet. Bei einem landesweiten Hochwasser, wie es im Juli der Fall war, werden bis zu 24 Personen im Drei-Schicht-Betrieb in bis zu sieben unterschiedlichen Funktionen eingesetzt. Die Einsatzkriterien und Zuständigkeiten sind in einer Dienstvereinbarung für regionales, überregionales und landesweites Hochwasser bis in den Extrembereich klar geregelt. Das Vorgehen an jedem Funktionsposten wird in regelmäßig stattfindenden Schulungen geübt. Im vergangenen Juli stellte die Gleichzeitigkeit des Rhein- und Mosel-Hochwassers mit den Flutkatastrophen an der Ahr und in der Eifel eine besondere Herausforderung an die personellen Ressourcen der HVZ dar, insbesondere auch im Nachgang des Ahr-Hochwassers.

Für den Oberrhein wurde der Hochwassermeldedienst am 09.07. einen halben Tag vor Anstieg der Wasserstände über die Meldehöhe (700 cm) des Pegels Maxau eröffnet (Abbildung 6). Der Meldendienst für den Mittel- und Niederrhein wurde am 14.07. eröffnet als der Wasserstand dort infolge des Moselhochwassers in Koblenz über die Meldehöhe (500 cm) stieg.

Für die Mosel inklusive Saar und Sauer wurden aufgrund der Wettervorhersagen und der Notwendigkeit, Campingplätze vor möglichen Überschwemmungen in ufernahen Bereichen zu warnen, lange vor Überschreitung der Meldehöhen, das heißt bereits ab dem 12.07., Hochwasserinformationen erstellt und verbreitet (Abbildung 7). Ab diesem Zeitpunkt wurde bereits darauf hingewiesen, dass es an den kleinen Zuflüssen von Mosel und Sauer aufgrund intensiven Niederschlags zu schnell und stark ansteigender Wasserstände kommen kann. Die eigentliche Meldediensteröffnung erfolgte am 14.07., einen halben Tag vor Anstieg über die Meldehöhe von 600 cm.

Aufgrund der Wetter- und Abflussvorhersagen wurden im Zeitraum 08.07 bis 19.07. Nacht-Rufbereitschaften eingerichtet, in den Nächten 13.07. bis 15.07. durchgehende Bereitschaftsdienste in denen die Diensthabenden die Wetterentwicklung und Hochwasservorhersagen durchgehend beobachteten.

4.2 Hochwassermeldungen

Die Hochwassermeldungen wurden entsprechend der Regionalen Hochwassermeldepläne (Stand: Oktober 2018; systematische Kontaktdatenabfrage Dezember 2020) auf der Internetseite des Hochwassermeldedienstes (www.hochwasser-rlp.de) veröffentlicht, das die umfassendste und stets aktuellste Informationsplattform des Hochwassermeldedienstes darstellt. Zudem erfolgte eine Veröffentlichung über das Länderübergreifenden Hochwasserportal (www.hochwasserzentralen.de, nur Berichte und Wasserstände) und auf den SWR-Videotext-Seiten (Berichte sowie gemessene und vorhergesagte Wasserstände für große Flüsse). Auf der Internetseite des Hochwassermeldedienstes wird für alle Pegel der Verlauf des gemessenen Wasserstands sowie für Pegel mit größerem Einzugsgebiet auch der vorhergesagte Wasserstand dargestellt. Die Wasserstandsmesswerte werden alle 15 Minuten aktualisiert, die Vorhersagen spätestens alle drei Stunden (siehe Kapitel 3). Weitere Informationsmöglichkeiten sind die App „Meine Pegel“, über die eine Alarmierung für individuell konfigurierbare Wasserstände möglich ist, und eine telefonische Wasserstandsansage.

Auf der Startseite von www.hochwasser-rlp.de ist stets die DWD-Wetterwarnkarte mit aktuellen Stark- und Dauerregenwarnungen dargestellt. Zudem wurde dort ab dem 12.07. abends ein Warn-dreieck mit Hinweistext eingestellt um auf die bevorstehende Hochwassergefahr hinzuweisen (siehe Abschnitt 4.3). Ab 13.07. nachts war die komplette Eifel auf der Frühwarnkarte gelb eingefärbt (quasi als Vorwarnung für den in den nächsten 24 Stunden ansteigenden Wasserstand).

Komplementär zu den oben genannten Informationsmöglichkeiten wurden Hochwassermeldungen und Hochwasserinformation gezielt per E-Mail, SMS, Fax und über die App KATWARN verbreitet (Tabelle 6). In Abschnitt 4.3 sind detailliertere Informationen zu den aktiv versendeten Meldungen für die Ahr zu finden, u.a. eine Erläuterung zum speziell für die Kreisverwaltung Ahrweiler eingerichteten Zusatzangebot der pegelbezogenen Hochwasserinformationen.

Seit Herbst 2016 werden regionsbezogene Hochwasserwarnungen über das Katastrophenwarnsystem „KATWARN“ verbreitet. KATWARN-Nutzer werden per Alarmsignal gewarnt, wenn in ihrem Aufenthaltsbereich eine Gefährdung durch ein mindestens 10-jährliches Hochwasser besteht (vgl. Grundlagen zu den Regionalen Hochwassermeldeplänen, Stand 2018). KATWARN wurde 2015 vom Innenministerium Rheinland-Pfalz offiziell als ergänzendes Warnsystem eingeführt und wird von einem Großteil der rheinland-pfälzischen Landkreise für die Gefahrenwarnung genutzt. Mit Absetzen einer LfU-Hochwasserwarnung über KATWARN sollten die Kreisverwaltungen und kreisfreien Städte per E-Mail über die Hochwassergefährdung nachrichtlich informiert werden. Diese zusätzliche Benachrichtigung war 2018 beim LfU als Redundanz zur Darstellung im Internet und zur KATWARN-Meldung eingerichtet worden, hatte jedoch im Juli 2021 wegen eines Programmierfehlers nicht funktioniert. Die Relevanz dieses technischen Defekts ist als gering zu bewerten, da die anderen Meldewege regelkonform und fehlerfrei funktioniert hatten. Die Übernahme der KATWARN-Meldungen in die NINA-App des Bundesamts für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe war bis zum Juli 2021 noch nicht realisiert.

In den bereits ab 12.07. versendeten Hochwasserberichten für die Mosel wurde darauf hingewiesen, dass an den Zuflüssen von Mosel und Sauer aufgrund intensiven Niederschlags Hochwasser auftreten kann. Ab dem 14.07. wurde mit der Eröffnung des Meldedienstes auf die hohe Vorfeuchte, die sehr hohen Niederschlagsvorhersagen des Deutschen Wetterdienstes und die daraus resultierende Gefahr schnell und stark ansteigender Wasserstände auch für die Eifelzuflüsse hingewiesen.

Tabelle 6: **Aktiv verbreitete Hochwassermeldungen gemäß Regionalem Hochwassermeldeplan (Normaldruck) sowie automatisch versendete Zusatzinformationen (Kursivdruck).**

| Art der Meldung | Anzahl | Verbreitungsart |
|--|--------|--|
| Hochwasserberichte für Rhein und Mosel | 30 | E-Mail-Versand SMS-Hinweis Fax-Versand |
| Regionsbezogene Frühwarnung | 14 | App KATWARN * |
| <i>Hochwasserinformationen (Zusatzangebot)</i> | 89 | <i>E-Mail-Versand (automatisch)</i> |

* keine E-Mail-Benachrichtigung bei KATWARN-Auslösung

4.3 Chronologie der Hochwassermeldungen für die Ahr

Ab dem 12.07. abends wurde im Internetangebot des Hochwassermeldedienstes unter <https://fruehwarnung.hochwasser-rlp.de/> ein Warnhinweis für alle kleineren Flüsse in Rheinland-Pfalz veröffentlicht und bei Änderung der Situationsbewertung aktualisiert. Dieser Warnhinweis ist stets mit einem Warndreieck versehen, das anklickbar auch auf der Homepage <https://www.hochwasser-rlp.de> erscheint. In diesen Warnhinweisen wurde auf die aktuell hohe Bodenfeuchte sowie die Stark- und Dauerregenwarnungen des Deutschen Wetterdienstes und die damit verbundene potenzielle Hochwassergefahr hingewiesen.

Am 13.07. wurde am frühen Nachmittag für das Ahr-Einzugsgebiet die gelbe Warnklasse „Mäßige Hochwassergefährdung“ der regionsbezogenen Hochwasserfrühwarnung ausgegeben mit einer Gültigkeit von 24 Stunden. Am 14.07. um 11:17 Uhr wurde die Warnklasse auf Rot „Hohe Hochwassergefährdung“ erhöht, womit davor gewarnt wird, dass in den kommenden 24 Stunden ein 20-jährliches Hochwasser überschritten wird. Zeitgleich mit der Veröffentlichung dieser roten Warnung im Internetangebot wurde eine Warnung über die Warn-App KATWARN ausgeben. Um 17:17 Uhr wurde die höchste Warnklasse Lila „Sehr große Hochwassergefährdung“ veröffentlicht (entspricht >50-jährliches Hochwasser), auch in diesem Fall zeitgleich mit einer Warnung über KATWARN. Bis zum 15.07. 16:10 Uhr wurde die höchste Warnklasse beibehalten, ehe sie danach sukzessive herabgesetzt wurde.

Die Alarmierung über KATWARN ist im Hochwassermeldedienst seit 2016 direkt an die regionsbezogene Frühwarnkarte gekoppelt, d.h. mit Einfärbung einer bestimmten Warnregion wird automatisch eine KATWARN-Meldung mit einem Standardtext verbreitet¹. Im Falle der lila Warnung lautete der Standard-Hochwasserwarntext:

„ACHTUNG: An der Ahr und ihren Zuflüssen ist die Hochwassergefahr sehr groß. Innerhalb der nächsten 24 Stunden ist mit Sturzfluten und Überflutungen zu rechnen. Erdrutsche sind möglich. Es sind Verkehrsbehinderungen zu erwarten.“

Der daran anschließende Standard-Handlungshinweis lautete:

„Halten Sie sich möglichst nicht in Kellern, Tiefgaragen und tieferliegendem Gelände auf. Informieren Sie sich über die Medien (z.B. über SWR1) und behalten Sie das Wetter- und Abflussgeschehen im Auge. Sichern Sie flussnahe Gebäude vor Wassereintritt. Achten Sie unbedingt auf Ihre eigene Sicherheit und die Anweisungen lokaler Einsatzkräfte.“

Zusätzlich zu den regionsbezogenen Warnungen für das Ahrgebiet werden für den Pegel Altenahr mindestens alle drei Stunden Abschätzungen des Wasserstandverlaufs für die nächsten 24 Stunden veröffentlicht (vgl. Abschnitt 3.3). Nach dem Hochwasser im Juni 2016 war für den Kreis Ahrweiler zudem eine automatische Hochwasserinformation als sogenannte Push-Benachrichtigung eingerichtet worden: Sobald der vorhergesagte Wasserstand innerhalb der von der Kreisverwaltung angegebenen Zeitspanne von fünf Stunden einen von der Kreisverwaltung bestimmten Wasserstand an den Pegeln Müsch, Altenahr oder Bad Bodendorf überschreitet erhält die Kreismeldestelle eine E-Mail, die einen Hinweis auf die Schwellenwertüberschreitung und Grafiken mit dem vorhergesagten Wasserstandsverlauf enthält. Derartige E-Mails wurden am 14.07. ab 15:26 MESZ mit jeder automatisch berechneten Vorhersage, das heißt alle drei Stunden an die Kreismeldestelle versendet (Tabelle 7). Die Vorhersageganglinien in der E-Mail vom 14.07. 15:26 hatten im Bereich des Höchststandes eine Lücke, da für derartig hohe Wasserstände keine Wasserstands-Abfluss-Beziehung definiert war. In den folgenden E-Mails waren die Vorhersageganglinien komplett dargestellt, weil die

¹ https://www.hochwasser-rlp.de/service/erlaeuterungen_fruehwarnung

Wasserstands-Abfluss-Beziehung zwischenzeitlich extrapoliert worden war (Behelfsmaßnahme). Die E-Mail vom 14.07. 18:26 enthielt eine etwas niedrigere Wasserstandsvorhersage, da seitens des DWD für den Abend des 14.07. wieder niedrigere Regenmengen vorhergesagt worden waren und der oberhalb liegende Pegel Müsch ausgefallen war (siehe Abschnitt 3.3).

Tabelle 7: Aktiv verbreitete Hochwassermeldungen für das Ahr-Einzugsgebiet vor dem Höchststand am Pegel Bad Bodendorf (automatischer Versand direkt nach der Vorhersageberechnung).
 Weitere am 14./15.07. auf <https://www.hochwasser-rlp.de> veröffentlichte Vorhersagen nach manuellen Zusatzberechnungen mit Uhrzeit [MESZ] und Höchststand am Pegel Altenahr: 19:57 530 cm; 20:43 692 cm; 22:24 707 cm; 15.07. 01:06 706 cm.

| Datum & Uhrzeit [MESZ] | aktive Benachrichtigung („Push“) | Konkrete Information |
|---------------------------|----------------------------------|---|
| 14.07.2021 11:17 | KATWARN | Warngebiet Ahr rot: Große Hochwassergefahr |
| 14.07.2021 15:26 | E-Mail | Vorhersageganglinie mit Höchstständen Müsch: > 350 cm* Altenahr: > 500 cm* Bad Bodendorf: > 400 cm* |
| 14.07.2021 17:18 | KATWARN | Warngebiet Ahr lila: Sehr große Hochwassergefahr |
| 14.07.2021 18:26 | E-Mail | Vorhersageganglinie mit Höchstständen Müsch: 291 cm Altenahr: 406 cm Bad Bodendorf: 328 cm |
| 14.07.2021 21:26 | E-Mail | Vorhersageganglinie mit Höchstständen Müsch: 333 cm Altenahr: 681 cm Bad Bodendorf: 420 cm |
| 15.07.2021 03:25 | E-Mail | Vorhersageganglinie mit Höchstständen Müsch: Höchststand bereits vorbei Altenahr: 700 cm Bad Bodendorf: 455 cm |

* Keine Vorhersageganglinie in dem über den angegebenen Werten liegenden Bereichen zur Ermittlung im Bereich des Höchststandes; Ganglinie unterbrochen wegen nicht vorhandener Wasserstands-Abfluss-Beziehung

5 ANALYSEN ZUM AHR-HOCHWASSER

5.1 Niederschlagsprodukte

Im Rahmen der operationellen regions- und pegelbezogenen Vorhersage stehen die drei rasterbasierten Niederschlagsprodukte *InterMet-LfU-RLP*, *RADOLAN-RW-DWD* und *RADOLAN-RL-DWD* online zur Verfügung und liefern flächendeckend die gefallenen Niederschlagssummen in stündlicher Auflösung. Bei den InterMet-Daten des LfU handelt es sich um interpolierte Bodenniederschlagsstationsdaten (DOBBLER ET AL. 2004), bei den RADOLAN-Daten des DWD um mit Hilfe von Bodenniederschlagsstationen angeeichte Niederschlagsradardaten (DWD 2020). Am Ereignistag wurde das Wasserhaushaltsmodell LARSIM mit den InterMet-Daten gespeist, da sich in den Wochen zuvor bereits abzeichnete, dass die RADOLAN-Daten einzelne Niederschlagsereignisse unterschätzten. Auf Basis des InterMet-Datensatzes fiel am 14.07. in einem Zeitraum von 14 Stunden im Ahr-Einzugsgebiet eine Gebietsniederschlagssumme von 102 mm, die operationell verfügbaren RADOLAN-Produkte lieferten deutlich niedrigere Werte (Tabelle 8).

In der Auf- und Nachbereitung des Ereignisses wurde auch der Frage nach den tatsächlich gefallenen Niederschlagssummen nachgegangen, so dass weitere Niederschlagsprodukte generiert wurden. Dabei handelt es sich um die nachprozessierten DWD-Produkte *RADOLAN-RW-DWD* und *RADOLAN-RL-DWD*, um aufbereitete und auf das Ahr-Einzugsgebiet optimierte Niederschlagsradardaten des Instituts für technisch-wissenschaftliche Hydrologie (ITWH) (*RADAR-ITWH-Ahr*) (KRÄMER ET AL. 2021) sowie um interpolierte Niederschlagsstationsdaten unter Berücksichtigung zusätzlicher Informationen privater Wetterstationen (PWS) (*Uni-Stuttgart-PWS*) der Universität Stuttgart (BÁRDOSSY ET AL. 2021, BÁRDOSSY ET AL. 2022). Ausgehend von den nachprozessierten RADOLAN-Produkten zeigt die Spannweite der in diesem Beispiel gezeigten Gebietsniederschläge, die zwischen 95 mm und 119 mm liegt, die Unsicherheit bei den tatsächlich gefallenen Niederschlagssummen deutlich auf (vgl. Tabelle 8).

Die nördlichen Einzugsgebiete der Ahr hatten einen erheblichen Anteil am Abflussgeschehen während des Hochwassers im Juli 2021. Die entsprechende räumliche Niederschlagsverteilung (vgl. Abbildung 19) wird von den dargestellten Niederschlagsprodukten zwar erfasst, die Niederschlagssummen werden jedoch im Vergleich zu denen des Produkts *Uni-Stuttgart-PWS* unterschätzt. Darüber hinaus wird der Gebietsniederschlag für das Einzugsgebiet des Trierbachs (Pegel Kirmutscheid) von allen Produkten vermutlich deutlich zu niedrig eingeschätzt (vgl. Abschnitt 5.5).

In der operationellen Hochwasservorhersage sind die nachprozessierten Produkte derzeit nicht einsetzbar, eine Auswahl dieser Niederschlagsprodukte wurde aber für Nachberechnungen mit dem hydrologischen Modell LARSIM zur Rekonstruktion der Scheitelabflüsse an der Ahr verwendet (vgl. Abschnitt 5.5).

Tabelle 8: Gebietsniederschlag im gesamten Einzugsgebiet der Ahr im Zeitraum 14.07. 07:00 Uhr bis 14.07. 21:00 Uhr MEZ auf Basis verschiedener Niederschlagsprodukte. Langjährige mittlere Monatssumme für Juli: 69 mm.

| Niederschlagsprodukt | Gebietsniederschlag im Ahr-EZG (14.07. 07:00 bis 21:00 Uhr MEZ) |
|-----------------------------------|--|
| InterMet-LfU-RLP online | 102 mm |
| RADOLAN-RW-DWD online | 85 mm |
| RADOLAN-RL-DWD online | 93 mm |
| RADOLAN-RW-DWD nachprozessiert | 95 mm |
| RADOLAN-RL-DWD nachprozessiert | 106 mm |
| RADAR-ITWH-Ahr nachprozessiert | 106 mm |
| Uni-Stuttgart-PWS nachprozessiert | 119 mm |

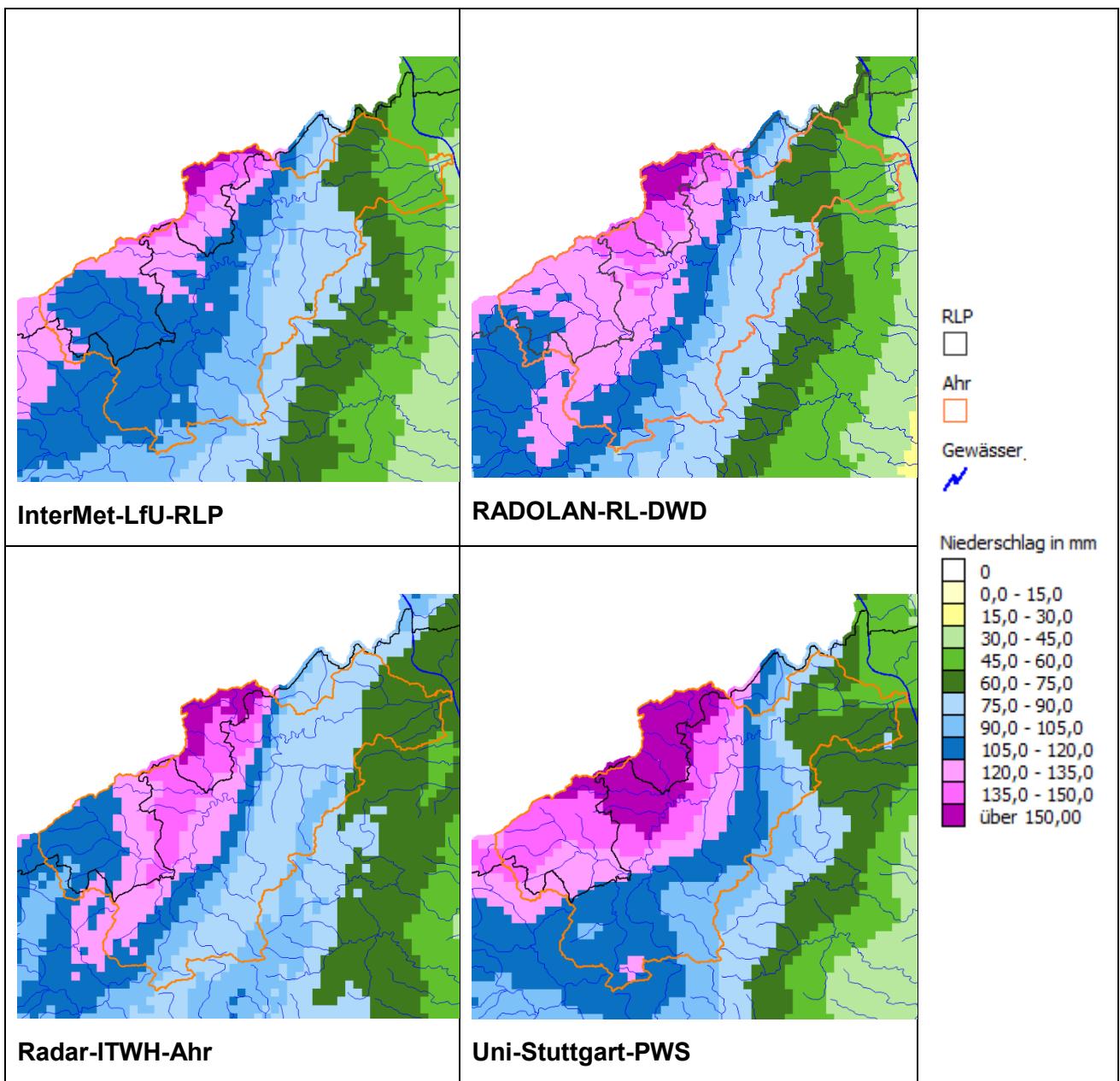


Abbildung 19: Räumliche Verteilung der Niederschlagssummen [mm] vom 14.07. 07:00 bis 14.07. 21:00 MEZ im Ahr-Einzugsgebiet auf Basis verschiedener Niederschlagsprodukte (InterMet-LfU-RLP online, weitere dargestellte Produkte nachverarbeitet).

5.2 Aussagekraft und Verlässlichkeit von EFAS-Vorhersagen

Aufgrund der zahlreichen, häufig irreführenden Berichterstattung zum europäischen Vorhersagesystem EFAS (European Flood Awareness System) werden die EFAS-Benachrichtigungen und -Vorhersagen für den 13./14. Juli nachfolgend kurz erläutert.

Das LfU ist seit 2004 Partner von EFAS, erhält seitdem EFAS-Benachrichtigungen und ist durch die Teilnahme am EFAS-Jahresmeeting und EFAS-Trainings über die Weiterentwicklungen und Produkte in EFAS informiert. Darüber hinaus stellt das LfU EFAS zweimal täglich aktuelle Pegeldaten zur Verfügung. Für Einzugsgebiete < 2000 km² berechnet EFAS sogenannte Flash Flood Indikatoren. Diese basieren im Wesentlichen auf Bodenfeuchtesimulationen und zweimal täglich aktualisierten Wettervorhersagen (Ensemble-Vorhersagen COSMO-LEPS), nicht aber auf Pegeldaten. Die Ergebnisse werden nach folgenden Jährlichkeiten klassifiziert: > 2-jährliches Hochwasser (gelb), > 5-jährliches Hochwasser (rot) und > 20-jährliches Hochwasser (violett), wobei die Statistik auch hier nicht auf Pegel-Messzeitreihen, sondern auf 20-jährigen Modellsimulationen beruht.

Da die EFAS-Flash Flood Vorhersagen nur zweimal am Tag aktualisiert werden, räumlich relativ grob aufgelöste Wettervorhersagen verwenden (Rasterzelle COSMO: 49 km²) und keine Wasserstands- oder Abflussvorhersagen darstellen, sind sie für die HVZ am LfU nur eine von vielen Zusatzinformationen. Die mindestens achtmal am Tag aktualisierten Wasserstandsvorhersagen der HVZ beruhen im Gegensatz zu EFAS auf aktuelleren, räumlich höher aufgelösten Wettervorhersagen (Rasterzelle ICON-D2: 4 km²), den aktuellen Messdaten zahlreicher Messstationen (Niederschlag und Pegel) sowie räumlich und zeitlich hoch aufgelösten Wasserhaushaltmodellen, die für hochwasserrelevante Pegel explizit kalibriert worden sind. In der Vergangenheit hatten die HVZ-Diensthabenden im Falle einer EFAS-Benachrichtigungen die jeweilige Hochwassersituation stets bereits im Blick. Zudem wurden und werden in den Flash-Flood-Vorhersagen von EFAS viele Fehlalarme oder verpasste Hochwasser festgestellt. Dies war auch um den 13.07. der Fall.

In der Zeit vom 10.07. bis 14.07. sind für den Zuständigkeitsbereich des LfU neun EFAS-Benachrichtigungen eingegangen plus eine Benachrichtigung am 07.07. für die Aare in der Schweiz. Die den Bereich der Ahr betreffende Flash Flood Notification wurde seitens EFAS am 13.07. um 11:25 MESZ an die HVZ gesendet und bezog sich auf den Vorhersagezeitpunkt (VZP) vom 13.07. 00:00 UTC (entspricht 02:00 MESZ¹). Der Zeitversatz zwischen dem VZP und der Benachrichtigung beträgt somit rund neun Stunden. In der Benachrichtigung wurde die Erdrutschgefahr mit 44% Anteil als moderat eingestuft und mit 21% Anteil als hoch eingestuft (Abbildung 20).

| EFAS Flash Flood Notification* | |
|--|---|
| Country(ies): | GERMANY |
| Region(s): | Trier, Koblenz |
| Earliest predicted peak: | Thursday, 15th of July 2021 - 00:00 |
| Percent of affected area susceptible to landslides: | Very High: 0%, High: 21%, Moderate: 44% |
| Forecast date: | 2021-07-13 00 UTC |
| Comment: | - / |
| This is the only notification you will receive for this event! Please follow the evolution of the event on EFAS < https://www.efas.eu >. | |

Abbildung 20: EFAS-Flash-Flood-Notification vom 13.07. 11:25 MESZ für den die Ahr umfassenden Bereich.

¹ UTC (Universal Time Coordinated), MEZ (Mitteleuropäische Zeit) = UTC + 1, MESZ (ME-Sommerzeit) = UTC + 2)

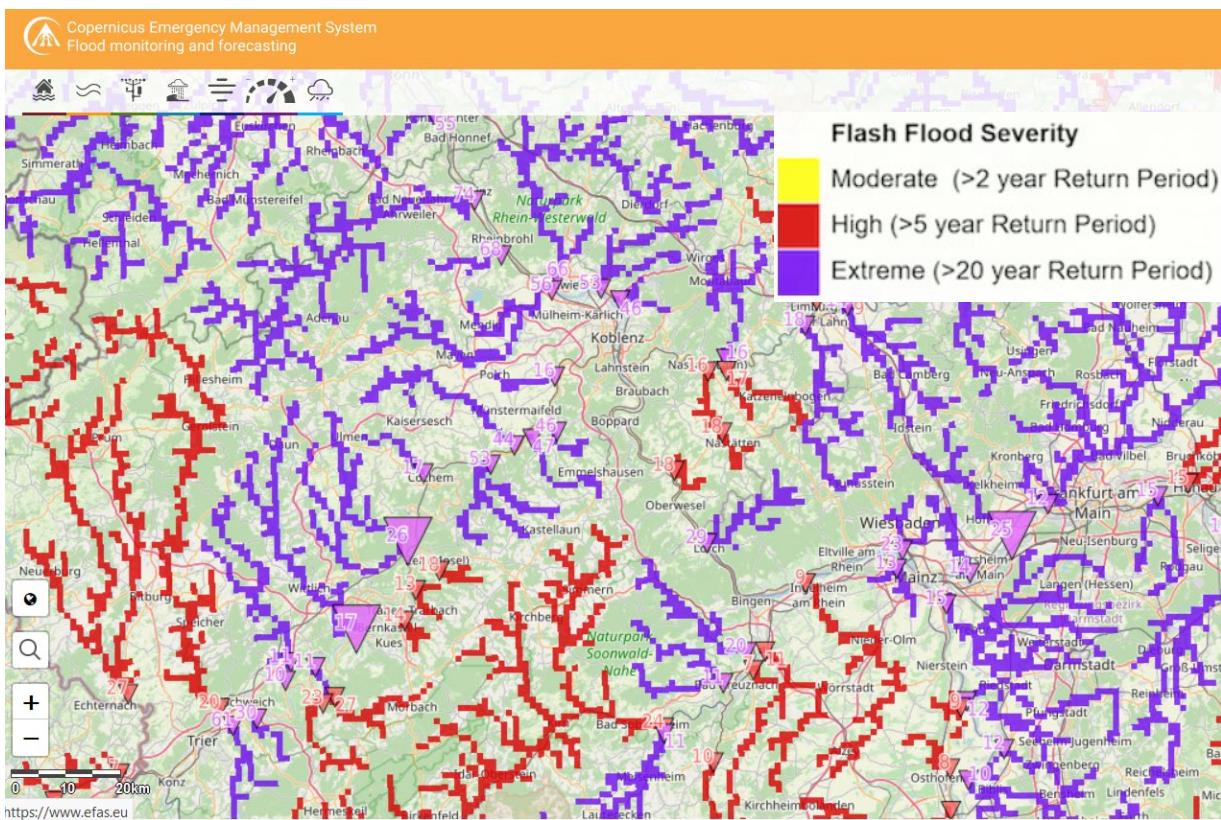


Abbildung 21: Flash-Flood-Gefährdung laut EFAS am 13.07. mit VZP 12:00 UTC.
(Quelle: <https://www.efas.eu/>)

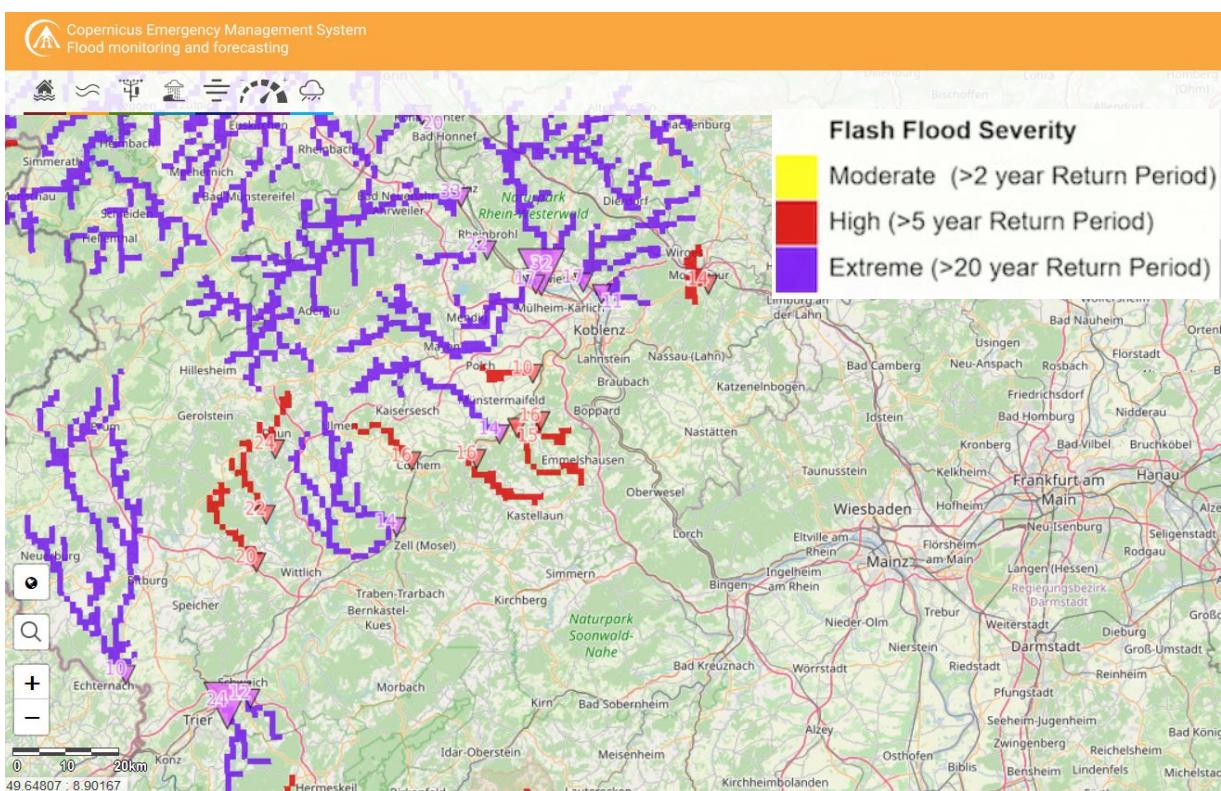


Abbildung 22: Flash-Flood-Gefährdung laut EFAS am 14.07. mit 12:00 UTC.
(Quelle: <https://www.efas.eu/>)

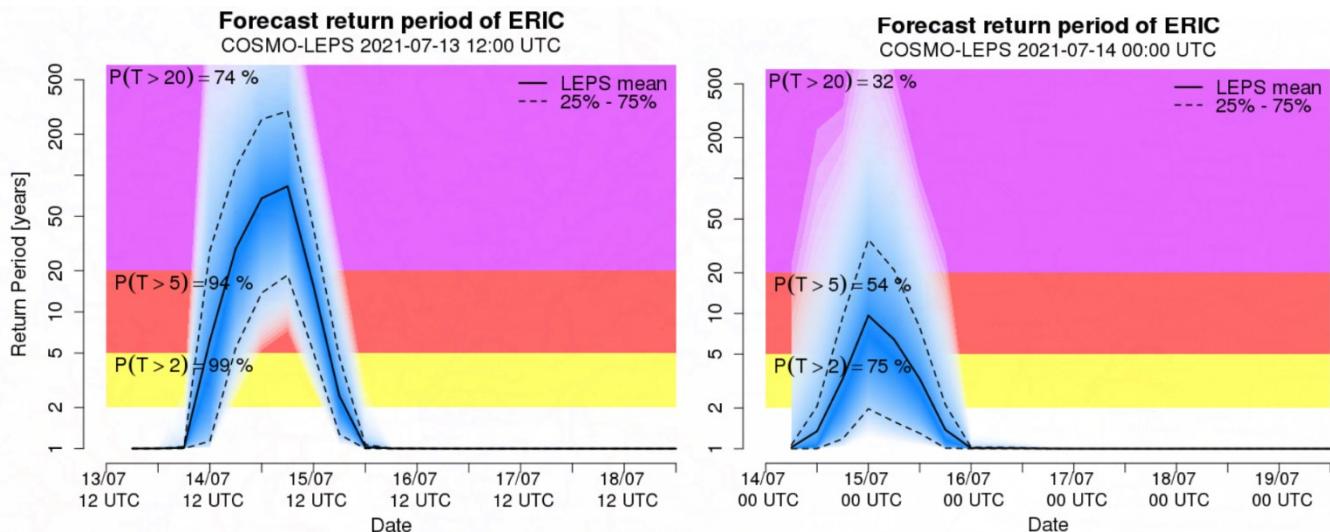


Abbildung 23: Spannweite der Jährlichkeiten (= Return Period) vorhergesagter akkumulierter Abflüsse am EFAS-Vorhersagepunkt (sog. Flash Flood ERIC Reporting Point) im Bereich der Ahr-Mündung in den Rhein (links: 13.07. VZP 12:00 UTC, rechts: 14.07. VZP 00:00) (Quelle: <https://www.efas.eu/>).

Die höchste Flash-Flood-Gefährdung wurde in EFAS mit dem VZP 13.07. 12:00 Uhr UTC vorhergesagt (Abbildung 21 und Abbildung 23 links), da zu diesem VZP die Wettervorhersagen für den 14.07. sehr hohe Niederschlagsmengen enthielten. Abbildung 21 zeigt, dass EFAS zu diesem Zeitpunkt nahezu flächendeckend vor Flash Floods in Rheinland-Pfalz gewarnt hat: Neben Eifel, Westerwald, Taunus und Rheinhessen waren auch die Gewässer im Nahe-Einzugsgebiet lila eingefärbt (> 20-jährliches Hochwasser). Hinsichtlich der in der Presse häufig zitierten 74 % Wahrscheinlichkeit (Abbildung 23 links) ist richtigzustellen, dass es sich hierbei nicht um die Eintrittswahrscheinlichkeit für eine Sturzflut handelt, sondern um die Wahrscheinlichkeit für die Überschreitung eines 20-jährlichen Hochwassers. Zudem ist zu berücksichtigen, dass sich diese Angabe auf ein etwa 1.000 km² großes Einzugsgebiet bezieht, es sich hierbei um eine einzelne Warnung für ein noch über 36 Stunden in der Zukunft liegendes Ereignis handelt und in EFAS keine konkreten Wasserstände oder Abflüsse für Pegel vorhergesagt werden. Es sei auch darauf hingewiesen, dass von EFAS zu diesem Zeitpunkt für die rechtsrheinischen Zuflüsse Wied und Saynbach die Wahrscheinlichkeit für die Überschreitung eines 20-jährlichen Hochwassers nahezu gleich hoch war, es aber an diesen Flüssen am 14./15.07. dann tatsächlich zu keinem nennenswerten Hochwasser kam.

In der Nacht auf den 14.07. wurde wie in den ICON-Wettervorhersagen auch in den ECMWF- und COSMO-Wettervorhersagen das Hauptregengebiet für den 14.07. weiter im Norden vorhergesagt. Demzufolge wurde in EFAS für die VZP 14.07. 00:00 UTC und 12:00 UTC die Flash-Flood-Gefährdung deutlich heruntergestuft (Abbildung 22 und Abbildung 23 rechts): Die Kyll in der Westeifel war überhaupt nicht mehr eingefärbt und die Wahrscheinlichkeit für die Überschreitung eines 20-jährlichen Hochwassers am die Ahr betreffenden Vorhersagepunkt (ERIC Reporting Point) betrug nur noch 32 % (VZP 00:00 UTC) bzw. 33 % (VZP 12:00 UTC). Hätten die Diensthabenden in der HVZ am LfU diese Herabstufung auf ihre Warnungen übertragen, dann hätten sie am Vormittag des 14.07. für die Eifel inklusive der Ahr keine rote Warnung über die regionsbezogene Frühwarnung ausgelöst.

5.3 Einsatz von Fernerkundung (Copernicus EMS)

Im sich abzeichnenden Hochwasser wurde am 13.07. durch das LfU der Copernicus Emergency Management Service (EMS) über das Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) – erstmals für Rheinland-Pfalz – aktiviert. Dabei wurden in den folgenden Tagen mit Hilfe des Copernicus-Satellitennetzwerkes die Gewässer Rhein, Mosel, Ahr, Sauer, Prüm, Kyll und Nims kontinuierlich beobachtet. Neben den Gewässern in Rheinland-Pfalz wurden auch Gewässer in Nordrhein-Westfalen, wo ebenfalls lokale Schwerpunkte lagen, untersucht. Die Copernicus-Schadenskartierungen stellten eine wichtige Grundlage bei der Einschätzung der Situation vor Ort dar.

In den Schadenskartierungen sind Informationen auf Basis eines Vorher-Nachher Abgleichs mit teilautomatisierten Prozessen dargestellt (Abbildung 24). Das betrifft die Ausdehnung durch Überschwemmung und der abgeleiteten Spur der Überflutung. Zudem sind betroffene Gebäude und Infrastrukturen, wie Straßen, Eisenbahnlinien und Brücken, in Kategorien dargestellt (zerstört, beschädigt und wahrscheinlich beschädigt).

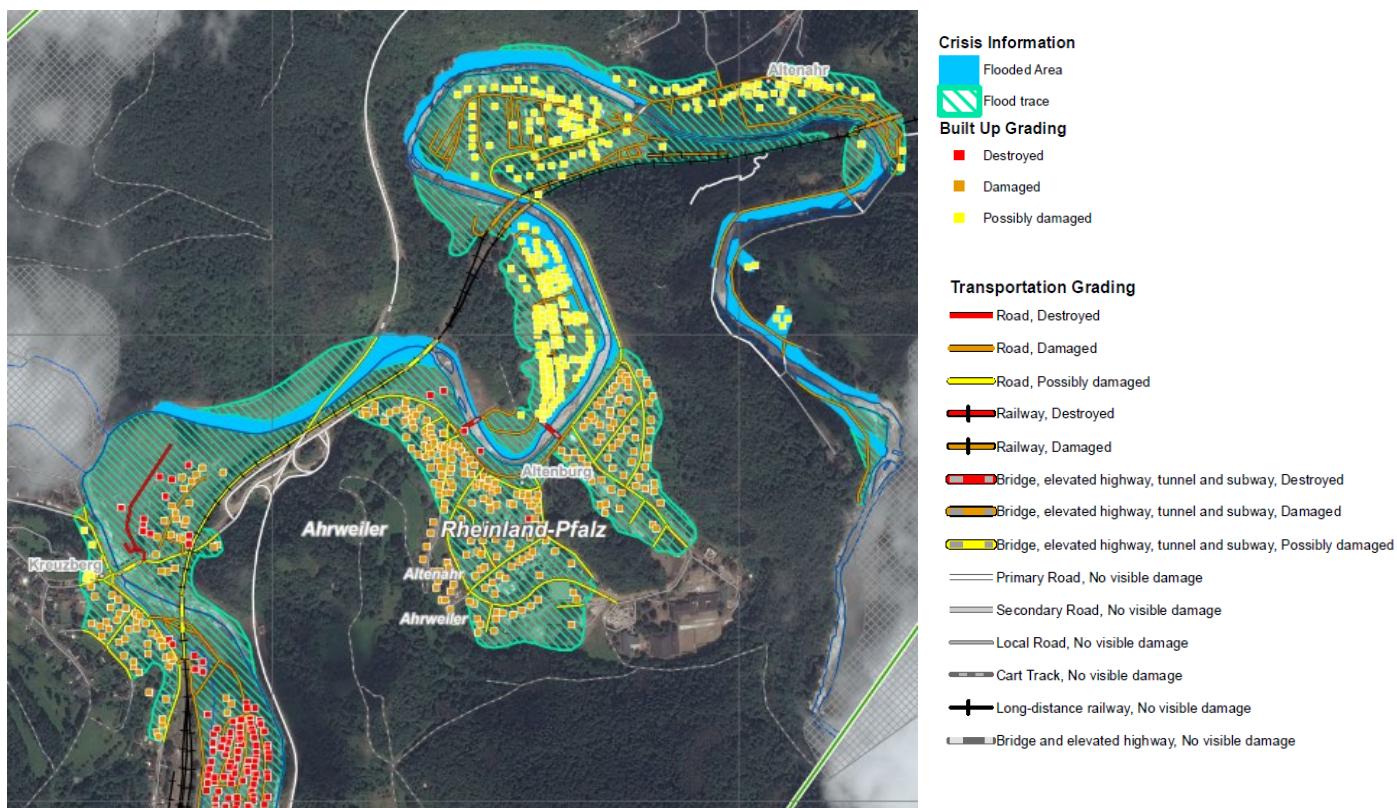


Abbildung 24: Schadenskartierung aus Copernicus EMS im Bereich Kreuzberg – Altenburg – Altenahr.

Quelle: Copernicus Emergency Management Service (© 2021 European Union),
EMSR517, verändert: https://emergency.copernicus.eu/mapping/system/files/components/EMSR517_AOI15_GRA_MONIT01_r1_RTP04_v3.pdf

Bei der Auswertung der Daten hat sich herausgestellt, dass die voraussichtlich überflutete Fläche an einigen Stellen deutlich zu klein dargestellt war. Dies betraf Bereiche an der Oberen und Mittleren Ahr mehr als den verstedterten Bereich der Unteren Ahr. Auffällig ist, dass die nahezu gänzlich zerstörten Campingplätze durch eine konzentrierte Sammlung an zerstörten Häusern („Destroyed“) dokumentiert ist. Aussagen zur tatsächlichen Wassertiefe oder zu Pegelständen an den zerstörten und ausgefallenen Pegeln kann die Fernerkundung allerdings nicht geben. Das Ausmaß an Zerstörung kann zudem nur grob eingeschätzt werden, da die Schadensauswertungen Unschärfen aufweisen. Bei der Darstellung von Beschädigungen werden beispielsweise keine Differenzierungen zwischen Campingplätze, Garagen, Scheunen und Wohnhäusern vorgenommen. Die Situation vor Ort war lokal jedoch zeitlich dynamisch, da Gebäude auch noch Wochen nach dem Hochwasserereignis nach erfolgten statischen Gutachten abgerissen werden mussten.

Um diese Unschärfen zu korrigieren, ist geplant, für die Ahr und Gewässer der Westeifel das Copernicus Projekt einer Re-Analyse zu unterziehen. Dies soll im Rahmen des Risk & Recovery Mapping (RRM) erfolgen. In die weitergehenden Auswertungen können auch Daten des Landes einfließen.

5.4 Ermittlung der Anschlagslinie des Hochwassers

Um die Dimension des Hochwassers zu begreifen, wurde für das gesamte Ahrtal eine Anschlagslinie des Hochwassers erstellt. Diese zeigt die maximale Ausdehnung des Hochwassers in und außerhalb der Siedlungsgebiete an, soweit dies aus den Quellen ableitbar gewesen ist. Als Quellen dienten zunächst Luftbilder des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt¹, die am 16.07. durch eine Hubschrauberbefliegung und am 20.07. durch eine Flugzeugbefliegung durchgeführt wurden. Die Befliegung am 16.07. umfasste neben der Ahr noch Gewässer in der Eifel und in Nordrhein-Westfalen, weshalb die Ahr nicht komplett beflogen werden konnte. Die Befliegung am 20.07. erfolgte für das komplette Ahrtal. Das Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz (LVerMGeo RP) hat eine hochauflösende Sonderbefliegung zwischen dem 24. und dem 29.07. durchgeführt, mit der die Anschlagslinie weiter verbessert werden konnte. Insbesondere in den nicht besiedelten und bewaldeten Randbereichen ist die Linie unscharf, da hier das Gelände teils steil ansteigt. Die Anschlagslinie wurde und wird durch Rückmeldungen aus der Bevölkerung und von Behörden weiterhin aktualisiert. Eine erste Version der Anschlagslinie wurde in den Arbeitskarten zur Zukunftskonferenz gezeigt. Zeitgleich wurde am 04.10. auch das auf Grundlage einer neuen Abflussstatistik ermittelte Überschwemmungsgebiet von der SGD Nord vorläufig festgesetzt. Ausführliche Informationen hierzu finden sich auf der Homepage der SGD Nord².

¹ <https://arcgis.bbk.itzbund.de/arcgis/apps/sites/#/hochwasser2021/>

² <https://sgdnord.rlp.de/de/wasser-abfall-boden/wasserwirtschaft/hochwasserschutz/uesg/laufende-verfahren/uesg-ahr/>



Abbildung 25: Anschlagslinie des LfU RP (rot) mit Luftbildern der Sonderbefliegung des LVerMGeo RP im Bereich Altenahr (Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung).

5.5 Hydrologische Nachrechnung mit dem LARSIM-Wasserhaushaltsmodell

Zur Rekonstruktion und Plausibilisierung der Scheitelabflüsse, vor allem für die Pegel, die am 14./15. Juli vorübergehend ausgefallen waren und/oder zerstört wurden (siehe Abschnitt 2.5), wurden für das Einzugsgebiet der Ahr Nachrechnungen mit dem vorliegenden, operationellen LARSIM-Wasserhaushaltsmodell für Rheinland-Pfalz durchgeführt. Im Modell wird das 896 km² große Ahr-Einzugsgebiet über 561 Teilgebiete (TGB) abgebildet (TGB-Größe im Mittel: 1,6 km²). Im Modell wird für jedes TGB die Abflussbildung für jede einzelne Landnutzungsklasse im TGB getrennt berechnet, so dass die räumliche Auflösung der Modellierung noch höher als die Größe der TGB ist.

Um die Hochwasserscheitel möglichst präzise abzuschätzen, wurde das vorliegende Modell für sieben Pegel im Ahr-EZG nachkalibriert. Bei einer Modellkalibrierung wird in der Regel ein einheitlicher Modellparametersatz für eine möglichst gute Anpassung der simulierten an die gemessenen Abflussganglinien für den gesamten Abflussbereich und für mehrere Hochwasser unterschiedlicher Genese ermittelt. Hier wurden nun die Modellparameter ereignisspezifisch für das Hochwasserereignis Juli 2021 angepasst, so dass die simulierten und die gemessenen Ganglinien (soweit sie vorhandenen sind) bestmöglich übereinstimmen.

Mit den ereignisspezifisch angepassten Parametern steigen die simulierten Abflüsse schneller und stärker an als mit dem Parametersatz, der im Rahmen der Modellkalibrierung 2016 für den Kalibrierzeitraum 1993 bis 2016 ermittelt wurde (vgl. Abschnitt 3.3). Dieser Modellparametersatz 2016 wurde für die operationellen Vorhersagen am 14.07. genutzt.

Zu Beginn der Kalibrierung zeigte sich, dass das Ziel der guten Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Abflüssen für das Ereignis Juli 2021 nur erreicht werden kann, wenn auch der Korrekturfaktor für den Gebietsniederschlag (KG) angepasst wird. Der KG-Faktor ist ein Wert, mit dem der Gebietsniederschlag multipliziert wird. Ein Wert von KG = 1,5 z. B. bedeutet somit, dass der Niederschlag um 50 % erhöht wird. An drei Pegeln musste der Korrekturfaktor für den Gebietsniederschlag auf Werte deutlich über 1 und an einem Pegel leicht erhöht werden, um die simulierte Ganglinie an die gemessene Ganglinie anzupassen. Als Niederschlagsinput wurde hierbei zunächst ein vom ITWH kurz nach dem Hochwassereignis im Juli 2021 nachverarbeiteter Niederschlagsrasterdatensatz für das Ahr-Einzugsgebiet (RADAR-ITWH-75) verwendet. Mit einem Gebietsniederschlag von 108 mm im Einzugsgebiet der Ahr für den Zeitraum 14.07. 07:00 Uhr bis 14.07. 21:00 Uhr MEZ lieferte dieser Datensatz bereits einen höheren Niederschlagsinput als die operationell verfügbaren Niederschlagsprodukte (vgl. Abschnitt 5.1). Die notwendige Anpassung der KG-Faktoren bei der ereignisbezogenen Kalibrierung des Hochwassers Juli 2021 bestätigte den bereits vorhandenen Verdacht, dass die bis dato verfügbaren Daten die tatsächlich gefallenen Niederschlagssummen unterschätzt haben.

Im weiteren Verlauf der Ereignisanalyse konnten weitere Niederschlagsdatensätze nachverarbeitet werden (vgl. Abschnitt 5.1). Auch mit diesen Daten wurden LARSIM-Simulationen mit dem angepassten Parametersatz durchgeführt. Dabei wurde der KG-Faktor dann auf 1 gesetzt und somit keine Korrektur des Niederschlags durchgeführt. Die berechneten Scheitelabflüsse am Pegel Altenahr sind für die verschiedenen Varianten der Niederschlagsdatensätze in Tabelle 9 zusammengestellt. Es wird deutlich, wie sich die Ergebnisse der Gebietsniederschläge in den simulierten Abflusswerten widerspiegeln. Mit dem Niederschlagsprodukt *Uni-Stuttgart-PWS* lassen sich am Pegel Altenahr Maximalabflüsse im Bereich des abgeschätzten Höchststands zwischen 750 und 1000 m³/s abbilden.

Tabelle 9: Simulierte Maximalabflüsse am Pegel Altenahr mit dem WHM LARSIM unter Verwendung des Produkts InterMet-LfU-RLP und der nachverarbeiteten Produkte RADOLAN-RL-DWD, Radar-ITWH-Ahr und Uni-Stuttgart-PWS als Niederschlagsinput (vgl. Abschnitt 5.1).

| Niederschlagsprodukt | Simulierter Maximalabfluss am Pegel Altenahr |
|--|--|
| InterMet-LfU-RLP online | 509 m ³ /s |
| RADOLAN-RL-DWD nachverarbeitet | 563 m ³ /s |
| RADAR-ITWH-Ahr nachverarbeitet | 568 m ³ /s |
| Uni-Stuttgart-PWS nachverarbeitet | 801 m ³ /s |
| InterMet-LfU-RLP online (zusätzlich mit gemessener Zulaufganglinie am Pegel Kirmutscheid*) | 567 m ³ /s |
| Uni-Stuttgart-PWS nachverarbeitet (zusätzlich mit gemessener Zulaufganglinie am Pegel Kirmutscheid*) | 854 m ³ /s |

* Zusätzliche Berechnungsläufe mit gemessener Zulaufganglinie am Pegel Kirmutscheid, da der Gebietsniederschlag für das Einzugsgebiet des Trierbachs nach derzeitiger Einschätzung unterschätzt wird.

Die gemessenen Abflussganglinien im Ahr-Einzugsgebiet können nach der ereignisbezogenen Kalibrierung sehr gut nachsimuliert werden. Die Abbildungen 26 bis 28 zeigen beispielhaft die gemessenen und simulierten Abflussganglinien an den Pegeln Müsch, Altenahr und Bad Bodendorf (Niederschlag *Uni-Stuttgart-PWS*, KG = 1, Berücksichtigung der gemessenen Zulaufganglinie am Pegel Kirmutscheid).

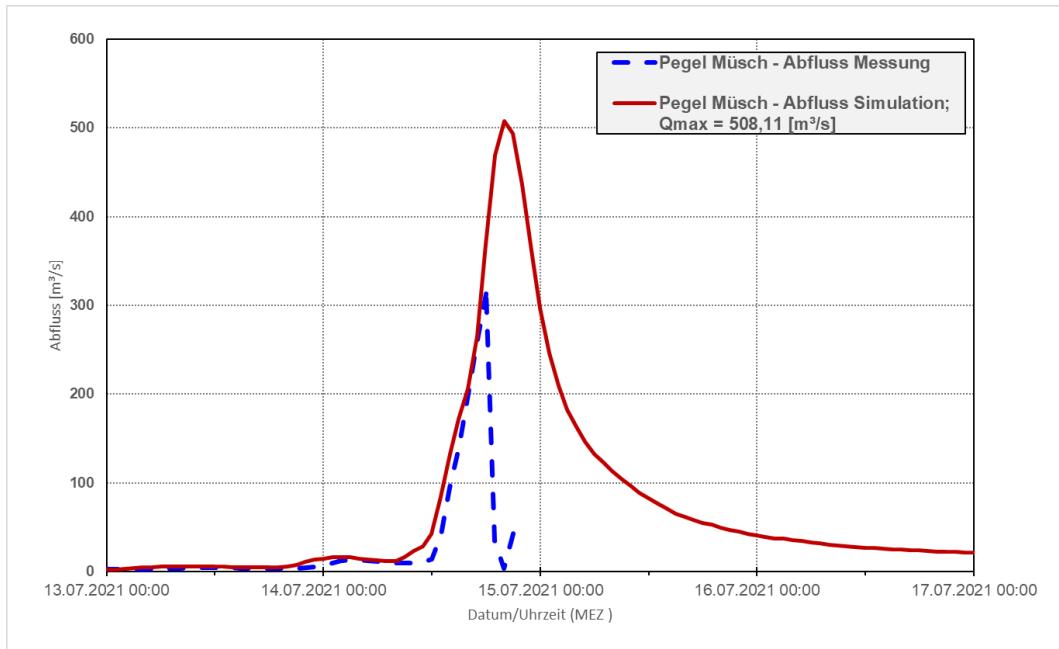


Abbildung 26: Gemessene (Daten 14.07. Uhr 19:30 – 22:00 Uhr unplausibel) und simulierte Abflussganglinie am Pegel Müsch

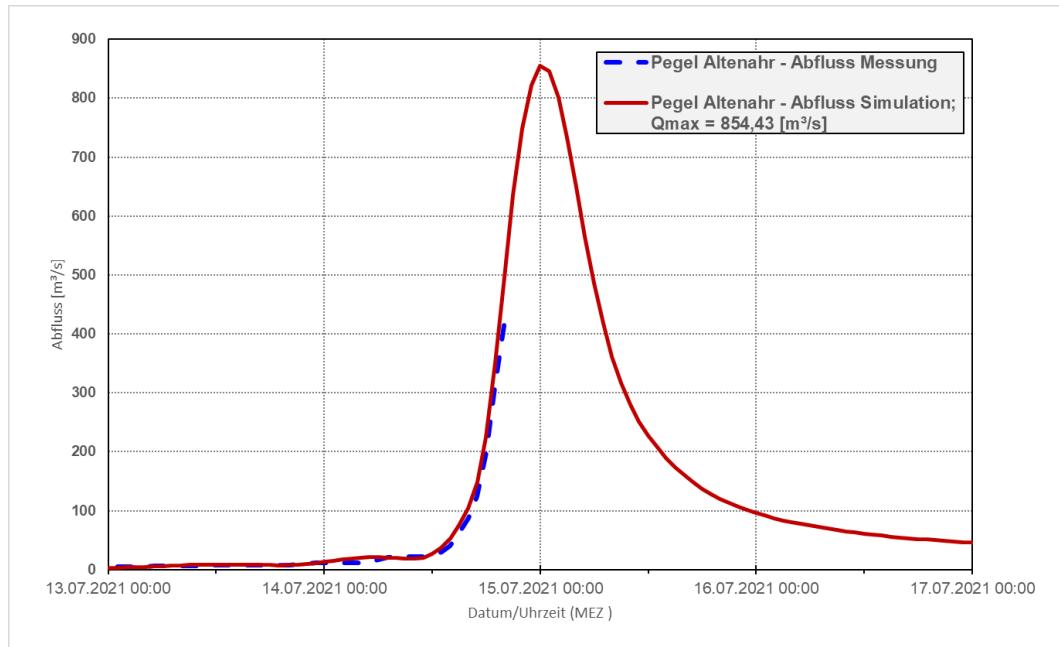


Abbildung 27: Gemessene und simulierte Abflussganglinie am Pegel Altenahr

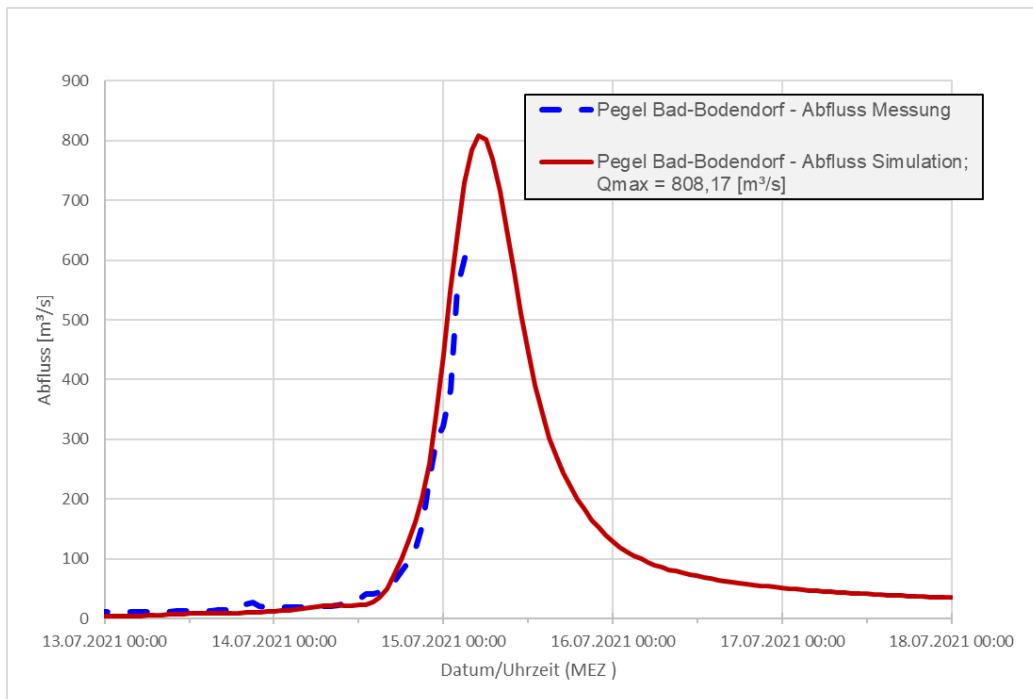


Abbildung 28: Gemessene und simulierte Abflussganglinie am Pegel Bad Bodendorf

Im Gesamtkontext der aktuell verfügbaren Analysen wird die Variante mit dem Niederschlagsdatensatz *Uni-Stuttgart-PWS* als am realistischsten bewertet. Nur am Pegel Kirmutscheid werden auch mit diesem Niederschlagsdatensatz die gemessenen Abflüsse unterschätzt. Hierzu werden derzeit weitere Analysen durchgeführt.

5.6 Hydraulische Nachberechnung

Allgemeine Angaben

Mittels hydraulischer Berechnungen wurde versucht, die Beobachtungen (z. B. Anschlagslinie) und Aufzeichnungen an den Pegeln Müsch, Altenahr und Bad Bodendorf sowie in ihrem näheren Umfeld nachzuvollziehen. Die Berechnungen erfolgten zweidimensional stationär unter Einsatz der Software Hydro_AS-2D. Die zu erstellenden Modelle im Bereich der drei genannten Pegel wurden so gewählt, dass zum eigentlichen Untersuchungsbereich ausreichend lange Vor- und Nachlaufstrecken bestehen und somit Randeinflüsse auf die relevanten Ergebnisse ausgeschlossen werden können.

Aufgebaut wurden die Modelle unter Verwendung der Gewässer- und Bauwerksprofile der Ahr aus dem TIMIS-Projekt, dem aktuellen DGM1 der Landesvermessungsverwaltung sowie den aktuellen ALKIS-Daten (Flächennutzung, Gebäudeumgriffe). Im Einzelnen wurden hierzu folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

1. Erstellung eines 3D-Flussschlauchs durch Interpolation der Gewässerprofile der Ahr entlang der aus dem DGM1 erzeugten Gewässerachse (Abbildung 29),
2. Aufbereitung der Flächennutzungsdaten und Gebäudeumgriffe, insbesondere Überprüfung auf Überschneidungsfreiheit (Abbildung 30),

3. Erzeugung eines unstrukturierten Berechnungsnetzes für das Vorland aus dem DGM1 durch Ausdünnung mittels Spezialsoftware (Polymesh) bei gleichzeitiger Einarbeitung der Umrandung des 3D-Flussschlauchs, der Flächennutzungsgrenzen und Gebäudeumgriffe,
4. Zusammenfügen des 3D-Flussschlauchs und des Berechnungsnetzes für das Vorland zum Gesamtmodell (Abbildung 31),
5. Einarbeitung der Brücken und sonstigen für das Abflussgeschehen maßgebenden Bauwerke in das Gesamtmodell, wobei von den Brücken nur die Widerlager und Pfeiler, nicht aber der Brückenträger eingearbeitet wurden¹,
6. Materialbelegung der Elemente des Berechnungsnetzes anhand der Flächennutzungsdaten und Orthofotos, Zuweisung von Rauheitsbeiwerten zu den verschiedenen Materialien (Tabelle 10), Definition der Gebäude als nicht durchströmbarer Bereiche,
7. Definition von Zuflüssen und Auslaufrandbedingungen, wobei die Zuflüsse entsprechend der aktuellen hydrologischen Erkenntnisse, die Auslaufrandbedingungen als Energieliniengefälle, abgeleitet aus dem lokalen Geländegefälle bzw. aus Ergebnissen früherer hydraulische Berechnungen, angesetzt wurden.

Die vorstehend erläuterten Arbeitsschritte werden in den nachfolgenden Abbildungen und Tabellen veranschaulicht.

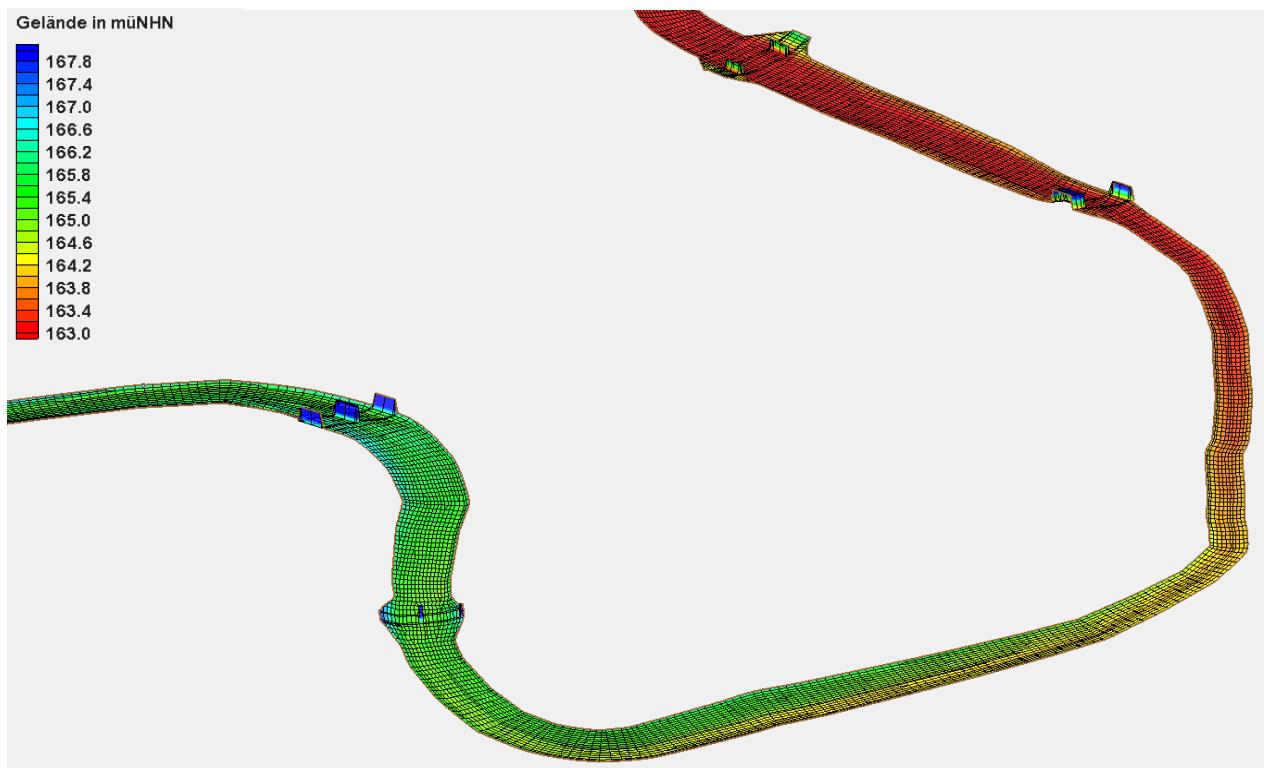


Abbildung 29: Ausschnitt aus dem 3D-Flussschlauch der Ahr im Bereich des Pegelmodells Altenahr mit eingearbeiteten Brückenwiderlagern und -pfeilern (Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung).

¹ Diese Vereinfachung erfolgte, da im Zuge der Berechnungen auch Varianten mit vollständig verlegten Brücken (Einbau der Brücke als Damm mit Dammoberkante entsprechend der Oberkante Brückenträger) untersucht wurden und in diesen Varianten die maximale denkbare Stauwirkung der Brücken erfasst werden konnte.

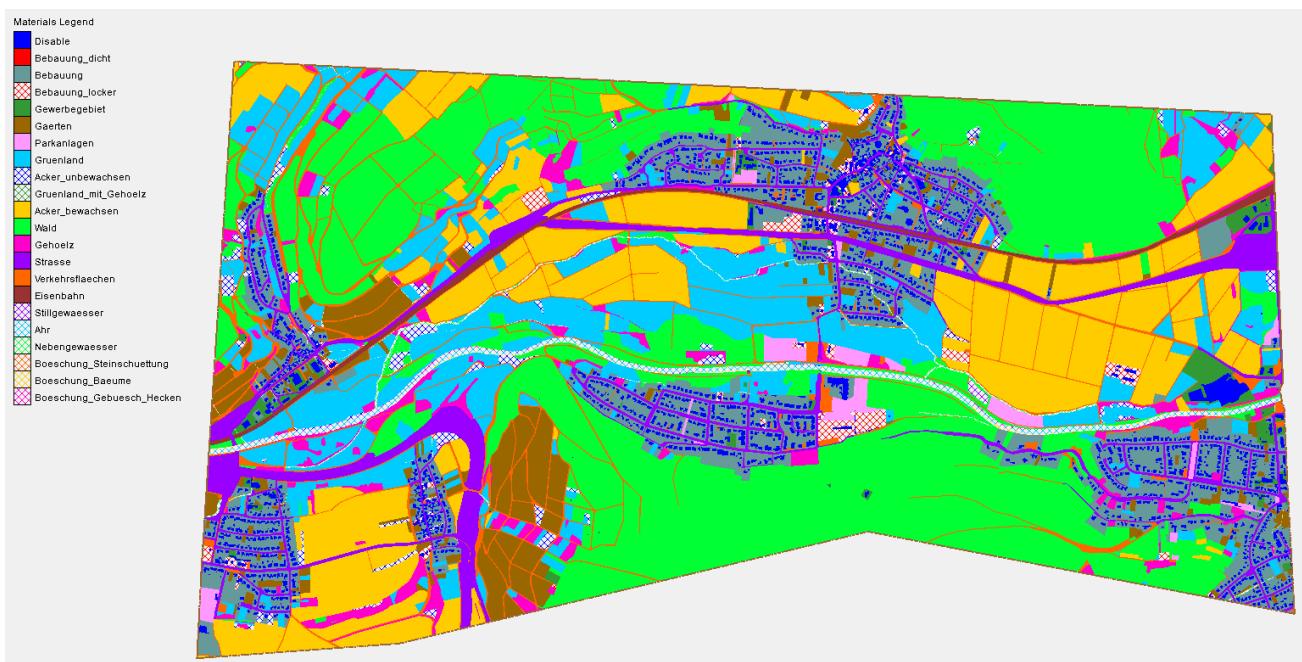


Abbildung 30: Materialbelegung im Pegelmodell Bad Bodendorf
(Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung).

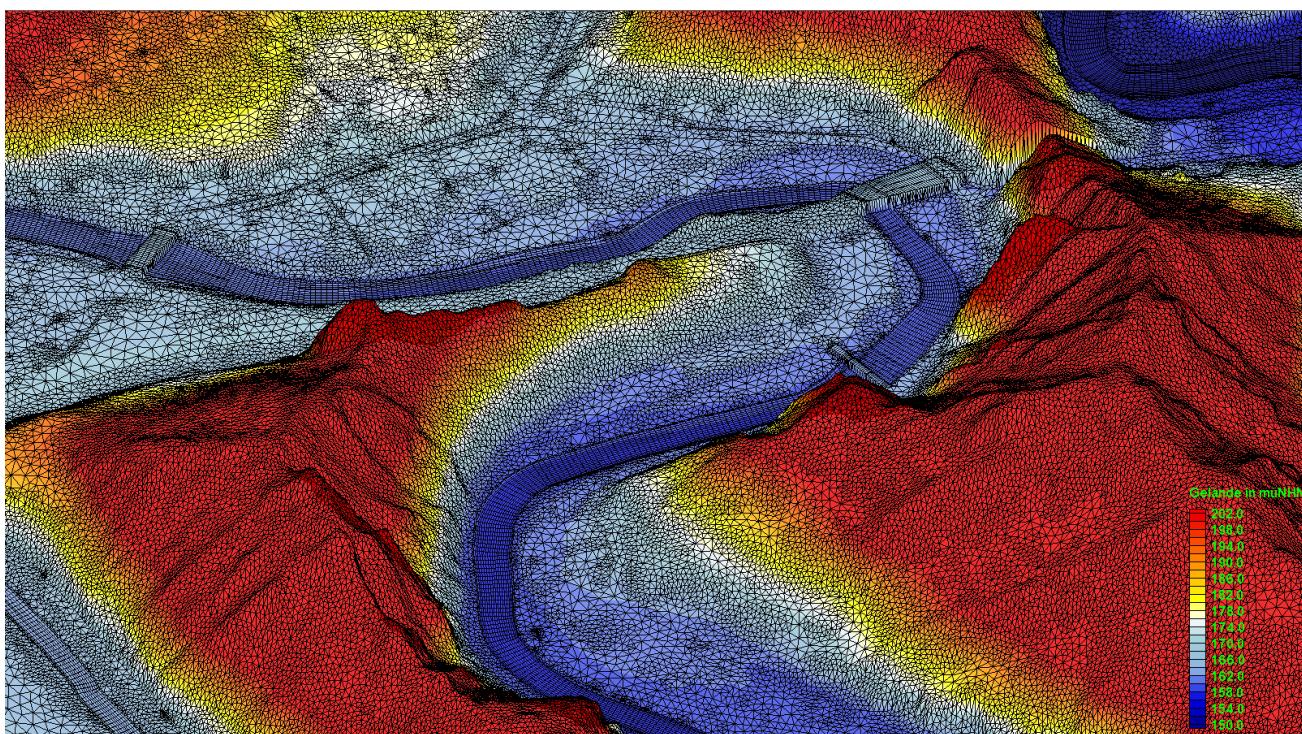


Abbildung 31: Ausschnitt aus dem Pegelmodell Altenahr, Nachbildung der Brücken als vollständig verlegt
(Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung).

Tabelle 10: Verwendete Materialien und Strickler-Beiwerte.

| Gewässer | k_{st} in $m^{1/3}/s$ | Vorland | k_{st} in $m^{1/3}/s$ |
|---------------------------|-------------------------|------------------------------------|-------------------------|
| Gewässerbett Ahr | 27,5 | Acker bewachsen / unbewachsen | 15,0 / 30,0 |
| Böschung, Steinschüttung | 17,5 | Bebauung locker / mittel /dicht | 17,5 / 15,0 / 12,5 |
| Böschung, Bäume | 12,5 | Gärten | 20,0 |
| Böschung, Gebüsch/ Hecken | 8,0 | Gehölz | 10,0 |
| Böschung, Gras | 22,5 | Gewerbegebiet | 17,5 |
| Nebengewässer | 17,5 | Grünland ohne / mit Gehölz | 22,5 / 20,0 |
| Stillgewässer | 30,0 | Eisenbahn | 22,5 |
| | | Parkanlagen | 30,0 |
| | | Straße | 45,0 |
| | | Verkehrsfläche | 40,0 |
| | | Wald | 12,5 |

Pegel Bad Bodendorf

Der Umgriff des Pegelmodells Bad Bodendorf (Abbildung 32) hat eine Größe von rd. 9,24 km² und besteht aus rd. 536.000 Knoten und rd. 1,034 Mio. Elementen.

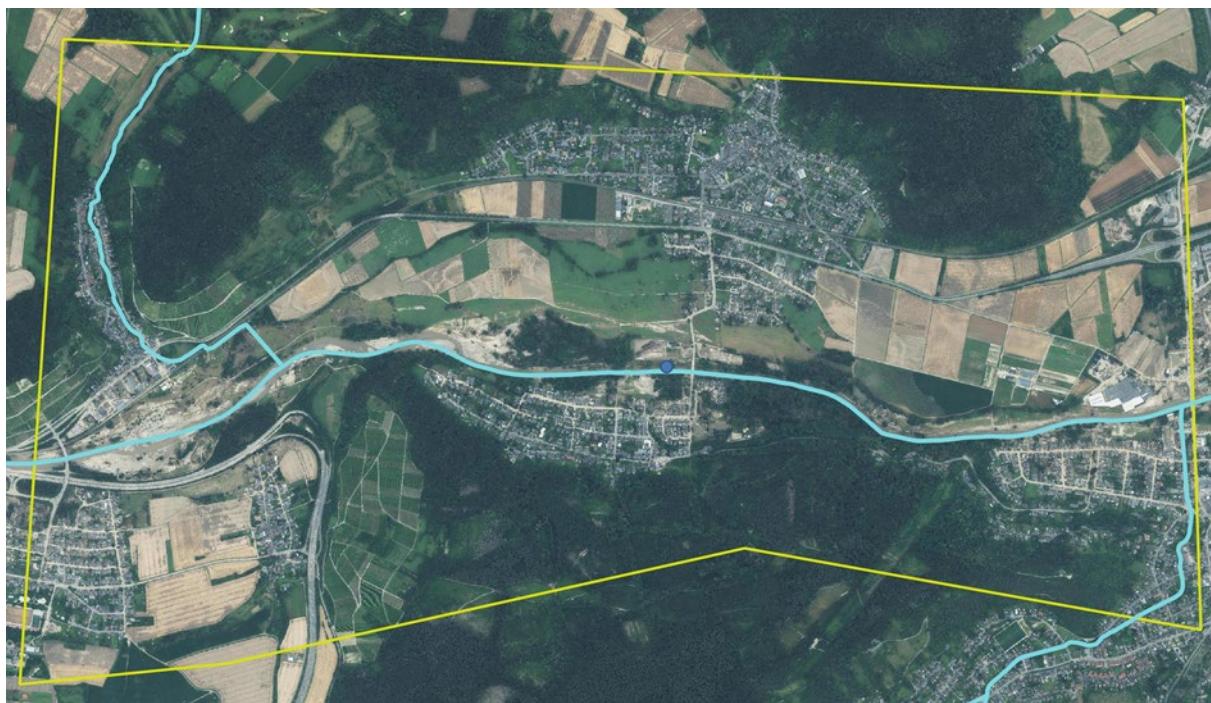


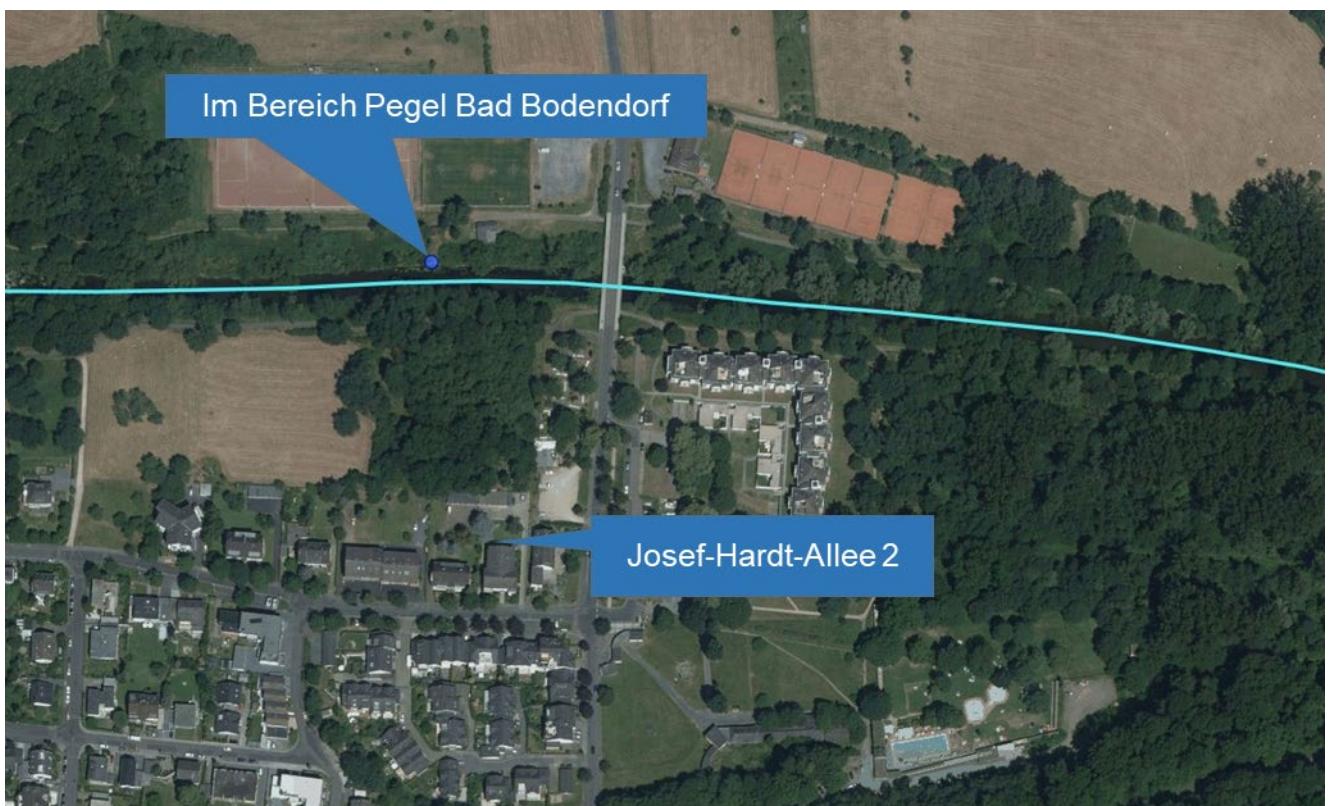
Abbildung 32: Umgriff Pegelmodell Bad Bodendorf mit Standort Pegel Bad Bodendorf
(Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung).

Mit dem Pegelmodell wurden folgende Abflussszenarien stationär berechnet:

- $Q_{Ahr} = 753 \text{ m}^3/\text{s}$
- $Q_{Ahr} = 1.200 \text{ m}^3/\text{s}$
- $Q_{Ahr} = 1.200 \text{ m}^3/\text{s}$, raue Variante

Die Brücke der Bäderstraße über die Ahr wurde aufgrund der großen Breite der Durchlassöffnung und der Höhe der Brückenunterkante bei allen Berechnungen als unverklaust¹ angesetzt.

Zur Plausibilisierung der Ergebnisse wurden die Wasserstände an zwei Kontrollpunkten (Abbildung 33) sowie die berechneten Anschlaglinien mit den Beobachtungen bzw. Aufzeichnungen verglichen. Die folgenden Abbildungen und Tabelle 11 veranschaulichen die Ergebnisse der Vergleiche.



**Abbildung 33: Kontrollpunkte im Bereich des Pegels Bad Bodendorf
(Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung).**

¹ Unter Verlegung oder Verklausung wird der vollständige Verschluss eines Fließgewässerquerschnittes infolge angeschwemmten Treibguts verstanden.

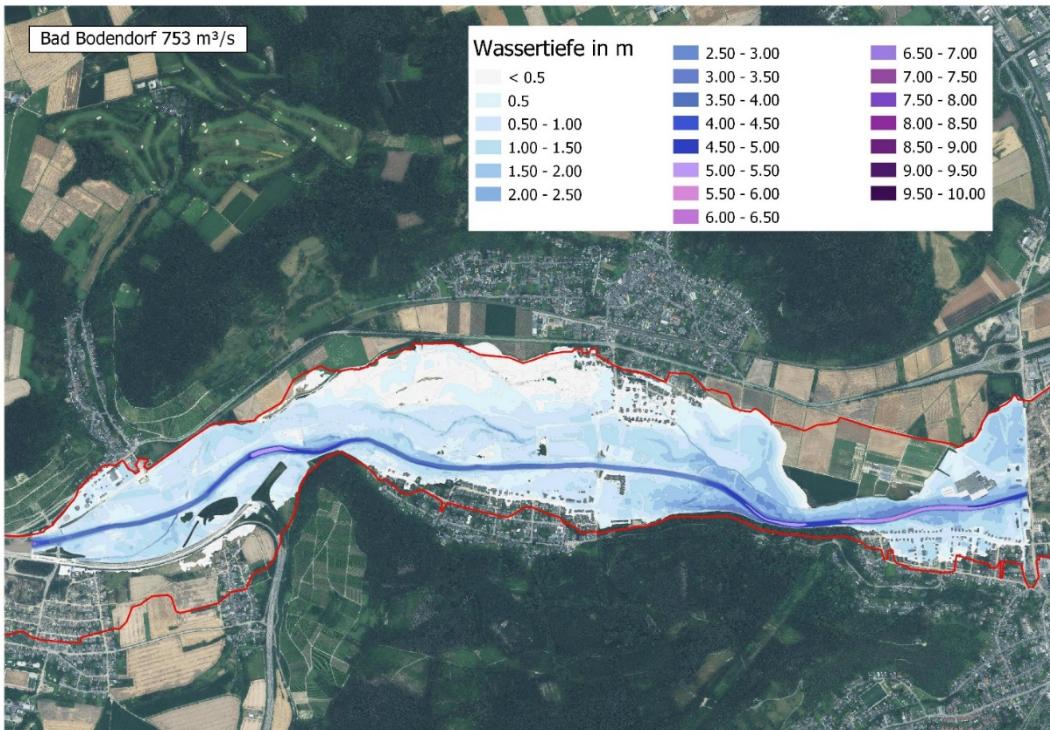


Abbildung 34: Rekonstruierte (Anschlagslinie) und berechnete ($Q = 753 \text{ m}^3/\text{s}$) Überschwemmungsflächen im Bereich des Pegels Bad Bodendorf
(Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung).

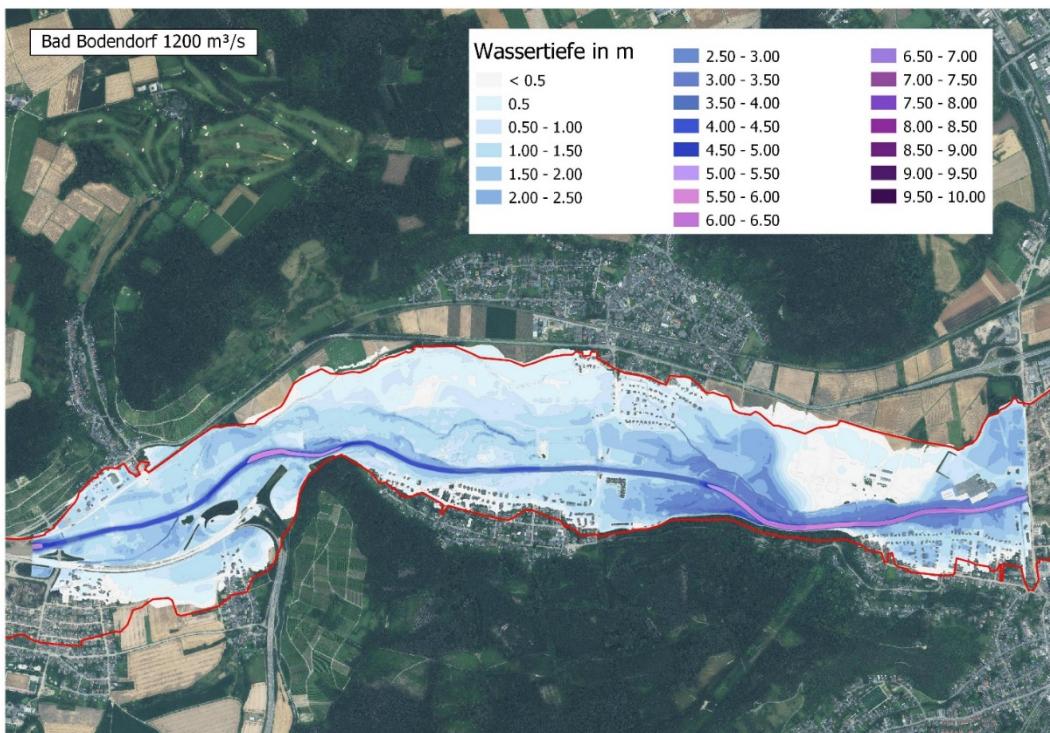


Abbildung 35: Rekonstruierte (Anschlagslinie) und berechnete ($Q = 1.200 \text{ m}^3/\text{s}$) Überschwemmungsflächen im Bereich des Pegels Bad Bodendorf
(Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung).

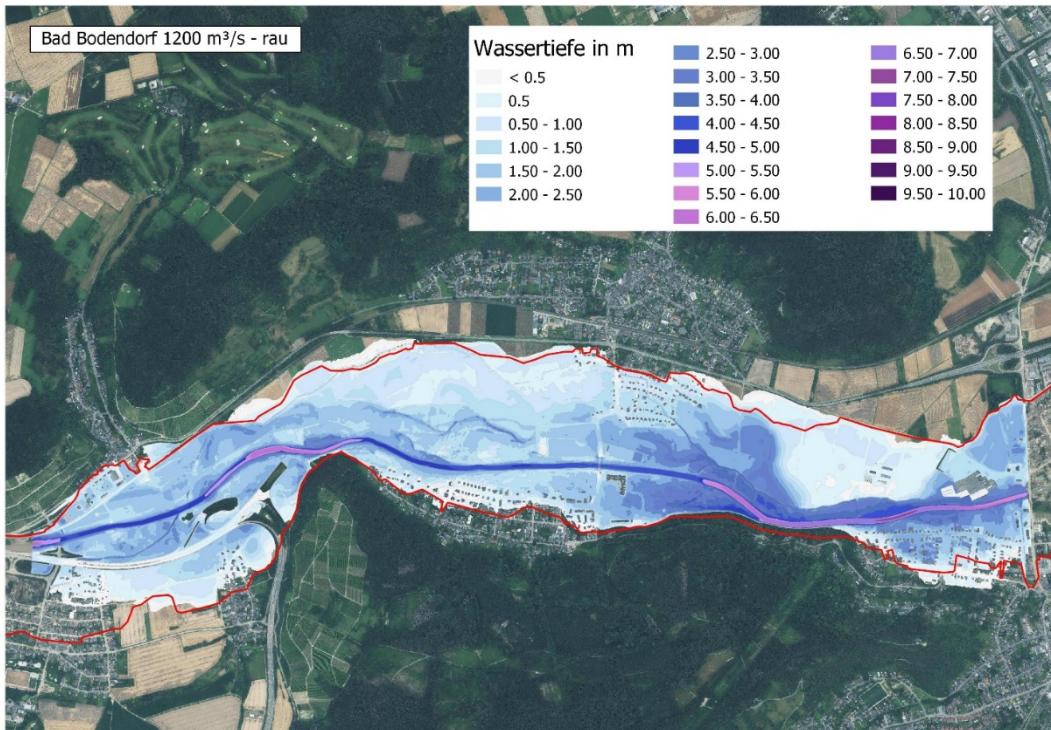


Abbildung 36: Rekonstruierte (Anschlagslinie) und berechnete ($Q = 1.200 \text{ m}^3/\text{s}$, rau Variante) Überschwemmungsflächen im Bereich des Pegels Bad Bodendorf (Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung).

Im Vergleich von Aufzeichnung / Rekonstruktion und Berechnung ist festzustellen:

- Die an den Kontrollpunkten berechneten Wasserstände liegen auch bei dem größeren der beiden betrachteten Abflüsse noch rund 40 cm (Pegel Bad Bodendorf) bzw. rund 50 cm (Josef-Hardt-Allee 2) unter der Aufzeichnung.
- Die für $Q = 753 \text{ m}^3/\text{s}$ berechnete Überschwemmungsfläche passt in einigen Bereichen gut zur Anschlagslinie. Im Bereich der Bebauung von Bad Bodendorf (vor allem südlich, in geringerem Umfang auch nördlich der Ahr), im Bereich des Wilhelmshofs und der westlich von ihm gelegenen Flächen sowie in Sinzig südlich der Ahr ist die berechnete Fläche jedoch kleiner als die rekonstruierte Fläche zwischen den Anschlagslinien. Dies gilt auch für den Bereich südlich der A 571. Dieser Unterschied ist in dem für die 2D-Berechnungen gewählten Modellausschnitt begründet; für die Bewertung der Situation im Bereich Bad Bodendorf ist er ohne Belang.
- Die für $Q = 1.200 \text{ m}^3/\text{s}$ berechnete Überschwemmungsfläche passt meist besser zur rekonstruierten Fläche als das Berechnungsergebnis für $Q = 753 \text{ m}^3/\text{s}$. Vor allem werden jetzt auch der große Bereich westlich des Wilhelmshofs sowie der Wilhelmshof selbst überschwemmt. In einigen Bereichen ragt die berechnete Überschwemmungsfläche jetzt aber über die rekonstruierte Fläche hinaus.

Die beiden vorstehenden Berechnungen wurden mit Standardansätzen für die Strickler-Beiwerte in Tabelle 10 durchgeführt. Um den Einflüssen der bei diesem Ereignis aufgetretenen morphologischen Umgestaltungen und des mitgeführten Treibguts auf den Strömungswiderstand rechnerisch

zu erfassen, wurden die Stricklerbeiwerte gegenüber den Standardwerten um fünf Einheiten verkleinert. In einem mit diesen modifizierten Rauheiten durchgeführten Rechenlauf für $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$ wurde für den Kontrollpunkt am Pegel Bad Bodendorf einen Wasserstand von 70,75 müNHN, für den Kontrollpunkt an der Josef-Hardt-Allee 2 einen Wasserstand von 70,49 müNHN ergeben. Beide Werte treffen die rekonstruierten Wasserstände sehr gut (vgl. Tabelle 11).

Abbildung 36 veranschaulicht die für diese Variante berechnete Überschwemmungsfläche im Vergleich zur rekonstruierten Überschwemmungsfläche. Danach vergrößern sich die Bereiche, in denen die berechnete Überschwemmungsfläche über die rekonstruierte hinausragt. Dies betrifft vor allem den nördlichen Rand der Überschwemmungsfläche sowie den Bereich in Sinzig südlich der Ahr. Aufgrund der Unsicherheiten bei der Rekonstruktion der Überschwemmungsflächen sind diese Abweichungen aber nachrangig im Vergleich zu der beim Abgleich berechneter / rekonstruierter Wasserstände erreichten Güte.

Tabelle 11: Berechnung des Wasserstandes im Bereich Pegel Bad Bodendorf (blau: höchste Übereinstimmung von Berechnung mit Aufzeichnung).

| | Wasserstand Kontrollpunkte Bad Bodendorf | | | |
|-----------------------------------|---|--------------|---------------------------------------|--------------|
| | Linkes Ufer (Pegel) | | Rechtes Ufer (Josef-Hardt-Allee 2) | |
| | [müNHN] | [m] | [müNHN] | [m] |
| Aufzeichnung | 70,78 | | 70,57 | |
| 753 [m ³ /s] | 69,91 | -0,87 | 69,55 | -1,02 |
| 1200 [m ³ /s] | 70,36 | -0,42 | 70,04 | -0,53 |
| 1200 [m³/s] rau | 70,75 | -0,03 | 70,49 | -0,08 |



Abbildung 37: Situation am Kontrollpunkt Josef-Hardt-Allee 2 (LVerMGeo RP 2021).



Abbildung 38: Situation am Kontrollpunkt Pegel Bad Bodendorf (Foto: LVerMGeo RP 2021).

Als Fazit vorstehender Ausführungen ist festzuhalten, dass sich die rekonstruierten Wasserstände an den beiden Kontrollpunkten unter Ansatz eines Abflusses von 1.200 m³/s und der Annahme rauer Verhältnisse sehr gut nachbilden lassen.

Pegel Altenahr

Der Umgriff des Pegelmodells Altenahr (Abbildung 39) hat eine Größe von rd. 2,5 km² und besteht aus rd. 285.000 Knoten und rd. 536.000 Elementen.

Mit dem Pegelmodell wurden folgende Abflussszenarien stationär berechnet:

- $Q_{Ahr} = 753 \text{ m}^3/\text{s}$
- $Q_{Ahr} = 900 \text{ m}^3/\text{s}$
- $Q_{Ahr} = 1.200 \text{ m}^3/\text{s}$
- $Q_{Ahr} = 753 \text{ m}^3/\text{s}$, alle Brücken vollständig verlegt



**Abbildung 39: Umgriff Pegelmodell Altenahr mit Standort Pegel Altenahr
(Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung).**

Zur Plausibilisierung der Ergebnisse wurden die Wasserstände an drei Kontrollpunkten (Pegel Altenahr, Kläranlage Altenahr (2x)) sowie die berechneten Anschlagslinien mit den Beobachtungen bzw. Aufzeichnungen verglichen. Die folgenden Abbildungen veranschaulichen die Ergebnisse der Vergleiche.

Die berechneten Überschwemmungsflächen stimmen selbst für den kleinsten betrachteten Abfluss von $753 \text{ m}^3/\text{s}$ (Abbildung 42) recht gut mit den rekonstruierten Überschwemmungsflächen überein. Angesichts des engen Tals mit seinen steilen Talflanken war dies aber auch zu erwarten.

Im Hinblick auf die berechneten Wasserstände ist jedoch zu erkennen, dass selbst bei einem Abfluss von $1.200 \text{ m}^3/\text{s}$ (zum Vergleich: gemäß Nachrechnung des Ereignisses mittels hydrologischem Modell lag der Scheitelabfluss am Pegel Altenahr bei $753 \text{ m}^3/\text{s}$; Stand: November 2021) die Ergebnisse am Pegel Altenahr noch rund 0,9 m, an den beiden Kontrollpunkten im Bereich der Kläranlage Altenahr rund 1,8 m bzw. rund 1,95 m unter den Aufzeichnungen (Tabelle 12). Diese große Differenz lässt sich nicht durch die den Berechnungen zugrunde gelegten Stricklerbeiwerte oder die Nachbildung der Brücken (nur Wiederlager und Pfeiler) im Berechnungsmodell erklären. Die Erklärung ist hier die auch beobachtete und dokumentierte massive Verklausung der Brücken (insbesondere der Bogenbrücken mit vergleichsweise kleinen Durchflussöffnungen) durch mitgeführtes Treibgut.

Vor diesem Hintergrund wurde eine Modellvariante untersucht, bei der alle Brücken als vollständig verklaust angenommen wurden. Modelltechnisch wurde dies durch Einarbeitung von Dämmen in das Berechnungsmodell realisiert, wobei die Dammkrone der Oberkante des Brückenträgers höhenmäßig gleichgesetzt wurde. Mit diesem Modell wurde ein Rechenlauf unter Ansatz eines Abflusses von $753 \text{ m}^3/\text{s}$ durchgeführt (Abbildung 43). Danach wird unter der Annahme von vollständig verklausten Brücken der rekonstruierte Wasserstand am Pegel Altenahr bei einem Abfluss von

753 m³/s rechnerisch um 30 cm überschritten (Tabelle 11). Im Bereich der Kläranlage Altenahr weichen die Berechnungsergebnisse dagegen noch deutlich von den rekonstruierten Werten ab (Tabelle 12).



Abbildung 40: Kontrollpunkt am Pegel Altenahr, Brücken unverlegt
(Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung).



Abbildung 41: Kontrollpunkte an der Kläranlage Altenahr, Brücken unverlegt
(Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung).

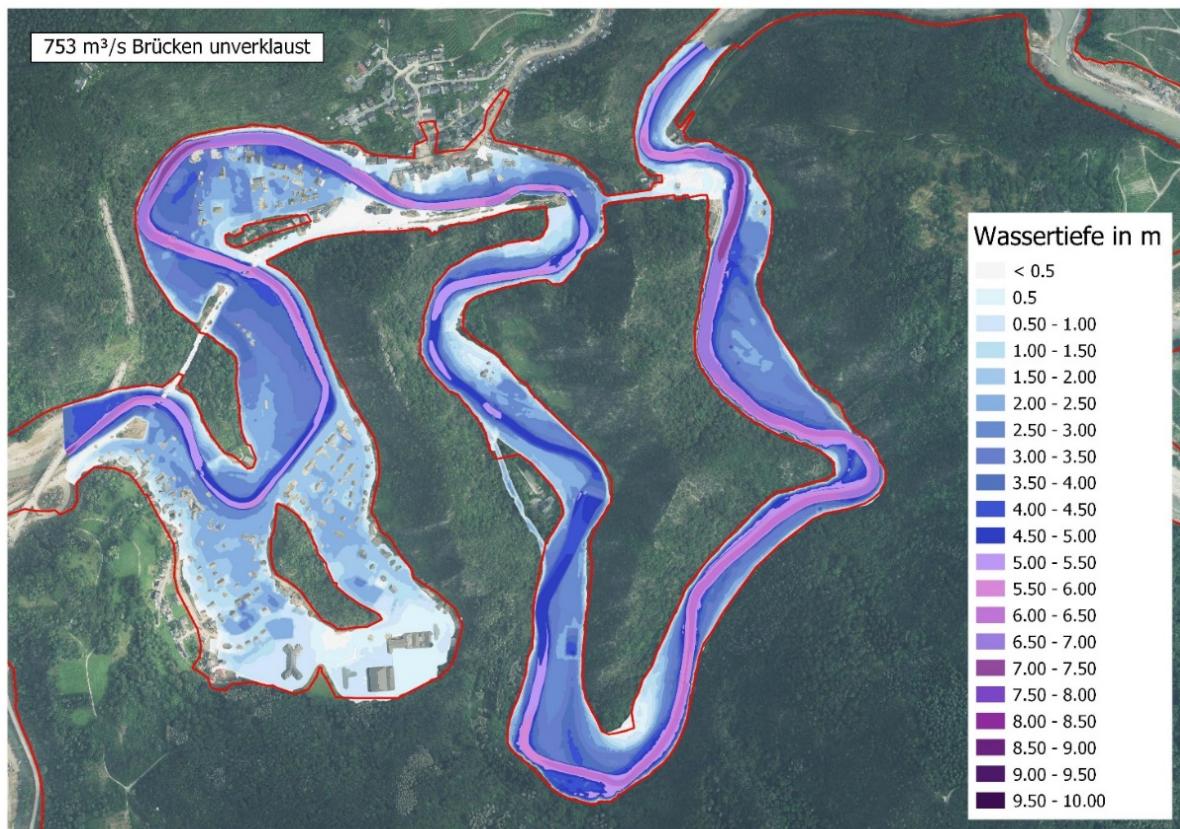


Abbildung 42: Rekonstruierte und berechnete ($Q = 753 \text{ m}^3/\text{s}$, unverklaust) Überschwemmungsflächen im Bereich des Pegels Altenahr
(Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung).

Tabelle 12: Berechnung des Wasserstandes unter Berücksichtigung der Verklausung der Brücken im Bereich Pegel Altenahr (blau: höchste Übereinstimmung von Berechnung mit Aufzeichnung).

| | Wasserstand Im Bereich Pegel Altenahr | | | |
|--------------|--|-------|--------------------|------------|
| | ohne Verklausung | | mit Verklausung | |
| | [müNHN] | [m] | [müNHN] | [m] |
| Aufzeichnung | 170,5 | | | |
| 753 [m³/s] | 167,62 | -2,88 | 170,8 | 0,3 |
| 900 [m³/s] | 168,33 | -2,17 | | |
| 1200 [m³/s] | 169,58 | -0,92 | | |

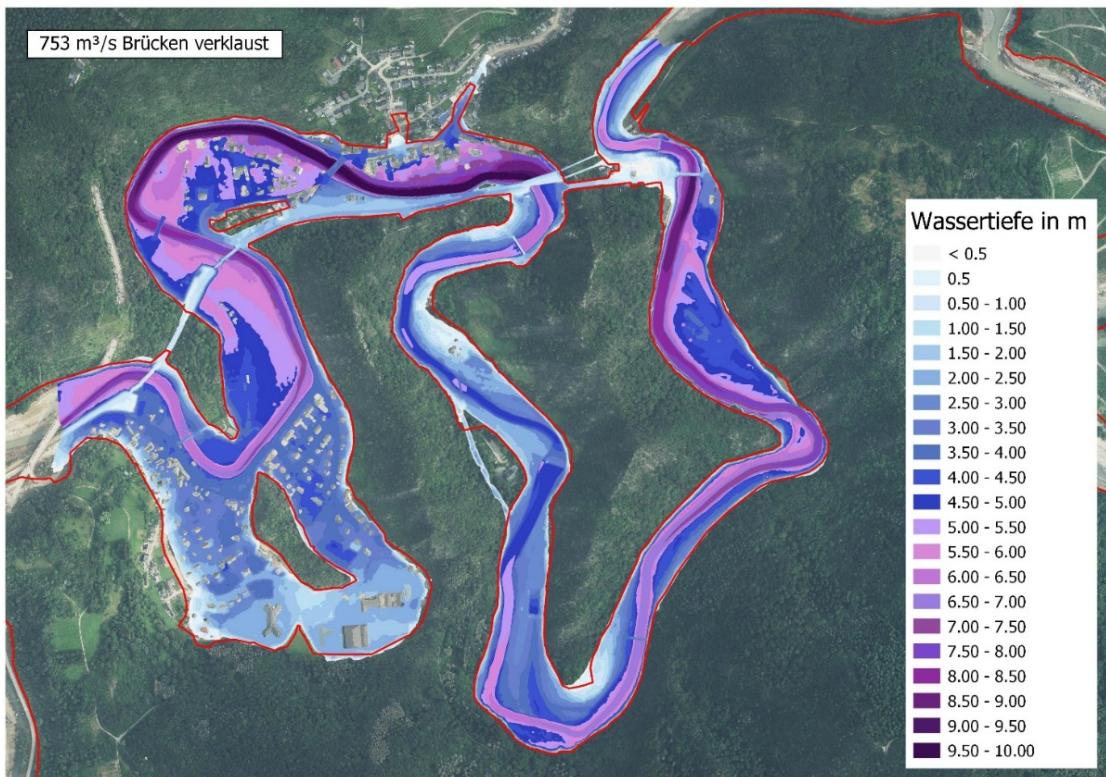


Abbildung 43: Rekonstruierte und berechnete ($Q = 753 \text{ m}^3/\text{s}$, verklaut) Überschwemmungsflächen im Bereich des Pegels Altenahr
(Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung).

Tabelle 13: Berechnung des Wasserstandes unter Berücksichtigung der Verklausung der Brücken im Bereich KA Altenahr (blau: höchste Übereinstimmung von Berechnung mit Aufzeichnung).

| | Wasserstand KA Altenahr 1 | | | | Wasserstand KA Altenahr 2 | | | |
|--------------------------|------------------------------|-------|--------------------|--------------|------------------------------|--------------|--------------------|--------------|
| | ohne Verklausung | | mit Verklausung | | ohne Verklausung | | mit Verklausung | |
| | [mÜNHN] | [m] | [mÜNHN] | [m] | [mÜNHN] | [m] | [mÜNHN] | [m] |
| Aufzeichnung | 159,95 | | | | 159,95 | | | |
| 753 [m ³ /s] | 156,07 | -3,88 | 158,12 | -1,83 | 156,19 | -3,76 | 158,08 | -1,87 |
| 900 [m ³ /s] | 156,78 | -3,17 | | | 156,93 | -3,02 | | |
| 1200 [m ³ /s] | 158,02 | -1,93 | | | 158,17 | -1,78 | | |

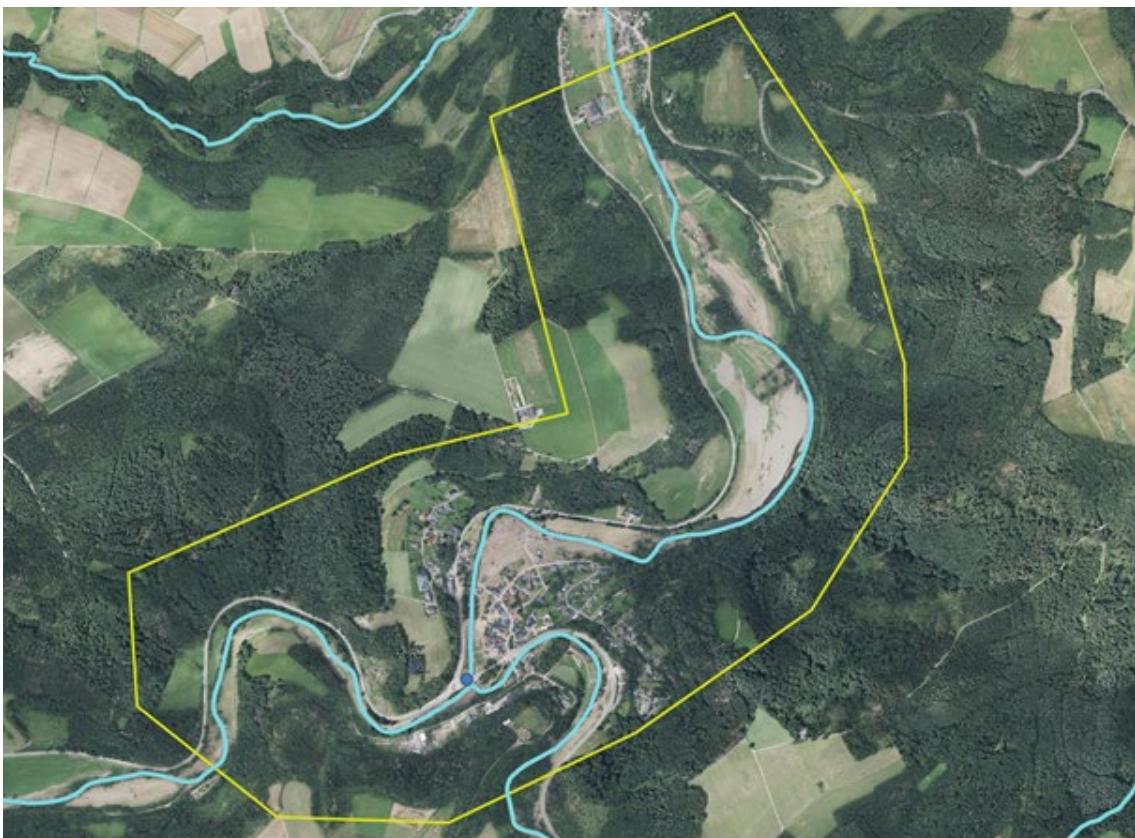
Als Fazit der bisherigen Untersuchungen ist festzuhalten, dass viele Prozesse wie z.B. Verklausung von Brücken, Eigenschaften des Fluids (Schlamm, Geröll), Veränderung der Rauheiten, Veränderungen des Gewässerbettes, zu den beobachteten Wasserständen beigetragen haben. Die bisherigen Untersuchungen für den Pegel Altenahr zeigen, dass sich die aus den Beobachtungen und Aufzeichnungen rekonstruierten Wasserstände prinzipiell nachvollziehen lassen. Unter der Annahme

einer vollständigen Verklausung der Brücken konnte exemplarisch am Pegel Altenahr ein Wasserstand in der Größenordnung des gemessenen Wasserstandes aufgezeigt werden. Somit konnte exemplarisch nachgewiesen werden, dass die Verklausung der Brücken einen maßgeblichen Anteil an den gemessenen Wasserständen hat.

Es wird aber auch deutlich, dass im Bereich der KA Altenahr weitere Prozesse, z.B. das Versagen der Brücken mit induzierter Schwallwelle stattgefunden haben müssen, um die beobachteten Wasserstände nachvollziehen zu können. Derartige Nachweise bleiben weiteren Untersuchungen vorbehalten.

Pegel Müsch

Das Pegelmodell Müsch hat eine Größe von rd. 2,3 km² und besteht aus rd. 343.000 Knoten und rd. 666.000 Elementen (Abbildung 44).



**Abbildung 44: Umgriff Pegelmodell Müsch mit Standort Pegel Müsch
(Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung).**

Mit dem Pegelmodell wurden folgende Abflussszenarien stationär berechnet:

- $Q_{Ahr} = 508 \text{ m}^3/\text{s}$
- $Q_{Ahr} = 508 \text{ m}^3/\text{s}$, alle Brücken vollständig verlegt
- $Q_{Ahr} = 508 \text{ m}^3/\text{s}$, raue Variante
- $Q_{Ahr} = 508 \text{ m}^3/\text{s}$, raue Variante (nur Ahr)

Zur Plausibilisierung der Ergebnisse wurden die Wasserstände an zwei Kontrollpunkten (Abbildung 45) sowie die berechneten Anschlagslinien mit den Beobachtungen bzw. Aufzeichnungen verglichen. Die folgenden Abbildungen veranschaulichen die Ergebnisse der Vergleiche.

Beim Rechenlauf 508 m³/s, rau Variante, wurden die Strickler-Biwerte aller Materialien pauschal um fünf Einheiten und beim Rechenlauf 508 m³/s, rau Variante (nur Ahr), wurden nur die Strickler-Biwerte der Materialien im Gewässer um fünf Einheiten gegenüber den Standardwerten verringert.



Abbildung 45: Kontrollpunkte Bergstraße 1 und Gartenstraße 3
(Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung).

Unter der Annahme einer unverlegten Brücke liegen die Berechnungen für 508 m³/s unter Verwendung der Standardwerte für die Rauheiten rund 28 cm (Gartenstraße 3) bzw. rund 14 cm (Bergstraße 1) tiefer als die Rekonstruktion. Um den Einfluss der Rauheiten im Überschwemmungsreich zu untersuchen, wurden die Stricklerbeiwerte variiert. Unter der Annahme einer unverlegten Brücke und pauschal rauer Verhältnisse werden die rekonstruierten Wasserstände durch die Berechnungen um rund 9 cm (Gartenstraße 3) bzw. rund 48 cm (Bergstraße 1) überschätzt. Unter der Annahme einer unverlegten Brücke und rauer Verhältnisse (nur Ahr) wird der rekonstruierte Wasserstand im Bereich der Gartenstraße 3 um rund 10 cm unterschätzt und im Bereich der Bergstraße 1 um rund 7 cm überschätzt (Tabelle 14).

Tabelle 14: Berechnung des Wasserstandes bei einem Abfluss von 508 m³/s unter Berücksichtigung der Verklausung der Brücken bzw. rauer Verhältnisse im Bereich Pegel Müsch (blau: höchste Übereinstimmung von Berechnung und Rekonstruktion)

| | Pegel Müsch | | | |
|--|--------------|-------|----------------|-------|
| | Bergstraße 1 | | Gartenstraße 3 | |
| | [mÜNHN] | [m] | [mÜNHN] | [m] |
| Rekonstruktion | 296,466 | | 298,745 | |
| 508 [m ³ /s], unverklaust | 296,322 | -0,14 | 298,467 | -0,28 |
| 508 [m ³ /s] verklaust | 296,640 | 0,17 | 299,482 | 0,74 |
| 508 [m ³ /s] rau, unverklaust | 296,946 | 0,48 | 298,837 | 0,09 |
| 508 [m ³ /s] rau nur Ahr, unverklaust | 296,534 | 0,07 | 298,649 | -0,10 |

Die berechneten Überschwemmungsflächen stimmen für den betrachteten Abfluss von $508 \text{ m}^3/\text{s}$ recht gut mit den rekonstruierten Überschwemmungsflächen überein (Abbildung 48 und Abbildung 49). Die berechneten Flächen sind abschnittsweise kleiner als die rekonstruierten Flächen. Im Bereich des vor der oberen Brücke von Süden einmündenden Nebengewässers ist das auch zu erwarten, da dieses Gewässer in den Berechnungen keinen eigenen Abfluss hat, sondern nur im Rückstau beschickt wird.

Tendenziell könnte die untere Randbedingung etwas ungünstiger angesetzt werden. Dadurch sind zwar im stromab liegenden Teil des Berechnungsmodells höhere Wasserstände zu erwarten. Diese wirken sich aber nicht auf das Ergebnis im Bereich Pegel Müsch bzw. der zwei Kontrollpunkte aus.

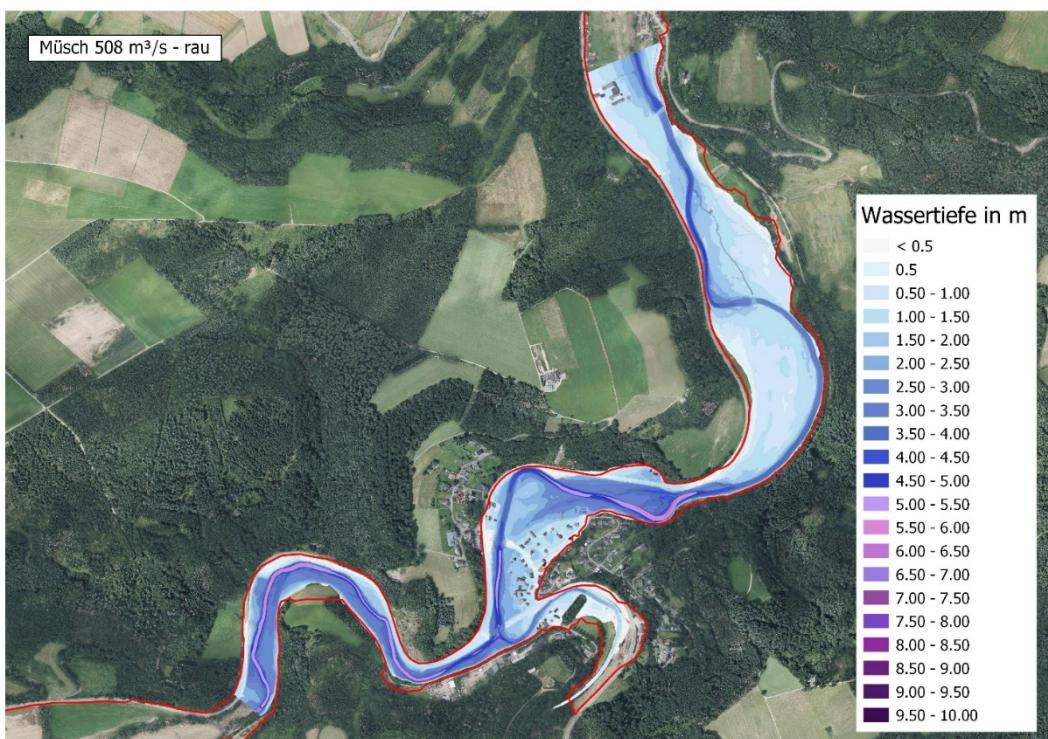


Abbildung 46: Rekonstruierte und berechnete Überschwemmungsflächen ($Q = 508 \text{ m}^3/\text{s}$, unverklaust) im Bereich des Pegels Müsch (Vorland und Flussschlauch rauer) (Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung).

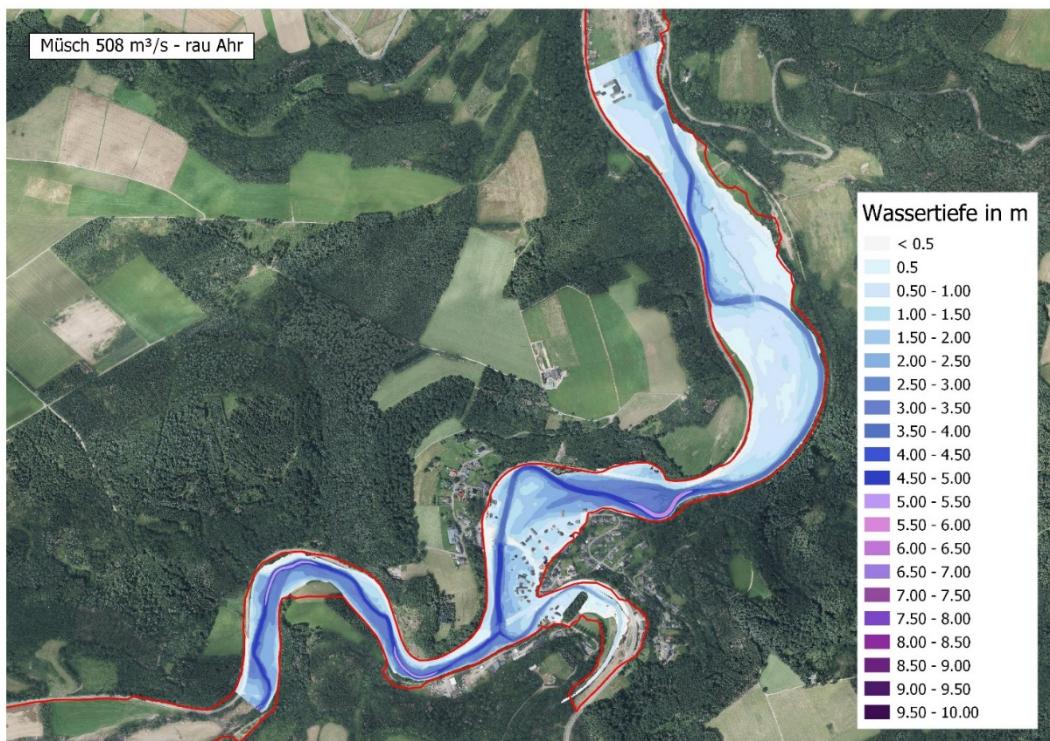


Abbildung 47: Rekonstruierte und berechnete Überschwemmungsflächen ($Q = 508 \text{ m}^3/\text{s}$, unverklaust) im Bereich des Pegels Müsch (Flussschlauch rauer)
(Datengrundlage: Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung).

Grundsätzlich wurde auch der Einfluss einer Verlegung der in Höhe des Pegels über die Ahr führenden Brücke untersucht. Im Vergleich zur unverklausten Brücke berechnen sich 74 cm (Gartenstraße 3) bzw. 17 cm (Bergstraße 1) höhere Wasserstände. Im Vergleich zur Situation am Pegel Altenahr ist der durch die Verklausung der Brücke im Oberwasser hervorgerufene Anstieg des Wasserstandes gering. Zurückzuführen ist dies auf die bereits ohne Verlegung überströmte Zufahrt zur Brücke. Diese Überströmung wird durch die Verklausung verstärkt, d.h. das Wasser „weicht seitlich aus“.

LITERATUR

Bárdossy A. et. al. (2021): The use of personal weather station observations to improve precipitation estimation and interpolation, Universität Stuttgart. Hydrology and Earth System Sciences, 25, 583 – 601.

Bárdossy A. et. al. (2022): Projektbericht – Verbesserung der Abschätzung von Gebietsniederschlägen mittels opportunistischer Niederschlagsmessungen am Beispiel des Ahr-Hochwassers im Juli 2021. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 66 Jg. Heft 4, 208-214.

Bremicker, M., Casper, M.C., Haag, I. (2011): Extrapolationsfähigkeit des Wasserhaushaltsmodells LARSIM auf extreme Abflüsse am Beispiel der Schwarzen Pockau. KW Korrespondenz Wasserwirtschaft, 2011/4 (8), S. 445 – 451.

Dietze, M. & U. Öztürk (2021): A flood disaster reponse challenges. Sciene Vol. 373, Issue 6561, p. 1317-1318. DOI: 10.1126/science.abm0617

Dietze, M. & U. Öztürk (2021): Untersuchungen zu selbstverstärkenden Effekten der Hochwasserkatastrophe an Ahr und Erft. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 65 Jg. Heft 6, 284-285.

Dobler, L.; N. Gerlach & A. Hinterding (2004): Interpolation stündlicher und tagesbasierter meteorologischer Parameter – Gesamtdokumentation, Unveröffentlichter Projektbericht, Institut für Geoinformatik der Westfälischen Wilhelms-Universität, Münster.

DWD (2020): RADOLAN Kurzbeschreibung – Radargestützte Analysen stündlicher Niederschlagshöhen im Echtzeitbetrieb für Deutschland (RADOLAN) und Mitteleuropa (RADOLAN-ME), Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main.

Eberz, D. (2021, 17. Dezember): Brisante Erkenntnisse zur Flutnacht und über Ex-Landrat Pföhler: Wird ein Ehrenamtler das Bauernopfer? Rhein-Zeitung. https://www.rhein-zeitung.de/region/rheinland-pfalz_artikel,-brisante-erkenntnisse-zur-flutnacht-und-ueber-exlandrat-pfoehler-wird-ein-ehrenamtler-das-bauernopfer- arid,2349250.html

Haag, I., Krumm, J., Aigner, D., Steinbrich, A. & Weiler, M. (2022): Simulation von Hochwasserereignissen in Folge lokaler Starkregenereignisse mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung HW 66, H.1, S. 6 - 27. DOI: 10.5675/HyWa_2022.1.

Junghänel T. et al. (2017): KOSTRA-DWD-2010R - Bericht zur Revision der koordinierten Starkregionalisierung und –auswertung des Deutschen Wetterdienstes in der Version 2010, Abteilung Hydrometeorologie, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main.

Junghänel T. et al. (2021): Bericht - Hydro-klimatologische Einordnung der Stark- und Dauerniederschläge in Teilen Deutschlands im Zusammenhang mit dem Tiefdruckgebiet „Bernd“ vom 12. bis 19. Juli 2021, Geschäftsbereich Klima und Umwelt, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main.

Krämer S. & I. Radtke (2021): Radarhydrometeorologische Rekonstruktion des Niederschlagextremereignisses vom 14.07.2021 in der Ahr- und Eifelregion, Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH, Hannover. Unveröffentlichter Projektbericht im Auftrag des Landesamtes für Umwelt Rheinland-Pfalz.

LfUG – Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2004): Hochwasser August 2002 in den Osterzgebirgsflüsse – Ereignisanalyse. Materialien zur Wasserwirtschaft, Artikelnummer: L II-1/26.

LARSIM-Entwicklergemeinschaft - Hochwasserzentralen LUBW, BLfU, LfU RP, HLNUG, BAFU (2022): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele – <https://www.larsim.info/dokumentation/LARSIM-Dokumentation.pdf>

LAWA – Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (2021): Bericht zur Evaluation der Handlungsempfehlungen zur weiteren Verbesserung von Grundlagen und Qualität der Hochwasservorhersage an den deutschen Binnengewässern. LAWA-Publikationen zu Hochwasser und Niedrigwasser.

McKee, T., N. Doesken & J. Kleist (1993): The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. Eighth Conference on Applied Climatology.

Mdl – Ministerium des Inneren und für Sport, Rheinland-Pfalz (2022): Bericht zum Wiederaufbau in Rheinland-Pfalz nach der Naturkatastrophe vom 14./15. Juli 2021.

Mohr, S., Ehret, U., Kunz, M., Ludwig, P., Caldas-Alvarez, A., Daniell, J. E., Ehmele, F., Feldmann, H., Franca, M. J., Gattke, C., Hundhausen, M., Knippertz, P., Küpfer, K., Mühr, B., Pinto, J. G., Quinting, J., Schäfer, A. M., Scheibel, M., Seidel, F., and Wisotzky, C. (2022): A multi-disciplinary analysis of the exceptional flood event of July 2021 in central Europe. Part 1: Event description and analysis, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss. DOI: 10.5194/nhess-2022-137.

Roggenkamp, T. & J. Herget (2014): Reconstructing peak discharges of historic floods in the River Ahr, Germany. Erdkunde, 68(1).

Roggenkamp, T. & J. Herget (2015): Historische Hochwasser der Ahr, Heimatjahrbuch Kreis Ahrweiler.

Roggenkamp, T. and J. Herget (2022). Hochwasser der Ahr im Juli 2021 - Abflusseinschätzung und Einordnung. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 66 Jg. Heft 1, 40-49, 2022.

Tradowsky, J.S., Sjoukje S., Philip, Y., Kreienkamp, F., Kew, S.F., Lorenz, P., Arrighi, J., Bettmann, T., Caluwaerts, S., Chan, S.C., De Cruz, L., de Vries, H., Demuth, N., Ferrone, A., Fischer, E.M., Fowler, H.J., Görgen, K., Heinrich, D., Henrichs, 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., van Aalst, M., Van den Bergh, J., Van de Vyver, H., Vannitsem, S., van Oldenborgh, G.J., Van Schaeybroeck, B., Vautard, R., Vonk, D. and Wanders, N. (2022): Attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021, Nature, eingereicht.

Vorogushyn, S., H. Apel, M. Kemter, & A. Thielen (2022): Analyse der Hochwassergefährdung im Ahrtal unter Berücksichtigung historischer Hochwasser. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, im Review.

World Weather Attribution (WWA) (2021): Rapid attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021, Studie, unter: <https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/Scientific-report-Western-Europe-floods-2021-attribution.pdf>