

Empfehlungen zur Aufstellung von Hochwasserstatistiken in NRW unter Berücksichtigung hydrologischer Erkennt- nisse aus dem Juli-Hochwasser 2021

**Abschlussbericht der Unterarbeitsgruppe „Hochwasserstatistik“
zur Kommission „Hochwasserschutz in Zeiten des Klimawandels“**

Mai 2023

v1.1 mit redaktionellen Änderungen

Inhalt

1	Einführung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Hochwasserstatistik und ihre Bedeutung.....	1
1.3	Zielsetzung der Unterarbeitsgruppe	2
1.4	Struktur des Dokuments.....	3
1.5	Mitglieder der UAG.....	3
2	Aufbereitung hydrologischer Daten des Juli-Hochwassers 2021	5
2.1	Scheitelabflüsse des Juli-Hochwassers 2021	5
2.2	Daten der relevanten Niederschläge für das Juli-Hochwasser 2021.....	6
3	Projekte zur statistischen Einordnung von Abfluss und Niederschlag des Juli-Ereignisses 2021	9
3.1	Statistische Einordnung des Niederschlagsereignisses nach PEN-LAWA.....	9
3.2	Aktualisierung der Hochwasserstatistik an der Erft.....	9
3.3	Aufstellung einer Ereignisanalyse des Hochwasserereignisses 2021 in NRW	13
4	Empfehlungen zur Aktualisierung der Hochwasserstatistik.....	14
4.1	Empfehlungen des DWA-M 552	14
4.2	Hüllkurvenverfahren	15
4.3	Extremwertstatistik unter Berücksichtigung von regionalen Informationen über Rekordhochwasser und einer oberen Grenze	17
4.4	Vergleich von Bemessungsgrößen am Beispiel der BHQ-Werte von Talsperren	20
4.5	Zusammenhang zwischen Niederschlags- und Hochwasserabflussstatistik ...	21
5	Erweiterung und Aktualisierung der hydrologischen Datenbasis	23
5.1	Aktualisierung des KOSTRA-DWD-Datensatzes	23
5.2	Generierung langer Niederschlagszeitreihen mittels Wettergenerator	25
5.3	Daten historischer Hochwasserereignisse.....	27
5.4	Aufstellung einer Regionalisierung für NRW.....	27
5.5	Niederschlags-Abfluss-Modellierung mit dem Regenereignis Juli 2021 als Grundlage für die Durchführung von hydrologischen Stresstests	29
6	Berücksichtigung der Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Hochwasserstatistik	32
6.1	Berücksichtigung der Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Hochwasserstatistik am Beispiel des KLIWA-Vorhabens	32
6.2	Statistisches Downscaling für die Ableitung von Starkregenstatistiken aus regionalen Klimasimulationen	33

6.3	Berücksichtigung der Abflussprojektionen im Hochwasserrisikomanagement	36
6.4	Weitere Aspekte.....	36
7	Zusammenarbeit innerhalb der Wasserwirtschaft.....	38
8	Zeithorizonte und Abhängigkeiten der einzelnen empfohlenen Maßnahmen.....	39
9	Zusammenstellung der wesentlichen Empfehlungen.....	42
10	Literatur.....	48

Abkürzungsverzeichnis

BHQ _x /BHQ _x	Bemessungshochwasserzufluss an Stauanlagen nach DIN 19700, z.B. BHQ1 und BHQ2
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMBF-HoWas21	Forschungsprojekt „Governance und Kommunikation im Krisenfall des Hochwasserereignisses im Juli 2021“
BR	Bezirksregierung
BURF	„Binary Universal Form for the Representation of meteorological data“ Datenformat Weltorganisation für Meteorologie der Vereinten Nationen
D	Dauerstufe
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V. bzw. Norm des Instituts
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
DWD	Deutscher Wetterdienst
ESKAPE	„Entwicklung StädteRegionaler KlimaanpassungsProzessE“, Forschungsvorhabens der Städtereion Aachen unter Beteiligung der RWTH Aachen und des Wasserverbandes Eifel-Rur
GCM	global climate model, Globales Klimamodell
GEV	Generalisierte Extremwert-Verteilung
GFZ	Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum
HDF	„Hierarchical Data Format“, Datenformat für Speicherung großer Datenmengen
HQ _T /HQT	Abfluss eines Hochwassers, dass im langjährigen statistischen Mittel einmal in T Jahren auftritt, bspw. HQ100 oder HQ10.000
IWW	Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen University
KAHR	„ <u>K</u> lima- <u>A</u> npassung, <u>H</u> ochwasser und <u>R</u> esilienz“, vom BMBF gefördertes Projekt
KLIWA	„Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“, Kooperationsprojekt der Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz und des DWD
KOSTRA-DWD	„Koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung und -auswertung des DWD“
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
LAWA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
LfU BY	Bayerisches Landesamt für Umwelt
LfU RLP	Landesamt für Umwelt des Landes Rheinland-Pfalz

LfULG	Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie des Freistaats Sachsen
LSBG	Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer der Freien und Hansestadt Hamburg
LUBW	Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg
MULNV	Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (bis Legislatur 2022)
MUNSTAR	Forschungsprojekt MUNSTAR (Methodische Untersuchungen zur Novellierung der Starkregenstatistik für Deutschland)
MUNV	Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen
N-A-Modell	Niederschlags-Abfluss-Modell
PEN-LAWA	Projekt „Praxisrelevante Extremwerte des Niederschlags“
PREC	Probabilistic Regional Envelope Curves, Probabilistische Regionale Hüllkurven
RADKLIM	Radarklimatologie, Radargestützte, hochaufgelöste Niederschlagsklimatologie von 2001 bis heute als Grundlage für die Analyse extremer Niederschläge in Deutschland
RADOLAN	Radar-Online-Aneichung, Analysen der Niederschlagshöhen aus radar- und stationsbasierten Messungen im Echtzeitbetrieb
RCM	regional climate model, Regionales Klimamodell
RWG	Regional Weather Generator, Regionaler Wettergenerator
RVR	Regionalverband Ruhr
SYDRO	SYDRO Consult GmbH
T	Wiederkehrintervall, Wiederkehrzeit
UAG	Unterarbeitsgruppe
WVER	Wasserverband Eifel-Rur

1 Einführung

Im Juli 2021 führten extrem ergiebige Dauerniederschläge durchsetzt mit örtlichen Starkregenereignissen zu massiven Sturzfluten und Hochwasser in Nordrhein-Westfalen und ließen die Pegelstände der Gewässer in den betroffenen Gebieten rasant ansteigen. Das Ausmaß der Niederschläge und in der Folge auch das Ausmaß der Sturzfluten und Hochwasser waren außerordentlich und in den betroffenen Regionen in dieser Höhe in den vergangenen Jahrzehnten nicht aufgetreten. An den Gewässern Ruhr, Wupper, Sieg, Agger, Erft, und Eifel-Rur sowie ihrer Nebengewässer waren die Scheitelwasserstände vielfach historisch hoch und teils deutlich über den bisherigen Höchstständen der systematischen Pegelaufzeichnungen. Aufgrund des Ausmaßes des Ereignisses müssen in vielen der betroffenen Einzugsgebiete die Hochwasserstatistiken überprüft und ggfls. aktualisiert werden.

Bereits jetzt ist mit den nicht mehr vermeidbaren Folgen des Klimawandels davon auszugehen, dass solche meteorologischen Extremereignisse zukünftig häufiger auftreten werden. Um dieser Herausforderung zu begegnen, hat das Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr einen 10-Punkte-Arbeitsplan „Hochwasserschutz in Zeiten des Klimawandels“ aufgestellt, der wesentliche Maßnahmen für eine Anpassung des Hochwasserrisikomanagements an die Auswirkungen des Klimawandels aufzeigt.

Der Arbeitsplan soll die Grundlage für schwerpunktmäßige Aufgaben der kommenden Jahre im Bereich des Hochwasserrisikomanagements darstellen. Er basiert auf dem aktuellen Wissen, das aus der bisherigen Analyse und Bewertung der vergangenen Ereignisse gewonnen werden konnte. Der Arbeitsplan ist ein lebendes Dokument, das fortlaufend an neue Erkenntnisse angepasst wird.

1.1 Motivation

Im Rahmen von Punkt 10 des Arbeitsplans ist eine Kommission zur fachlichen Begleitung und Beratung der Umsetzung des Arbeitsplans gegründet worden, deren Mitglieder aus Vertreterinnen und Vertretern der Wissenschaft, des Deutschen Wetterdienstes, von Branchenverbänden, Wasserwirtschafts- und Deichverbänden, kommunalen Spitzenverbänden, Naturschutzverbänden sowie sachkundigen Einzelpersonen bestehen.

Aufgrund der herausragenden Bedeutung der Hochwasserabflüsse verschiedener Jährlichkeiten für viele wasserwirtschaftliche Planungs- und Bemessungsaufgaben und der sich nach dem Hochwasser 2021 stellenden Fragen bezüglich der Berücksichtigung dieses Hochwassers in der Hochwasserstatistik wurde in der ersten Sitzung der o.g. Kommission „Hochwasserschutz in Zeiten des Klimawandels“ die Gründung einer Unterarbeitsgruppe beschlossen. Sie soll sich gezielt mit dieser Thematik beschäftigen.

1.2 Hochwasserstatistik und ihre Bedeutung

Die Hochwasserstatistik beschreibt den Zusammenhang von Wiederkehrintervall und Höhe eines Abflusses in einem Fließgewässerquerschnitt. Die Möglichkeiten der statistischen Analyse sind vielfältig und hängen von der verfügbaren Datenbasis, d.h. der räumlichen und zeitlichen Auflösung der Abflussdaten, sowie der Verfügbarkeit von zusätzlichen Informationen wie z.B. Niederschlagsdaten, Einzugsgebietsinformationen oder historischen Daten ab.

Das Merkblatt DWA-M 552 „Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten“ gibt einen Überblick über mögliche Verfahren zur statistischen Bestimmung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten und Hochwassern für eine gegebene Jährlichkeit und stellt die allgemein anerkannten

Regeln der Technik dar. Im Merkblatt wird betont, dass für die statistische Analyse stets zusätzliche hydrologische Expertise herangezogen werden sollte. So können klassische extremwertstatistische Verfahren durch die sog. Informationserweiterung mit deterministischen hydrologischen Erkenntnissen unterlegt und plausibilisiert werden. Dies umfasst z.B. die zeitliche Informationserweiterung, d.h. die Erweiterung der Datenbasis um historische Hochwasser, die kausale Informationserweiterung, d.h. die Hinzunahme von Prozessverständnis, und die räumliche Informationserweiterung, also die Berücksichtigung mehrerer Pegel bzw. Einzugsgebiete in einer Region analog zur Regionalisierung.

Die aus der Hochwasserstatistik abgeleiteten Hochwasserabflüsse verschiedener Jährlichkeit werden schließlich u.a. verwendet, um

- Hochwassergefahren- und Hochwasserrisikokarten aufzustellen,
- Überschwemmungsgebiete auszuweisen,
- Hochwasserschutzbauwerke zu bemessen,
- die Hochwassersicherheit von Abwasseranlagen zu beurteilen sowie
- Stauanlagen und deren Entlastungsbauwerke zu dimensionieren.

Der Hochwasserstatistik kommt daher eine besondere Bedeutung zu.

1.3 Zielsetzung der Unterarbeitsgruppe

Das Ziel der Unterarbeitsgruppe ist es, fachliche Empfehlungen für die Aktualisierung der Hochwasserstatistik nach dem Hochwasser 2021 zur Erfüllung der o.g. Aufgaben zu geben.

Darüber hinaus ist es das Ziel der Unterarbeitsgruppe mögliche Vorgehensweisen zusammenzutragen, die über die Aktualisierung der Hochwasserstatistik an den vom Hochwasser 2021 betroffenen Gebieten hinausgehen. Daher werden

- Empfehlungen zur Übertragung der Erkenntnisse auf Gebiete, die nicht vom Juli-Hochwasser 2021 betroffen waren, und
- Empfehlungen zur Berücksichtigung der Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Hochwasserabflussstatistik

ausgesprochen.

Im vorliegenden Dokument sind die fachlichen Empfehlungen der UAG gesammelt. Die Umsetzung dieser fachlichen Empfehlungen betrifft

- im Fall der Aktualisierung von Hochwasserstatistiken an einzelnen Gewässern die dort jeweils zuständigen Akteure der Wasserwirtschaft sowie
- im Fall von landesweit empfohlenen Maßnahmen, die zumeist eine Erweiterung der hydrologischen Datenbasis betreffen, die Wasserwirtschaft in NRW als Ganzes.

Gerade im letzteren Fall kann die Umsetzung der vorliegenden Empfehlungen nur in einem an die Verabschiedung dieser Empfehlungen in der Kommission „Hochwasserschutz in Zeiten des Klimawandels“ anschließenden Prozess stattfinden, in dem die erforderliche Zusammenarbeit aller beteiligten Akteure abgestimmt und die einzelnen Maßnahmen in Abhängigkeit der bei diesen Akteuren vorhandenen Ressourcen priorisiert werden.

1.4 Struktur des Dokuments

Zunächst werden der Stand der Aufbereitung von hydrologischen Daten des Juli-Hochwassers 2021 und beispielhaft Projekte zur statistischen Einordnung für Niederschlag und Abfluss dargestellt und Empfehlungen daraus abgeleitet.

Im Anschluss werden Empfehlungen zur Einordnung des Ereignisses nach DWA-M 552 gegeben, die um Empfehlungen zu weiteren Verfahren, insbesondere für Hochwasser mit hohen Jährlichkeiten, ergänzt werden.

Für die Berücksichtigung dieser Empfehlungen ist in vielen Aspekten eine Aktualisierung oder Erweiterung der hydrologischen Datenbasis sinnvoll, die in Kapitel 5 beschrieben wird. Diese erweiterte Datenbasis soll zukünftig zusätzlich zur Plausibilisierung der Hochwasserstatistik bzw. zur Verringerung ihrer Unsicherheiten herangezogen werden können.

Kapitel 6 gibt Empfehlungen zur Berücksichtigung der Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Hochwasserstatistik.

Zum Schluss wird auf die für die Umsetzung der hier formulierten Empfehlungen notwendigen Zusammenarbeit in der Wasserwirtschaft sowie die Zeithorizonte und Abhängigkeiten einzelner empfohlener Maßnahmen eingegangen.

1.5 Mitglieder der UAG

Die Mitglieder der Unterarbeitsgruppe setzen sich zusammen aus Vertreterinnen und Vertretern der Wissenschaft, der Wasserverbände, des Deutschen Wetterdienstes, der Landesumweltämter und der Verwaltung. Die folgenden Mitglieder haben am vorliegenden Dokument mitgewirkt:

Dr. Gerd Demny	Wasserverband Eifel-Rur, Düren
Dr. habil. Svenja Fischer	Lehrstuhl für Ingenieurhydrologie und Wasserwirtschaft, Ruhr-Universität Bochum
Roland Funke	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
Prof.'in Martina Flörke	Lehrstuhl für Ingenieurhydrologie und Wasserwirtschaft, Ruhr-Universität Bochum
Antje Geschwentner	Bezirksregierung Köln
Dr. Moritz Kreyenschulte	Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen
Joachim Liebert	Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg
Prof. Bruno Merz	Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum
Bruno Meyer	Bezirksregierung Düsseldorf
Prof. Christoph Mudersbach	Lehr- und Forschungsgebiet Wasserbau und Hydromechanik, Hochschule Bochum

Monika Raschke

Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland

Dr. Monika Rauthe

Deutscher Wetterdienst, Abteilung Hydrometeorologie

Prof. Holger Schüttrumpf

Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen University

2 Aufbereitung hydrologischer Daten des Juli-Hochwassers 2021

In diesem Kapitel wird zunächst auf die Grundlagendaten eingegangen, die zur Aktualisierung der Hochwasserstatistik in den vom Juli-Hochwasser 2021 betroffenen Gebieten erforderlich sind. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um die Scheitelabflusswerte des Juli-Hochwassers 2021 sowie die Daten des zugehörigen Niederschlagsereignisses.

2.1 Scheitelabflüsse des Juli-Hochwassers 2021

Das LANUV ermittelt die kontinuierlichen Abflüsse vergangener Hochwasserereignisse auf Basis der Wasserstands-Abfluss-Beziehungen (W-Q-Beziehungen) an Pegeln. Da die ermittelten Werte noch mit großen Unsicherheiten behaftet sind, sind noch nicht alle Abflusswerte für das Juli-Hochwasser 2021 durch das LANUV freigegeben worden. An vielen Pegeln lagen so hohe Wasserstände vor, dass die W-Q-Beziehungen für die Scheitelwasserstände des Ereignisses nicht mehr gültig sind.

Die Ermittlung dieser Scheitelabflüsse und –wasserstände erfolgt deshalb mittels hydraulischer Modelle in gemeinsamen Arbeitsgruppen von Bezirksregierungen, Wasserverbänden und dem LANUV. Der derzeitige Stand (Mai 2023) stellt sich wie folgt dar:

- Die Scheitelwerte der Pegel an der Erft sind abgestimmt und freigegeben. Die zugehörigen Abflusskurven aus den Modellberechnungen werden dem LANUV durch die Bezirksregierung Köln zur Verfügung gestellt. Für die Pegel an den Nebenflüssen der Erft liegen für den Rotbach sowie für die Swist die Scheitelabflüsse vor. Die zugehörigen Abflusskurven aus den Modellberechnungen werden dem LANUV durch die Bezirksregierung Köln zur Verfügung gestellt. Derzeit erfolgt die Modellaufstellung für den Pegel am Veybach. Erste Ergebnisse werden 2023 vorliegen.
- Für die Pegel im Einzugsgebiet der Wupper liegen freigegebene Abflüsse vor.
- Die Scheitelwerte an den Pegeln an der Rur unterhalb des Staubeckens Obermaubach befinden sich in der Endabstimmung zwischen der Bezirksregierung Köln, dem Wasserverband Eifel-Rur und dem LANUV. Die Scheitelwerte sollen bis Mitte 2023 freigegeben werden. Für die Pegel der Nebenflüsse der Rur liegen für die Olef/Urft die Modellergebnisse vor, die Scheitelwerte befinden sich derzeit in der Endabstimmung. Die Modelle für die Pegel an der Inde und Vicht werden derzeit aufgestellt.
- Für die Pegel an den Gewässern des Regierungsbezirks Arnsberg wurden durch die Bezirksregierung im Sommer 2022 Scheitelwerte und Jährlichkeiten für die betroffenen Pegel festgelegt.

Um den Scheitelabfluss mit hydraulischen Modellen rekonstruieren zu können, werden Daten zum Wasserstand während des Ereignisses benötigt. Dieser Wasserstand wird dann durch Variation des Abflusses im Modell berechnet und eine möglichst hohe Übereinstimmung zwischen Beobachtung und Simulationsergebnissen angestrebt. Natürlich ist hier zu berücksichtigen, dass i.d.R. Modelle eingesetzt werden, die das Fluid Wasser simulieren und mitgeführtes Sediment, Geröll und andere Materialien oder Aufstauungen durch Ablagerungen und Verklauung nicht berücksichtigen. Zur Rekonstruktion des Wasserstands während des Ereignisses können u. a. Vermessungen der Anschlagslinie des Wassers an Gebäuden, Geschwemmellinien, Überfliegsdaten, Satellitendaten und Luftbildaufnahmen herangezogen werden.

Satellitendaten und Luftbildaufnahmen (Überfliegungen, Drohnen) wurden zur Rekonstruktion des Überflutungsbereichs sowie zur Kartierung des Schadensausmaßes (z. B. Zerstörungsbereiche) genutzt. Das Copernicus Programm der Europäischen Kommission hat im Rahmen seines Emergency Management Service – Mapping verschiedene Produkte für die betroffenen Gebiete zur Verfügung gestellt. Dafür werden Satelliten wie Sentinel-1, Radarsat-2 oder Pleiades genutzt. Unter der Aktivierungs-ID EMSR517 wurden ab dem 13.07.2021 u.a. Bereiche an der Erft (Euskirchen – Steinbachtalsperre, Erftstadt), sowie andere betroffene Bereiche in NRW kartiert¹. Überflutete Bereiche werden von Gebieten mit Überflutungs-Spuren unterschieden. Hierdurch kann die Anschlaglinie des Hochwassers, d.h. der Bereich maximaler Überflutung, abgegrenzt werden. In der Regel werden zerstörte Gebäude von beschädigten und möglicherweise beschädigten Bereichen unterschieden, wobei in letztere Kategorie auch Bereiche fallen, die wegen Bewölkung nicht detailliert betrachtet werden konnten.

In einigen Gebieten wurden auch Drohnen- oder andere Überfliegungen durchgeführt. Im Raum Aachen wurde eine Drohne des Kataster- und Vermessungsamts genutzt, um östlich von Eschweiler eine Bestandsaufnahme der Inde zu machen². Für die Ruhr wurde im Auftrag des Krisenstabs der Stadt Hagen sowie dem Team Geodaten des Regionalverbands Ruhr (RVR) eine Flugzeug-Überfliegung durchgeführt³.

Die Rekonstruktion des Wasserstands mit den o. g. Daten und anschließende Berechnung des Abflusses mit hydraulischen Modellen durch Abgleich der Simulationsergebnisse mit den Beobachtungen wurde auch zur Bestimmung des Scheitelabflusses im Ahrtal und an der Erft genutzt. Die Studien im Ahrtal haben gezeigt, dass die Aufnahme der Anschlaglinie des Überflutungsbereichs zur Rekonstruktion der Wasserstände herangezogen werden kann (LfU RLP, 2022).

Es wird empfohlen, die Scheitelabflüsse des Hochwassers 2021 an so vielen Pegelstandorten wie möglich zu rekonstruieren. Dafür sollten auch numerische Modelle in Kombination mit Verfahren zur Rekonstruktion der maximalen Wasserstände (z. B. Aufnahmen der Geschwemmsellinien, Befliegungsdaten, Satellitenbilder) unterstützend eingesetzt werden.

Die weiteren Empfehlungen zur Zusammenarbeit in der Wasserwirtschaft sollten berücksichtigt werden (siehe Kapitel 7).

2.2 Daten der relevanten Niederschläge für das Juli-Hochwasser 2021

Beim LANUV liegen umfassende Niederschlagsdaten für den Zeitraum des Hochwasserereignisses von insgesamt 230 eigenen Niederschlagsmessstellen verteilt über ganz Nordrhein-Westfalen vor. Davon haben 224 durchgehend aufgezeichnet, an 6 Stationen konnte nicht lückenfrei aufgezeichnet werden. Weitere 18 Stationen des Messnetzes waren zur Zeit des Ereignisses nicht in Betrieb bzw. wurden funktionsunfähig.

Die Daten von 64% des LANUV-Niederschlagsmessnetzes (159 Messstellen) liegen aktuell vollständig und geprüft vor, weitere 26% (65 Messstellen) vollständig und vorplausibilisiert. Die Daten von sechs Messstellen sind vorplausibilisiert, aber noch lückenhaft bzw. ergänzt. Der Abschluss der Prüfung der vorplausibilisierten Daten ist bis zum Oktober 2023 geplant. Für die verbleibenden 8% (18 Messstellen) liegen keine Daten vor. Eine Rekonstruktion der Daten

¹ <https://emergency.copernicus.eu/mapping/list-of-components/EMSR517>

² <https://geoportal.staedteregion-aachen.de/?viewid=197&rw=302212.289&hw=5627236.309&scale=75000>

³ <https://www.aerowest.de/flutkatastophe-2021-geodata-ondemand-zur-hochwasser-schadensdokumentation>

dieser Messstellen wird derzeit nicht angestrebt. Bei neuen Erkenntnissen werden aktualisierte Datensätze veröffentlicht.

Bei den Wasserverbänden, die eigene Niederschlagsmessstationen betreiben, liegen weitere Daten und ggfls. statistische Einordnungen des Ereignisses vor. Das Niederschlagsereignis 2021 wurde beim Wasserverband Eifel-Rur nach PEN-LAWA-Verfahren statistisch eingeordnet.

Im Rahmen der „Radarkooperation NRW“ lassen die Wasserverbände in NRW, das LANUV und der DWD regelmäßig Niederschlagsdaten des DWD-Radarnetzes für jeweils ein zurückliegendes Jahr aufarbeiten. Datengrundlage sind die BUFR/HDF-Sweep-Radardaten, die in einer besseren Qualität und höheren räumlichen Auflösung als die DX-Radardaten in 5 min Auflösung vorliegen. Die BUFR/HDF-Sweep Daten werden anhand von Bodenstationsdaten der Wasserverbände, einiger größerer Kommunen, des LANUV und, in den westlichen Randbereichen, der Niederlande und Wallonien angeeicht. Dadurch entsteht mit dem Produkt „dx-offline“ ein hochwertiges Niederschlagsdatenprodukt, das mit einer hohen örtlichen und zeitlichen Auflösung quantitative genaue Niederschlagsdaten für das Gebiet von NRW bietet. Im Rahmen der Aufarbeitung und Aneichung der Niederschlagsradardaten für das Jahr 2021 ist besonderes Augenmerk auf das Juli-Ereignis gelegt worden. Gerade bei Starkregenereignissen können Abschattungseffekte an den Radarstationen sehr groß sein, sodass möglicherweise Niederschlagsfelder, die von der Radarstation aus gesehen hinter einem Starkregenfeld liegen, unterschätzt werden. Anhand der Verschneidung mit Radardaten anderer Stationen und der Aneichung mittels Bodenstationsdaten wird dieser Effekt eliminiert. Da aber die Niederschlagsgebiete zum großen Teil in der direkten Grenzregion zu Rheinland-Pfalz, den Niederlanden und Belgien lagen, sind weitere Detailuntersuchungen zur Genauigkeit in diesen Gebieten mit reduzierter Radarabdeckung zu empfehlen. Während des Ereignisses wurden aufgrund der hohen Intensitäten die Radarsignale systembedingt extrem gedämpft. Auch hier könnten weitere Detailuntersuchungen zu den Auswirkungen im Nachgang sinnvoll sein. Die „dx-offline“ Daten für das Jahr 2021 sind Ende 2022 zur Verfügung gestellt worden.

Somit liegt für das Juli-Ereignis 2021 ein vollständiger, angeeichter Radardatensatz für NRW plus einem Puffer von rd. 3 km um das Landesgebiet herum vor. Das „dx-offline“ Produkt kann bei Bedarf auch um die Starkregengebiete an der Ahr, in Wallonien und den Niederlanden erweitert werden. Damit wäre eine vollständige, hochaufgelöste Erfassung des Starkregengebieten auf der Basis angeeichter Radarniederschlagsdaten möglich. Diese Datenbasis ließe sich z.B. dafür verwenden, um mit einem Niederschlags-Abflussmodell mittels Verschiebung des Starkregenfeldes über einem ausgewählten Einzugsgebiet die theoretisch maximale Niederschlagsbelastung zu ermitteln, die beim Juli-Ereignis hätte auftreten können (siehe auch Kapitel 5.5).

Beim DWD liegen grundsätzlich Daten der Niederschlagsmessstationen und Wetterradardaten unter dem Link opendata.dwd.de frei verfügbar und geprüft vor, somit auch für den Zeitraum des Juli-Ereignisses 2021. Die Datenbasis RADKLIM umfasst bundesweit die jeweils im Folgejahr für das vergangene Jahr im Rahmen der Radarklimatologie erzeugten angeeichten Radarniederschlagsdaten (s.a. das detaillierte RADKLIM-Bulletin⁴). Die RADOLAN-Daten entstehen bei der online-Aneichung der DWD-Niederschlagsradardaten mit einer Auflösung von 1 h, welche alle zehn Minuten in Echtzeit verfügbar ist. In die Aneichung gehen Bodenstationen

⁴ <https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/wasserwirtschaft/radarniederschlag/radklim-bulletin/radklimbuletin2022download.html>

des DWD und ausgewählte Bodenstationsdaten des LANUV und der Wasserverbände in NRW ein. Eine nachträgliche Korrektur und Überarbeitung der angeeichten Radardaten erfolgt mit RADKLIM (s.o.). Die RADOLAN-Daten sind somit gut geeignet, um sich einen ersten, räumlich hochaufgelösten Überblick über die Starkregensituation und -dynamik des Juli-Ereignisses zu verschaffen. Die Daten sind ggfls. auch dazu geeignet, großräumige Analysen mittels Niederschlags-Abflussmodellen durchzuführen. Für kleine Einzugsgebiete mit kurzen Reaktionszeiten sind ggfls. die zeitlich höher aufgelösten und durch die Nachaneichung quantitativ genaueren dx-offline-Daten besser geeignet.

Die Niederschlagsdaten des Juli-Ereignisses 2021 liegen als Zeitreihen an Niederschlagsstationen und als hochaufgelöste, angeeichte Radardaten vor und sollten im Rahmen der Aktualisierung der Hochwasserstatistik berücksichtigt werden.

3 Projekte zur statistischen Einordnung von Abfluss und Niederschlag des Juli-Ereignisses 2021

In diesem Kapitel werden beispielhaft zwei Projekte vorgestellt, in denen die Einordnung des Hochwasser- und Niederschlagsereignisses aus dem Juli 2021 vorgenommen wurde. Anhand dieser Beispiele wird einerseits die Schwierigkeit dieser Einordnung verdeutlicht, andererseits werden Empfehlungen für zukünftige Aktualisierungen der Hochwasserstatistik an anderen Gewässern abgeleitet.

3.1 Statistische Einordnung des Niederschlagsereignisses nach PEN-LAWA

In vielen, vom Juli-Hochwasser 2021 betroffenen Einzugsgebieten lagen die gemessenen Niederschlagshöhen deutlich über dem derzeit verfügbaren Geltungsbereich des KOSTRA-DWD 2010R. Um eine Aussage über die Wiederkehrhäufigkeit der gemessenen Daten machen zu können, sind daher weitere Datenquellen einzubeziehen. Eine Möglichkeit dafür ist die Verwendung der Extremniederschlagsstatistik nach PEN-LAWA, die Wiederkehrintervalle bis $T = 10.000$ Jahre bietet. Allerdings liegen diese Daten nicht für alle Dauerstufen vor, die KOSTRA-DWD 2010R bietet. Zur Berechnung von Bemessungsabflüssen an Hochwasserrückhaltebecken ist beim Wasserverband Eifel-Rur ein Verfahren entwickelt worden, bei dem die Daten aus KOSTRA-DWD 2010R und PEN-LAWA miteinander abgeglichen und eine konsistente Niederschlagsstatistik für alle in KOSTRA verfügbaren Dauerstufen für die Jährlichkeiten $T = 0,5$ bis 10.000 Jahre erzeugt wird.

Dieses Verfahren wurde verwendet, um die Wiederkehrhäufigkeit der im Juli 2021 an den Bodenstationen im Einzugsgebiet der Eifel-Rur aufgetretenen Niederschläge einzuschätzen. Im Ergebnis zeigt sich, dass nahezu flächendeckend Wiederkehrhäufigkeiten von mehr als 50 und 100 Jahren erreicht wurden. In drei Schwerpunktgebieten an der Urft/Olef, der Inde/Vicht und oberen Wurm lagen die Jährlichkeiten bei oder über 1.000 Jahren.

Zur verwendeten Methodik ist anzumerken, dass die statistische Einordnung auf der bislang vorliegenden Datenbasis aus dem KOSTRA-DWD 2010R und dem PEN-LAWA 2005 basiert. Das Juli-Ereignis selbst geht nicht in die statistische Datengrundlage ein. Somit können sich die getroffenen Aussagen zur Wiederkehrhäufigkeit des Juli-Ereignisses nur auf die „bisher gültige Niederschlagsstatistik“ beziehen. Es ist vorgesehen, in weiteren Schritten die PEN-LAWA Daten mit den in Kürze veröffentlichten KOSTRA-DWD 2020 Daten zu verknüpfen (siehe Punkt 3.1) oder neue Starkregenstatistiken zu verwenden, die das Juli-Ereignis miteinbeziehen, wie z.B. die Methodik der Niederschlagsgenerierung mittels Wettergenerator (siehe Punkt 3.2).

Es wird empfohlen, eine statistische Einordnung der Stationsniederschläge aus 2021 unter Zuhilfenahme der PEN-LAWA-Methodik für die betroffenen Regionen zu prüfen.

Es wird empfohlen, die PEN-LAWA Methodik fortzuschreiben. Diese Fortschreibung der Methodik wird seit dem Frühjahr 2023 durchgeführt.

3.2 Aktualisierung der Hochwasserstatistik an der Erft

Das obere Einzugsgebiet der Erft ist durch das Hochwasser im Juli 2021 stark getroffen worden. An mehreren Pegeln wurde das zu dem Zeitpunkt gültige Extremhochwasser (altes HQextrem) deutlich überschritten (siehe Abbildung 1). Die extremen Abflüsse führten zu hohen

Schäden an Bauwerken und weiterer Infrastruktur. Für die Neuausweisung des Überschwemmungsgebietes der Erft und für die Bemessung zur Wiedererrichtung zerstörter Bauwerke (Brücken, Hochwasserschutzanlagen etc.) war eine zeitnahe Neuberechnung der Hochwasserstatistik unter Einbeziehung des Ereignisses 2021 erforderlich.

Scheitelabfluss des Juli-Hochwassers 2021 an der Erft

Die Scheitelwasserstände des Ereignisses am 14./15.7.2021 konnten nur zum Teil von den Pegeln aufgezeichnet werden. Bei beschädigten oder zerstörten Pegeln wurde der Scheitelwasserspiegel durch das LANUV nachträglich durch Einmessung von Hochwassermarken rekonstruiert.

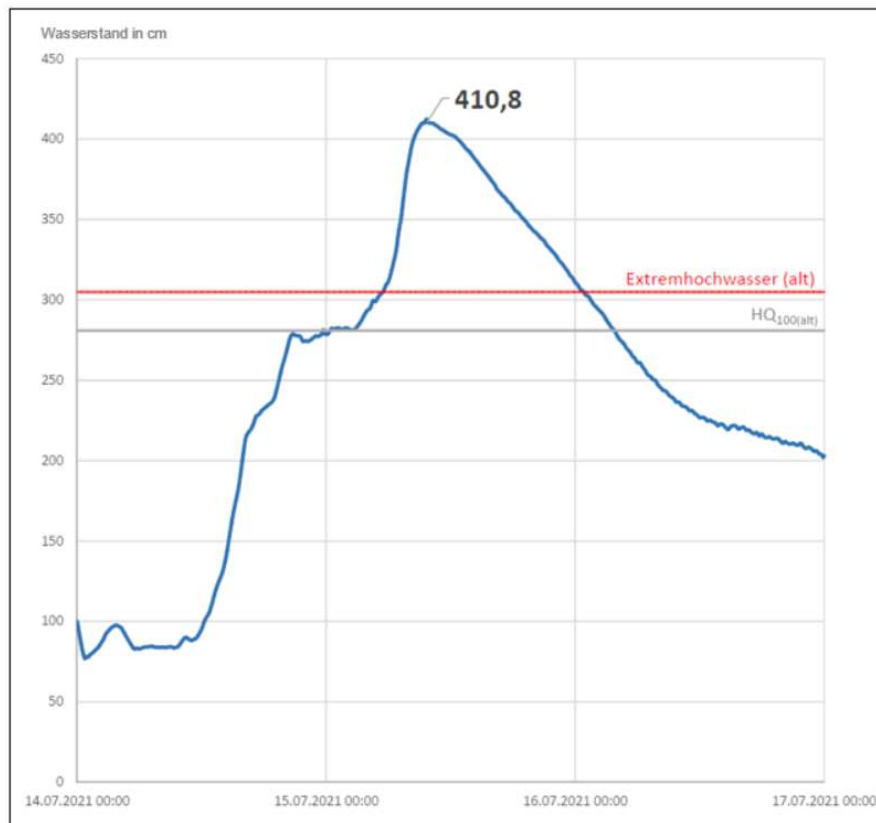


Abbildung 1: Gemessener Wasserstand am Pegel Bliesheim am 14/15.07.2021.

Zunächst war es erforderlich, die den Scheitelwasserständen zugehörigen Abflussmengen zu ermitteln. Dazu wurde ein zweidimensionales Hydraulikmodell verwendet, welches mittels der Pegelstände und diverser Hochwassermarken des Technischen Hilfswerks, der Feuerwehr und des Erftverbands kalibriert wurde. Der so ermittelte Scheitelabfluss übertraf an vielen Pegeln das alte Extremhochwasser etwa um das Fünffache (siehe Abbildung 2). Die große Herausforderung stellte die Einordnung dieses außergewöhnlichen Ereignisses bei der statistischen Auswertung dar. Daher wurde unter Einbeziehung renommierter wissenschaftlicher und ingenieurtechnischer Expertise auf Basis der einschlägigen statistischen Methoden der statistische Unsicherheitsbereich gem. DWA-Merkblatt 552 ermittelt.

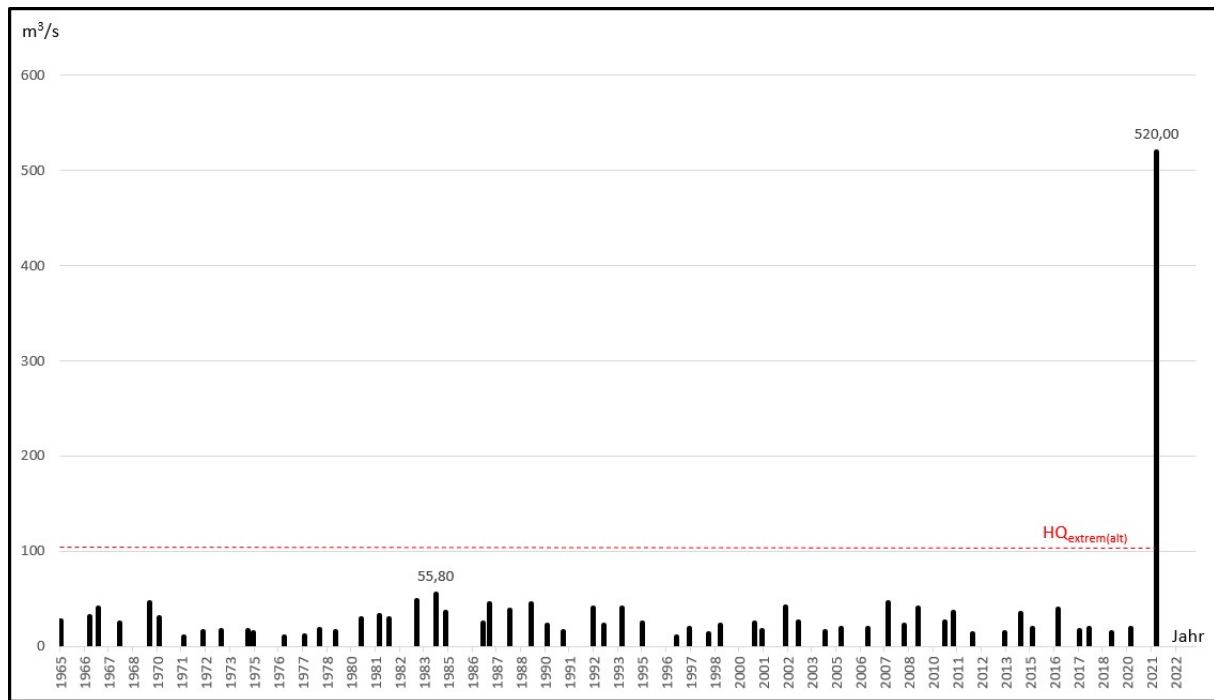


Abbildung 2: Jahreshöchstabflüsse am Pegel Bliesheim mit ermittelter Abflussmenge von 520 m³/s für Juli 2021.

Methode zur Ermittlung der Untergrenze des Unsicherheitsbereiches:

Dem Hochwasser von 2021 wurde vor Anpassung der Verteilungsfunktionen an die Jahreshöchstabflüsse eine statistische Wiederkehrzeit von 600 Jahren zugeordnet. Die geschätzte Wiederkehrzeit von 500 bis 1000 Jahren resultierte aus einer zunächst qualitativen Betrachtung beschriebener historischer Hochwasser im Oberen Erft Einzugsgebiet. Laut den vorliegenden historischen Aufzeichnungen hat es nur am 6.7.1416 ein Hochwasser im Erft Einzugsgebiet mit großen Zerstörungen gegeben, dessen Größenordnung der des Juli-Hochwassers 2021 zu entsprechen scheint.

Methode zur Ermittlung der Obergrenze des Unsicherheitsbereiches:

Das Hochwasser von 2021 wurde bei der Anpassung der Verteilungsfunktionen an die Jahreshöchstabflüsse mit seiner empirischen Jährlichkeit berücksichtigt. Es wurden anschließend die Verteilungsfunktionen und Parameterschätzungen zur Schätzung der Hochwasserquantile gewählt, welche dem Ereignis 2021 eine ungefähre Jährlichkeit von 500 bis 1000 Jahren zuzuordnen und zudem weitere Anpassungsgütekriterien erfüllen (Informationskriterien).

Ermittlung des HQ100-Abflusses mittels Informationserweiterung

Sowohl bei der Ermittlung der Untergrenze als auch bei der Ermittlung der Obergrenze des Unsicherheitsbereichs wurden zahlreiche Verteilungsfunktionen mittels verschiedener Parameterschätzverfahren an die Zeitreihe der jährlichen maximalen Hochwasserscheitelabflüsse inklusive des Scheitelabflusses 2021 angepasst. Mit Hilfe von zeitlicher und räumlicher Informationserweiterung entsprechend der Vorgaben des DWA-Merkblattes 552 konnte der statistische Unsicherheitsbereich anschließend weiter eingegrenzt werden. Zum einen konnte aufgrund einer Hochwassermarke in Kreuzweingarten in der Nähe des Pegels Arloffs der Abfluss des historischen Hochwassers vom 02.05.1818 mit Hilfe des zweidimensionalen Hydraulikmodells quantifiziert und in die statistische Auswertung einbezogen werden. Zum anderen wurden alle die Abflussspenden aller fünf Erft-Pegel im hydrologischen Längsschnitt bezogen auf ihre

Einzugsgebietsgröße betrachtet und die ermittelten Hochwasserquantile mit Hilfe von Erkenntnissen aus der Niederschlags-Abfluss-Modellierung auf Konsistenz geprüft. Das so ermittelte neue HQ100 liegt etwas über dem alten Extremhochwasser.

Relevanz für Überschwemmungsgebiete und Hochwasserschutzanlagen

Das Überschwemmungsgebiet im oberen Erftverlauf bis Erftstadt wurde auf dieser Grundlage vorläufig gesichert. Eine endgültige Festsetzung erfolgt erst nach einer Neuvermessung der Erft und anschließender hydraulischer Berechnung, voraussichtlich in 2-3 Jahren. Die bis dahin eventuell zur Verfügung stehenden zusätzlichen Erkenntnisse (Regionalisierung, Wettergenerator, überarbeitetes PEN-LAWA etc.) werden bei der endgültigen Festsetzung berücksichtigt.



Abbildung 3: Hochwasserrückhaltebecken Horchheim am 15.07.2021 (Foto: Erftverband).

So lange kann die Reparatur des stark beschädigten Hochwasserrückhaltebeckens Hochheim (Abbildung 3) im Bereich der oberen Erft nicht warten. Im Juli 2021 sind dem Hochwasserrückhaltebecken Horchheim laut Simulationsergebnis im Hydraulikmodell 390 m³/s zugeflossen. Die bestehende Hochwasserentlastungsanlage ist aber nur auf einen Abfluss in Höhe von 90 m³/s bemessen worden. Für die Bemessung des Hochwasserrückhaltebeckens im Rahmen der Wiederinstandsetzung wird das BHQ2 (HQ10.000) überprüft. Die statistische Unsicherheit ist für entsprechend seltene Wiederkehrzeiten sehr groß. Die vorläufige, oben beschriebene statistische Auswertung hat ein BHQ2 von bis zu 700 m³/s ergeben. Dieser Wert würde den zuvor gültigen Wert deutlich übersteigen. Dieses Beispiel zeigt das Erfordernis zu überlegen, wie mit den Erfahrungen aus Juli 2021 in anderen Landesteilen umzugehen ist, denn der Niederschlag des Juli 2021 hätte auch in anderen Regionen abregnen können.

Die Arbeiten für die Aufstellung einer neuen Hochwasserstatistik für die Erft unter Berücksichtigung des Juli-Hochwassers 2021 deuten auf erhebliche Veränderungen gegenüber der bisherigen Hochwasserstatistik hin. Für die adäquate Berücksichtigung des Juli-Hochwassers ist eine sorgfältige und umfassende Informationserweiterung gemäß DWA-M 552 daher unerlässlich (vgl. Kapitel 4.1). Dennoch verbleiben gerade für den Bereich großer Jährlichkeiten, der für die Bemessung der Sicherheit von Hochwasserschutz- und Stauanlagen von Bedeutung ist, noch große Unsicherheiten. Daher sollten möglichst weitere Verfahren und Daten, wie sie in diesem Dokument vorgestellt werden, zur Absicherung der Ergebnisse einbezogen werden.

3.3 Aufstellung einer Ereignisanalyse des Hochwasserereignisses 2021 in NRW

Bisher wurde keine umfassende wasserwirtschaftliche Ereignisanalyse des Juli-Hochwassers 2021 in allen vom Hochwasser betroffenen Regionen in NRW durchgeführt. Eine solche Analyse beinhaltet u. a. Ausführungen zu

- Gebietsbeschaffenheit
- Meteorologie
- Hydrologie
- Überschwemmungsflächen
- Schadensprozessen
- Ereignismanagement und –bewältigung

des Ereignisses (siehe z. B. LfULG, 2013) und verknüpft die dazu vorliegenden Informationen, um das Ereignis umfassend zu analysieren und die Wirkungszusammenhänge darzustellen. Im Hinblick auf die Hochwasserstatistik verbessert eine umfassende Analyse des Ereignisses insbesondere das in der Gesamtschau der Informationen entstehende Prozessverständnis. Die Ereignisanalyse ist also ein Werkzeug für die Informationserweiterung im Sinne des DWA-M 552, insbesondere der kausalen Informationserweiterung.

Es wird empfohlen, eine umfassende NRW-weite Ereignisanalyse des Juli-Hochwassers 2021 durchzuführen.

Teilweise liegen Berichte zu den einzelnen Themengebieten einer Ereignisanalyse vor (siehe z. B. die in Kapitel 2.2 beschriebenen Auswertungen der Niederschlagsdaten), es fehlen bisher aber Berichte bzw. landesweite Berichte zu anderen wichtigen Themengebieten (siehe z. B. die Ermittlung der Scheitelabflüsse des Hochwassers). Der zweite Landtagsbericht zum Hochwasserereignis (MULNV, 2021) deckt viele der o. g. Themenbereiche ab, stellt allerdings den notwendigerweise unvollständigen Kenntnisstand kurz nach dem Hochwasser im August 2021 dar. Weitere Aspekte einer Ereignisanalyse werden z. B. im BMBF-Forschungsprojekt „Ho-Was2021 - Governance und Kommunikation im Krisenfall des Hochwasserereignisses im Juli 2021“ erarbeitet. Für das Einzugsgebiet der Inde/Vicht wird im Rahmen des BMBF-Vorhabens KAHK eine nahezu vollständige Ereignisanalyse von den Gebietseigenschaften bis hin zu den aufgetretenen Schäden durchgeführt. Dieses Vorhaben könnte als Pilot für die Analyse der übrigen Einzugsgebiete in NRW dienen.

4 Empfehlungen zur Aktualisierung der Hochwasserstatistik

Im Folgenden werden zunächst die Empfehlungen des DWA-Merkblatts 552 „Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten“ dargestellt, das den Stand der Technik für die Erstellung von Hochwasserstatistiken darstellt. Dabei wird auch auf die Grenzen der Anwendbarkeit der darin enthaltenen Methoden eingegangen. Insbesondere für Hochwasser mit Jährlichkeiten größer als 200 Jahre sind über die Methoden des Merkblatts hinaus weitere Expertise und weitere Methoden erforderlich, um die Hochwasserstatistik abzusichern. Beispiele dafür werden in Form zweier Verfahren zur Abschätzung oberer Grenzen von Abflüssen hoher Jährlichkeiten sowie durch allgemeine Ausführungen zum Zusammenhang zwischen Niederschlags- und Hochwasserstatistik gegeben. Für Stauanlagen wird für die Plausibilisierung der dort benötigten Hochwasserabflüsse hoher Jährlichkeiten auf den Vergleich bisher ermittelter Bemessungsabflüsse eingegangen.

4.1 Empfehlungen des DWA-M 552

Die Empfehlungen zur statistischen Analyse für Hochwasser nach dem DWA-Merkblatt 552 „Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten“ können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Datenbasis sollte größtmöglich gewählt werden; d.h., wenn verfügbar, sollten partielle Serien für die statistische Analyse verwendet werden und historische Hochwasser statistisch berücksichtigt werden.
- Die statistische Analyse sollte durch Prozessverständnis ergänzt werden; d.h., sofern verfügbar, sollten die hochwasserauslösenden Prozesse in der statistischen Auswertung berücksichtigt werden, z.B. durch die saisonale Statistik.
- Die statistischen Ergebnisse sollten räumlich analysiert werden durch Hinzunahme weiterer Hochwasserinformationen in der Region, z.B. durch Regionalisierung oder räumliche Statistik. Geeignete N-A-Modelle können im Falle von unbeobachteten Einzugsgebieten oder bei nicht ausreichenden Beobachtungsreihen von Abflüssen für die Informationserweiterung genutzt werden.

Diese Empfehlungen sind bei der Aktualisierung von Hochwasserstatistiken immer zu berücksichtigen.

Das DWA-Merkblatt 552 wird zurzeit überarbeitet. Die neu gegründete Arbeitsgruppe der DWA, „HW.411 – Hochwasserwahrscheinlichkeiten“ hat sich bei der aktuellen Überarbeitung des Merkblattes zum Ziel gesetzt, die Kombination von deterministischer und stochastischer Hydrologie weiter in den Vordergrund zu setzen. Dies hilft nicht nur, die statistischen Ergebnisse besser hydrologisch interpretieren und plausibilisieren zu können, sondern auch die Unsicherheit in der Schätzung zu reduzieren. So wird beispielsweise die Typ-basierte Statistik als neuer wichtiger Aspekt der Hochwasserstatistik eingeführt. Diese erlaubt, die hochwasserauslösenden Prozesse direkt in der Statistik zu berücksichtigen und dementsprechend differenzierte Hochwasserszenarien und -wahrscheinlichkeiten zu ermitteln. Ebenso wird auch die multivariate statistische Analyse zur Informationserweiterung vorgeschlagen, um die Hoch-

wasserstatistik nicht nur auf den Hochwasserscheitel zu beschränken. Eine detaillierte Ausführung der wesentlichen Änderungsvorschläge zum sich in der Überarbeitung befindlichen Merkblatt ist auf der Internetseite der DWA zu finden⁵.

Für die vollständige Umsetzung dieser Empfehlungen werden eine breite Datenbasis sowie zusätzliche Informationen zu den Hochwassern benötigt, die nicht flächendeckend in NRW zur Verfügung stehen. Eine solche breite Datenbasis sollte historische Hochwasser (siehe Kapitel 5.3) und ein räumlich dichtes Pegelnetzwerk (siehe Kapitel 5.4) umfassen. Zusätzlich zu den Abflussdaten sollten zudem Informationen zu den hochwasser-auslösenden Prozessen aufgezeichnet bzw. für die historischen Hochwasser nachträglich ermittelt werden. Hierzu können Niederschlags-, Bodenfeuchte- oder Schneeschmelzdaten bzw. die Schneedeckenhöhe herangezogen werden.

Zu berücksichtigen ist, dass der Fokus bei den im Merkblatt 552 dargestellten Methoden und Beispielen auf Jährlichkeiten von 2 bis 200 Jahren gerichtet ist. Für diesen Bereich gibt es eine Reihe von gebräuchlichen und wissenschaftlich begründeten Ansätzen, welche zumeist angewendet werden können. Für die Ermittlung von Hochwasserabflüssen mit extrem geringen Überschreitungswahrscheinlichkeiten sind dagegen umfangreiche zusätzliche Untersuchungen sowie vertiefte Gebietskenntnisse erforderlich.

4.2 Hüllkurvenverfahren

Bei den im DWA-Merkblatt 522 dargestellten Methoden und Beispielen ist der Fokus auf Jährlichkeiten von 2 bis 200 Jahren gerichtet. Die Dimensionierung von Hochwasserentlastungsanlagen von Talsperren und Hochwasserrückhaltebecken ist gemäß DIN 19700 mittels der Bemessungshochwasserereignisse BHQ 1 und BHQ 2 vorzunehmen. Die dafür anzusetzenden Jährlichkeiten der Hochwasserzuflüsse liegen zwischen 200 und 10.000 Jahren. An einigen Talsperren des Aggerverbandes, des Wupperverbandes und des Wasserverbandes Eifel-Rur sind beim Juli-Ereignis 2021 Zuflussmengen und -spitzen aufgetreten, die in dieser Größenordnung noch nie gemessen worden sind und nach bisher vorliegenden Statistiken weit über die Jährlichkeit von 200 Jahren hinausgehen. Die im DWA-M 522 verwendeten statistischen Verfahren sind nach oben hin unbegrenzt. Dies kann, je nach Einordnung von Extremwerten wie dem Juli-Ereignis 2021 in der Stichprobe dazu führen, dass für Jährlichkeiten über 200 Jahren physikalisch nicht mehr nachvollziehbare Abflüsse errechnet werden.

In einer von zwei betroffenen Wasserverbänden in Auftrag gegebenen Studie wurde untersucht, wie das Juli-Ereignis insbesondere vor dem Hintergrund der bisherigen Festlegungen zu den Bemessungshochwasserereignissen BHQ 1 und BHQ 2 einzuordnen ist. Dabei wird analog zu GUSE et al. (2010) vorausgesetzt, dass eine Obergrenze der auftretenden Hochwasserabflüsse existiert. Die Obergrenze ist von der jeweiligen Einzugsgebietsgröße abhängig und stellt somit eine Hüllkurve der Hochwasserabflüsse oder -abflussspenden dar.

Für die Festlegung der Hüllkurve wurden verschiedene Ansätze betrachtet: Die Hüllkurven nach Herschy (Herschy, 2002) und HOWEX (Klein et al., 2006) sowie eine vom Ersteller der Studie, SYDRO Consult GmbH, Darmstadt, vorgenommene, auf dem Ansatz nach Francou-Rodier basierende empirische Festlegung deutschlandweit aufgetretener Hochwasserabflussspenden. Dazu wurden 268 Hochwasserereignisse in Deutschland aus den Jahren 1993 bis

⁵ <https://de.dwa.de/de/regelwerk-news-volltext/%C3%BCberarbeitung-von-merkblatt-dwa-m-552-ermittlung-von-hochwasser-wahrscheinlichkeiten.html>

2021 verwendet. Diese 268 Hochwasserabflüsse lassen sich unter Berücksichtigung der zugehörigen Einzugsgebietsgröße nach oben hin durch eine Hüllkurve eingrenzen. Der Vergleich der Hochwasserabflusspenden zeigt, dass z.B. die Hochwasserabflusspenden in Sachsen 2002 in der Regel größer als die des Juli-Hochwassers 2021 abgeschätzt werden und näher an der Hüllkurve liegen. Die Hüllkurven, basierend auf Messwerten, können als „hydrologisches Gedächtnis“ interpretiert werden. Die auf real aufgetretenen Abflüssen basierenden Hüllkurven wurden zusätzlich um berechnete Extremabflussereignisse ergänzt. Dazu lagen entsprechende N-A-Modellberechnungen für Talsperreneinzugsgebiete in Sachsen und an der Wupper vor. Die berechneten Extremereignisse basieren auf dem Ansatz ungünstigster Kombinationen von Klima- und Anfangsbedingungen (z.B. Bodenfeuchte) und dienen als Erweiterung der Datenbasis für die Hochwasserstatistik. Die abschließend im Rahmen der Studie zur Ableitung maximaler Abflussereignisse herangezogene Hüllkurve wurde an diese Obergrenze angelehnt.

Die bei der Hochwasserstatistik üblicherweise verwendeten Verteilungsfunktionen besitzen keine Obergrenze und lassen sich deshalb nicht mit einer Hüllkurve erfassen. Aus diesem Grund wurde die Johnson-Verteilung verwendet, die sich asymptotisch einer Obergrenze annähern lässt. Im Bereich kleiner Jährlichkeiten passt sich die Johnson-Verteilung den beobachteten Hochwasserabflusswerten in der Stichprobe aufgrund des von SYDRO entwickelten Verfahrens an. Im Bereich der gegen Unendlich strebenden Jährlichkeiten lehnt sich die Johnson-Verteilung an den vorgegebenen Maximalwert an. Dazwischen existiert ein Übergangsbereich, in dem die Johnson-Funktion einen Wendepunkt aufweist. In der Abbildung 4 ist beispielhaft das Ergebnis des Hüllkurvenverfahrens für den Zufluss zur Urft-Talsperre dargestellt.

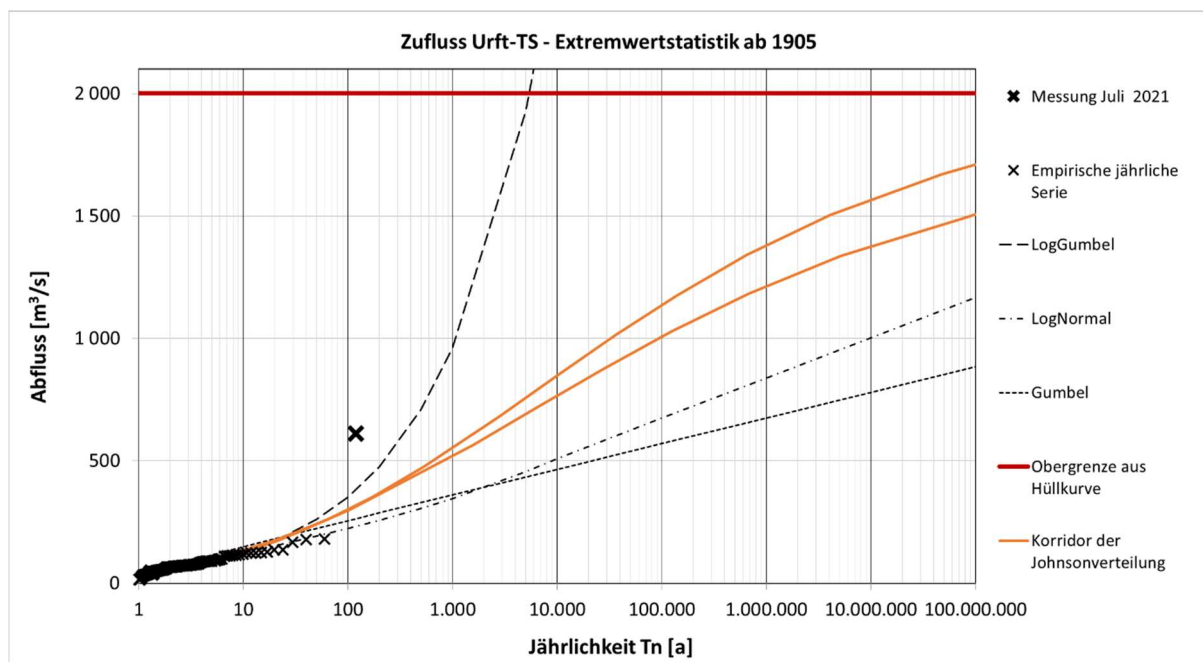


Abbildung 4: Hochwasserstatistik für den Zufluss zur Urft-Talsperre auf der Grundlage des Hüllkurvenverfahrens

Für die Festlegung der Johnson-Verteilung wurden im Bereich kleiner Jährlichkeiten mehrere Verteilungsfunktionen verwendet und die Johnson-Verteilung entsprechend unterschiedlich parametrisiert. Daraus ergibt sich ein Korridor der Johnson-Verteilung, in dem die Hochwasserabflusswerte liegen können. Wie aus der Abbildung hervorgeht, öffnet sich der Korridor erst

im Bereich sehr hoher Jährlichkeiten, da die Anpassungen der Verteilungsfunktionen an die empirischen Werte im Bereich kleiner Jährlichkeiten untereinander sehr ähnlich sind.

Der Korridor ist aber auch im Bereich sehr kleiner Jährlichkeiten recht gering. Im Vergleich dazu sind in der Abbildung drei, in der Hydrologie häufig verwendete Verteilungsfunktionen dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Berücksichtigung des Hochwassers des Juli 2021 in der jeweiligen Verteilungsfunktion weisen die drei Verfahren untereinander eine sehr große Streubreite auf. Das Hüllkurvenverfahren bietet demgegenüber eine größere Eindeutigkeit bei der Bestimmung von Hochwasserabflüssen hoher Jährlichkeiten.

In einem nächsten Schritt ist vorgesehen, künstliche Hochwasserwellen zu generieren (Hochwassermerkmalsimulation) und damit Simulationsläufe für die Talsperrenzuflüsse durchzuführen, welche die Hochwasserstatistik aus der Johnson-Verteilung benutzen. Ziel ist es, die bisherigen Festlegungen für die Bemessungshochwasserabflüsse BHQ 1 und 2 zu überprüfen.

In Sensitivitätsstudien wurde untersucht, inwieweit sich die Verteilungsfunktion und damit die Hochwasserabflussbemessungswerte bei Vorgabe höherer Obergrenzen aus anderen Hüllkurven (z.B. aus Maximalabflüssen aus anderen Regionen) verändern. Es zeigte sich, dass z.B. eine Verdoppelung der Obergrenze für den Urfttalsperrenzufluss eine Erhöhung des HQ 1.000 um etwa 10 % mit sich bringt. Damit weist das Verfahren eine gewisse Stabilität hinsichtlich sich möglicherweise künftig ändernder Hüllkurven auf. Diese Änderungen könnten z.B. durch neu hinzukommende, reale Extremabflüsse ausgelöst werden oder durch neue Erkenntnisse zu Veränderungen des Extremniederschlagsverhaltens aus Klimaprojektionsrechnungen.

Die Dimensionierung von Stauanlagen erfordert zur Festlegung des BHQ 1 und BHQ 2 nach DIN 19700 die Vorgabe von Hochwasserabflüssen mit sehr hohen Jährlichkeiten von 200 bis 10.000 Jahren. Mit den Verteilungsfunktionen nach DWA-M 552, die dort für Jährlichkeiten bis ca. 200 Jahren empfohlen werden, können im Bereich dieser sehr hohen Jährlichkeiten möglicherweise keine physikalisch sinnvollen Werte mehr erzeugt werden. Das Hüllkurvenverfahren bietet sich im Sinne einer Informationserweiterung nach DWA-M 552 dazu an, die Hochwasserabflüsse im Bereich sehr hoher Jährlichkeiten auf ein physikalisch plausibles Maß zu beschränken. Das Verfahren ist bislang in Einzelfällen eingesetzt worden und sollte in Wissenschaft und Praxis weitergehend untersucht werden.

Es wird empfohlen, das Hüllkurvenverfahren insbesondere für Einzugsgebiete von Stauanlagen zu testen und bei Eignung zu verwenden.

Darüber hinaus wird empfohlen, bei der Aufstellung einer Hochwasserstatistik nach DWA-M 552 immer auch über das HQ 200 hinaus die höheren Jährlichkeiten zu beachten und insbesondere bei Talsperren und Hochwasserrückhaltebecken zu prüfen, ob die gewählte statistische Verteilungsfunktion in Extrembereichen physikalisch plausible Abflusswerte widerspiegelt.

4.3 Extremwertstatistik unter Berücksichtigung von regionalen Informationen über Rekordhochwasser und einer oberen Grenze

Guse et al. (2010) haben ein Verfahren entwickelt und für 83 Pegel in Sachsen getestet, das als zusätzlicher Ansatz zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen höherer Jährlichkeiten (>100 Jahre) verwendet werden kann. Das Verfahren berücksichtigt lokale Informationen (gemessene Hochwasserabflüsse) und regionale Informationen. Nach dem Konzept der 'Flood

frequency hydrology' (Merz und Blöschl, 2008) reduziert sich die Unsicherheit in der Hochwasserquantil-Abschätzung durch die Hinzunahme von regionalen, zeitlichen oder kausalen Informationen. Regionale Informationen werden in dem Verfahren von Guse et al. (2010) durch Probabilistische Regionale Hüllkurven PREC (Probabilistic Regional Envelope Curves) berücksichtigt, um die Abschätzung im Bereich von Jährlichkeiten von ca. 500-1000 Jahren zu unterstützen. Als dritte Komponente geht ein oberer Grenzwert des Hochwasserabflusses über empirische Hüllkurven in die Extremwertstatistik ein. Das Verfahren zielt darauf ab, einerseits die gemessenen Rekordabflüsse in der Region in die Hochwasserstatistik zu integrieren, und andererseits keine unbegrenzt hohen Abflüsse für hohe Jährlichkeiten zu liefern.

Im ersten Schritt wird für den betrachteten Pegel eine PREC berechnet (nach Castellarin et al., 2005; Castellarin, 2007). Hierzu werden Pegel einer hydrologisch homogenen Region in einer Gruppe zusammengefasst. Basierend auf dem Rekordabfluss jedes Pegels der Gruppe wird eine regionale Hüllkurve ermittelt, der wiederum eine Eintrittswahrscheinlichkeit (in Abhängigkeit der Gesamtanzahl der Beobachtungsjahre der homogenen Gruppe sowie der Korrelation zwischen den Hochwasserzeitreihen) zugeordnet wird. Diese Werte werden in die lokale Extremwertstatistik integriert und repräsentieren einen Quantilbereich, für den üblicherweise aufgrund der Kürze der Zeitreihen keine Messdaten verfügbar sind.

Abbildung 5 zeigt den Effekt für drei Pegeln an sächsischen Flüssen. Am Pegel Lauenstein (Abbildung 5 oben) ergeben sich aus dem PREC-Verfahren Werte mit Jährlichkeiten von ca. 500 Jahren. Ihre Integration führt zu etwas kleineren Abflüssen – dies kann darauf hindeuten, dass der Rekordabfluss (Hochwasser 2002) in diesem Einzugsgebiet eine größere Jährlichkeit hatte als die lokale Schätzung. Der Pegel Gera (Abbildung 5 unten) zeigt einen umgekehrten Effekt. Die lokale Verteilungsfunktion (GEVOBS) wird durch die Integration von regionalen Informationen zu deutlich größeren Abflüssen (GEVSIM-PREC) verändert. Für den Datensatz in Sachsen zeigte die Mehrheit der Pegel dieses Verhalten, d.h. die Berücksichtigung von Rekordabflüssen in ähnlichen Einzugsgebieten erhöhte die Abflüsse im Bereich der Jährlichkeiten > 100 Jahre.

Im zweiten Schritt wird ein oberer Grenzwert abgeschätzt. Da dieser Wert eine Überschreitungswahrscheinlichkeit von Null haben soll, verwendeten Guse et al. (2010) für Sachsen eine Hüllkurve für Europa, die deutlich höhere Werte liefert als die Hüllkurve, die auf sächsischen Daten basiert. Dieser Grenzwert wird als oberer Grenzwert betrachtet, dem sich die Verteilungsfunktion asymptotisch nähert. Dies wird durch eine Mischverteilung bewerkstelligt. Diese setzt sich aus zwei Verteilungsfunktionen zusammen, die am Wendepunkt miteinander verbunden sind. Die Funktion unterhalb des Wendepunkts zeigt einen 'heavy tail', während sie oberhalb des Wendepunkts begrenzt ist (Abbildung 5). In der Studie von Guse et al. (2010) ergaben sich die Jährlichkeiten für PREC in der Größenordnung von 150 bis 1500 Jahre. Der Wendepunkt wurde bei 500 Jahren gewählt.

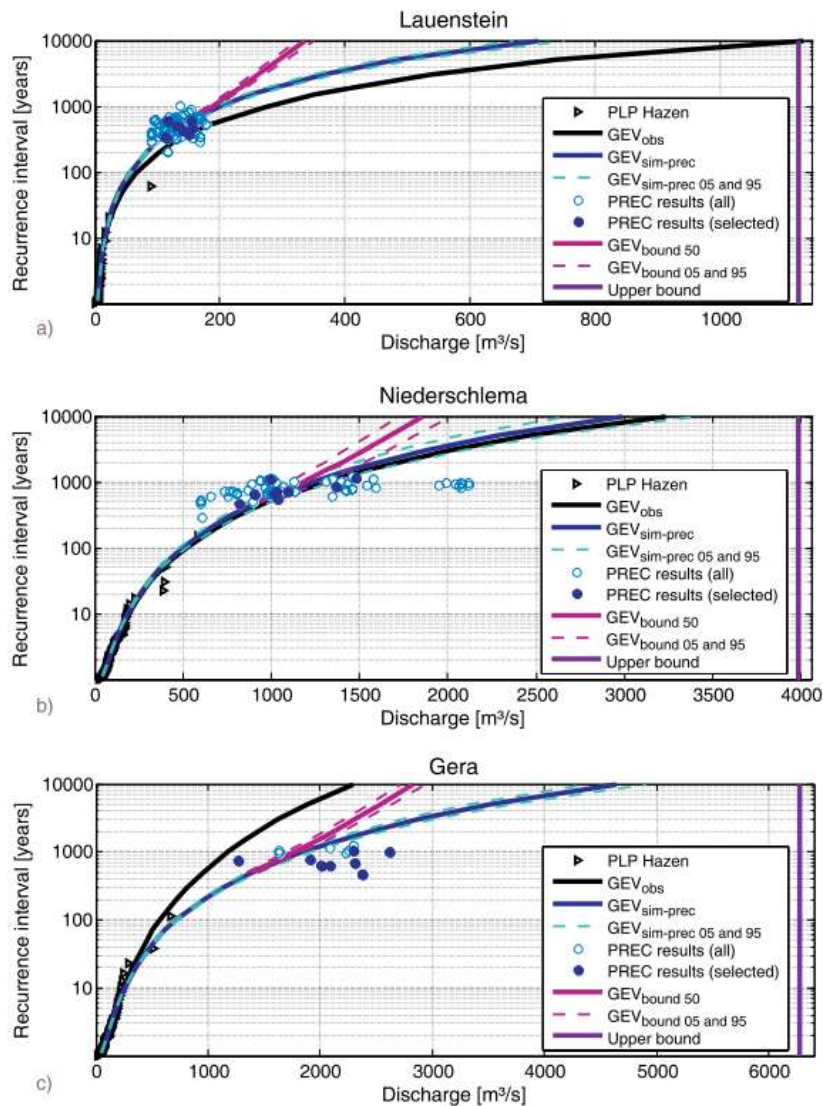


Abbildung 5 (aus Guse et al., 2010): Lokale Extremwertstatistik (GEV_{obs}) vs. Verteilung unter Berücksichtigung von PREC ($GEV_{sim-prec}$) vs. Mischverteilung unter zusätzlicher Berücksichtigung eines oberen Grenzwerts (GEV_{bound}) für drei Pegel in Sachsen. Der obere Grenzwert ist als vertikale Linie rechts von der Legende gezeigt.

Das Verfahren von Guse et al. (20210) hat den Vorteil, dass es regionale Informationen bezüglich Rekordhochwasserereignissen in die lokale Statistik integriert und damit Stützstellen für höhere Hochwasserquantile berücksichtigt. Für Sachsen liegen diese im Bereich von $T = 500$ bis 1.500 Jahren vor, ähnliches ist auch für andere Regionen in Deutschland zu erwarten. Guse et al. (2010) folgern, dass dadurch die Abschätzung von hohen Quantilen entsprechend des Konzeptes der 'Flood frequency hydrology' verbessert wird.

Die Aufstellung einer Extremwertstatistik unter Berücksichtigung von regionalen Informationen über Rekordhochwasser und einer oberen Grenze ist landesweit für alle relevanten Abflusspegel durchführbar. Gegenüber dem Hüllkurvenverfahren aus Kapitel 3.4 bietet das Verfahren den zusätzlichen Vorteil, beobachtete Extremereignisse aus benachbarten Einzugsgebieten in die Statistik einzubeziehen und damit eine Regionalisierung herzustellen.

Es wird empfohlen, das Verfahren in der Wissenschaft und Praxis weitergehend zu untersuchen. Dazu bietet es sich an, das Verfahren zunächst in einem Pilotgebiet anzuwenden und seine Eignung für die in NRW vorliegenden Daten und Verhältnisse zu überprüfen. Bei entsprechend positivem Ergebnis könnte es landesweit zur Anwendung kommen und damit eine zusätzliche, regionalisierte Datenbasis insbesondere für die Bemessung von Stauanlagen (BHQ 1 und BHQ 2) bieten.

4.4 Vergleich von Bemessungsgrößen am Beispiel der BHQ-Werte von Talsperren

Die landesweite grafische Darstellung von Bemessungsabflüssen BHQ von Talsperren und Hochwasserrückhaltebecken bzw. den korrespondierenden Abflussspenden BHq (BHQ1/Hochwasserentlastungsanlage und BHQ2/Nachweis Anlagensicherheit bei Extremhochwasser) in Abhängigkeit von der Größe des Einzugsgebietes gibt einen Überblick über die Spannweite der Leistungsfähigkeit bisher realisierter Anlagen. Für ausgewählte Talsperren und Hochwasserrückhaltebecken ist ein entsprechendes Spenden-Einzugsgebietsdiagramm in Abbildung 6 beispielhaft dargestellt. Spezifische Eigenschaften des Einzugsgebietes (Gefälle, Nutzung, Gewässerstruktur, Böden, etc.) und der Anlagen (Größe, Art der Entlastungsanlage, oberhalb gelegene Retentionsräume, Haupt-/Nebenschluss, etc.) sind bei der Interpretation zu berücksichtigen.

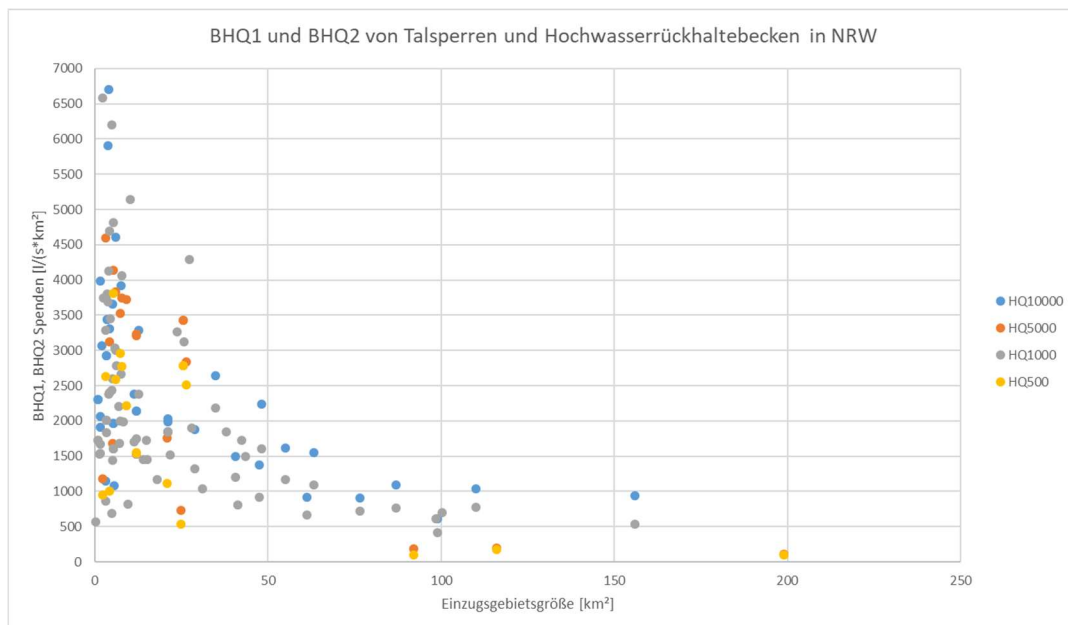


Abbildung 6: Spenden-Einzugsgebietsdiagramm einiger Talsperren und Hochwasserrückhaltebecken in NRW.

Die verwendeten Extremwerte bis zu einer Jährlichkeit von 10.000 Jahren, wie sie bei der Dimensionierung von Talsperren herangezogen werden, können nicht auf Basis einzelner Stationsdaten (Niederschlag, Abfluss) oder von KOSTRA-DWD-Rasterzellen, die die lokalen Unterschiede bis zum 100-jährlichen Niederschlag sehr gut abbilden, extrapoliert werden. Da Extremereignisse „überall“ auftreten können, aber noch nicht „überall“ stattgefunden haben, sollten Bemessungsgrößen für extreme Szenarien über einen größeren Raum mit vergleichbaren Eigenschaften (räumliche Informationserweiterung, raumzeitliche Analyse) ermittelt werden und in diesem Raum zur Anwendung kommen. Das Spenden-Einzugsgebietsdiagramm bietet hierfür eine erste Datenbasis zur Plausibilisierung der Bemessungsgrößen und

sollte für alle Anlagen in NRW erstellt werden. Daten von Anlagen benachbarter Bundesländer können ergänzt werden.

Veränderung der Bemessungsgrößen BHQ1/BHQ2 bei Berücksichtigung des Ereignisses 2021 werden im Spenden-Einzugsgebietsdiagramm durch eine neue Position sichtbar, können im Betrachtungsraum und im Vergleich mit anderen Anlagen analysiert werden und so die Erkenntnisse auf Anlagen, die nicht oder nur am Rande vom Ereignis 2021 betroffen waren, übertragen werden.

Es wird empfohlen, ein landesweites Spenden-Einzugsgebietsdiagramm mit den zu den Bemessungsgrößen BHQ1 und BHQ2 korrespondierenden Abflussspenden der Talsperren und Hochwasserrückhaltebecken zu erstellen, Anlagen mit ähnlichen spezifischen Eigenschaften miteinander zu vergleichen und bei neuen Ermittlungen der Bemessungsgrößen für Talsperren/Hochwasserrückhaltebecken die Plausibilität zu prüfen sowie ggfls. näher zu untersuchen.

4.5 Zusammenhang zwischen Niederschlags- und Hochwasserabflussstatistik

Für die Einordnung der Eintrittswahrscheinlichkeit extremer Abflussereignisse wie dem Juli-Hochwasser 2021 in einer Hochwasserstatistik ist zu empfehlen, die Wiederkehrspanne des zugrundeliegenden Niederschlagsereignisses einzubeziehen. Entsprechend der grundlegenden Annahme bei der Anwendung der Methode des Bemessungsregens erzeugt ein Niederschlag mit einer bestimmten Jährlichkeit T im Mittel einen entsprechenden Abfluss mit der gleichen Jährlichkeit. Wenn man einzelne Ereignisse betrachtet, dann ist allerdings eine große Variation zwischen den Jährlichkeiten von Niederschlag und Abfluss zu finden. Das liegt insbesondere an der räumlich-zeitlichen Dynamik des Niederschlages und den Vorbedingungen im Einzugsgebiet, vor allem der Sättigung des Bodens aufgrund vorangegangener Niederschläge. Eine systematische Untersuchung der Zusammenhänge zwischen den Jährlichkeiten von Abfluss und Niederschlag findet sich bei Viglione et al. (2009).

Für das Einzugsgebiet der Eifel-Rur ist ein erster Vergleich der anhand von KOSTRA-DWD 2010R und PEN-LAWA gewonnenen Niederschlagstatistiken (siehe Punkt 2.2) mit ersten Schätzungen der Wiederkehrwahrscheinlichkeiten beobachteter Hochwasserabflüsse an den betroffenen Pegelmessstellen vorgenommen worden. Dabei treten teilweise Unterschiede zwischen den statistischen Einordnungen der Niederschläge und der Abflüsse auf: So sind an der Wurm trotz 1.000-jährlicher Niederschlagsmengen im Kopfgebiet „nur“ Hochwasserabflüsse mit einer Jährlichkeit von 200 Jahren aufgetreten. Der Zufluss zur Urfttalsperre hatte nach ersten Schätzungen auf Basis der bislang vorliegenden Hochwasserabflussstatistik eine Eintrittswahrscheinlichkeit in der Größenordnung von 10.000 Jahren, die Niederschläge im Einzugsgebiet hatten dagegen eine Eintrittswahrscheinlichkeit von rd. 1.000 Jahren. Das Niederschlagsereignis war von mehreren eingebetteten Starkregenphasen geprägt und die Bodenfeuchte aufgrund des nassen Frühsommers bereits sehr hoch. Eine pauschale Übertragung von Eintrittswahrscheinlichkeiten des Niederschlages auf den Abfluss sowie von einem Einzugsgebiet auf ein anderes ist daher nicht zulässig. Die statistischen Einordnungen insbesondere des Hochwasserabflusses sind einzugsgebietsspezifisch zu betrachten und ermitteln.

Die Einordnung der Eintrittswahrscheinlichkeit des Hochwasserabflusses sollte unter Berücksichtigung des zugrundeliegenden Niederschlagsereignisses in Abhängigkeit der Einzugsgebietsspezifika erfolgen. Eine Übereinstimmung der Eintrittswahrscheinlichkeiten darf dabei nicht vorausgesetzt werden.

5 Erweiterung und Aktualisierung der hydrologischen Datenbasis

Wie explizit in Kapitel 4.1 erwähnt und wie aus den Ausführungen in den anderen Unterkapiteln des Kapitels 4 sowie anhand der Beispiele in Kapitel 3 deutlich wird, sind für eine verbesserte Absicherung von Hochwasserstatistiken einerseits vorhandene Datengrundlagen zu aktualisieren und andererseits neue hydrologische Datengrundlagen zu schaffen. Diese werden im Folgenden beschrieben und entsprechende Empfehlungen formuliert.

5.1 Aktualisierung des KOSTRA-DWD-Datensatzes

KOSTRA-DWD steht für „Koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung und -auswertung des DWD“ und wird bereits seit mehr als 30 Jahren regelmäßig und gemeinsam mit Vertreterinnen und Vertretern der Forschung, Praxis sowie der Bundesländer erarbeitet. Für die Fortschreibung zur neuen Version KOSTRA-DWD-2020 wurde im vorgelagerten Forschungsprojekt MUNSTAR (Methodische Untersuchungen zur Novellierung der Starkregenstatistik für Deutschland) die Methodik grundlegend überarbeitet.

Die Schätzung wird nun über eine 5-parametrische Generalisierte Extremwert-Verteilung (GEV) dauerstufen-übergreifend durchgeführt. Um auch Werte für Orte, für die keine Messungen existieren, zur Verfügung zu stellen, wird eine Regionalisierung durchgeführt. Die neue Methode basiert auf einem Kriging-Verfahren mit externer Drift. Den Ausgangspunkt bilden möglichst lange Stationsreihen mit zeitlich hochaufgelöster Messung. Kürzere Stationsreihen unterstützen die regionale Differenzierung (externe Drift). Die langen Messungen wurden auf Stationarität geprüft. Dabei zeigte sich, dass ein Großteil der detektierten Veränderung in diesen Reihen auf die Änderung beim Regenmesser zurückzuführen ist. Diese sind durch eine endbetonte Sprungkorrektur bereinigt worden. Aus diesem Grund wird von einem weitestgehend stationären Klima in Bezug auf die Extreme des Niederschlages ausgegangen und deshalb werden stationäre Ansätze genutzt (für weitere Details siehe auch den Synthesebericht MUNSTAR⁶).

Des Weiteren wurde die Datengrundlage durch Partnermessstationen sowie eine groß angelegte Digitalisierungsaktion von Regenstreifen massiv ausgedehnt. Im Bereich von Nordrhein-Westfalen stehen dadurch, im Vergleich zum Rest von Deutschland, potentiell überdurchschnittlich viele Stationen für die Statistik zur Verfügung. Außerdem basiert der neue Datensatz nun im Kern auf Stationsdaten von 1951-2020 und damit ist das Ereignis aus dem Juli 2021 nicht enthalten (weitere Informationen am Ende des Kapitels). Das Rasterfeld liegt fortan in der Projektion ETRS89-LAEA vor und ein Rasterfeld hat jeweils eine Größe von 25 km² (räumliche Auflösung 5 km x 5 km). Der neue Datensatz wird den bisherigen zum 01.01.2023 ablösen und weist dann die amtlichen Bemessungsniederschläge aus.

Die Vergleiche zwischen KOSTRA-DWD-2010R und KOSTRA-DWD-2020 haben gezeigt, dass vor allem die Veränderungen in der Methodik und der Datengrundlage für Unterschiede zwischen den beiden Datensätzen verantwortlich sind. Das Bild der Veränderungen ist regional heterogen und von den Dauerstufen abhängig. Es gibt sowohl Regionen in denen es zu einer Anhebung also auch Regionen, in denen es zu einer Absenkung der Bemessungsniederschläge kommt (Abbildung 7). Insgesamt ergeben sich über das gesamte Gebiet aber drei größere Veränderungen in den Bemessungsniederschlägen: Bei den sehr kurzen und langen

⁶ https://www.dwd.de/DE/leistungen/kostra_dwd_rasterwerte/download/Synthesebericht_MUNSTAR_pdf.pdf

Dauerstufen verändern sich diese im Mittel eher nach oben, bei Dauerstufen um $D = 60$ min im Mittel eher nach unten (Abbildung 8).

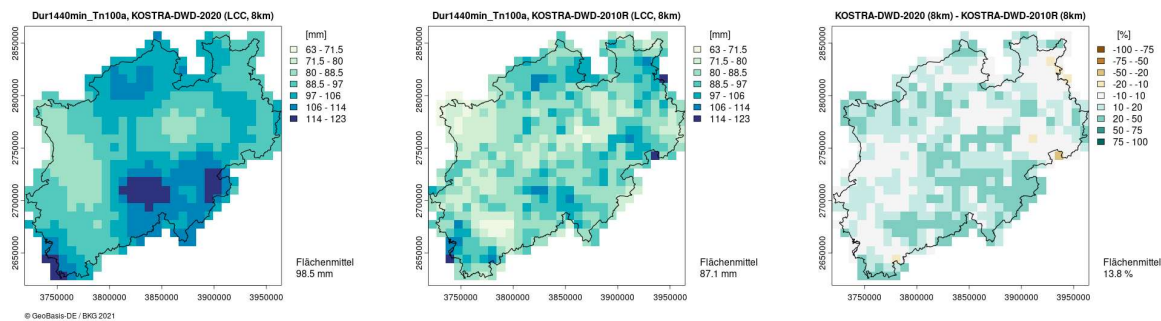


Abbildung 7: Relativer Vergleich (rechts) des neuen Datensatzes KOSTRA-DWD-2020 (links) mit bisherigen KOSTRA-DWD-2010R (mittig) für eine Dauerstufe von $D = 24$ h (1440 min) und einer Wiederkehrzeit $T = 100$ Jahren. Grün gefärbte Bereiche der Differenz zeigen eine regionale Anhebung und Ocker farbige Bereiche zeigen eine regionale Absenkung der Bemessungsniederschläge.

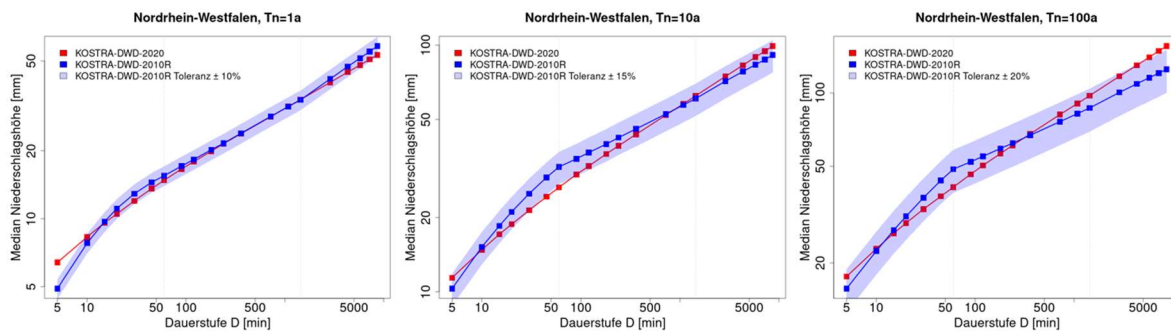


Abbildung 8: Vergleich der Mediane über die gesamten Rasterdatensätze KOSTRA-DWD-2010R (blau) inklusive des Toleranzbereichs (blaues Band) und KOSTRA-DWD-2020 (rot) je Dauerstufe für die Wiederkehrzeiten $T=1$ Jahr (links), $T = 10$ Jahren (mittig) und $T = 100$ Jahren (rechts).

Im Rahmen von Sensitivitätsstudien wurden zwei Dinge näher untersucht: Der Einfluss des Starkregenereignisses bei Münster im Sommer 2014 und das flächenhafte Starkregenereignis im Sommer 2021. Das Münster-Ereignis 2014 zeichnete sich durch eine extrem hohe Niederschlagsmenge innerhalb weniger Stunden aus, das im gesamten Datensatz eine absolute Ausnahme bildet. Die lokale und regionale Statistik wird dadurch massiv beeinflusst und weicht deutlich von Beobachtungen aus der Region ab. Dies drückt sich vor allem durch ungewöhnlich hohe lokale Unsicherheiten im Datensatz aus (siehe auch Shehu und Haberlandt, 2022).

Das Ereignis wurde aus diesem Grund als extrem seltenes Ereignis und somit als Ausreißer gewertet. Solche Ausreißer müssen formal aus der Statistik ausgeschlossen werden, da sie nicht mit dem Werkzeug KOSTRA-DWD, das ausschließlich den Wertebereich zwischen $T=1a$ und $100a$ umfasst, behandelt werden können. Das Ereignis wird jedoch später in die Betrachtungen von Ereignissen mit selteneren Wiederkehrzeiten (Praxisrelevante Extreme des Niederschlages – PEN) und maximaler Niederschläge einfließen.

Das Starkregenereignis im Juli 2021 brachte vor allem hohe Niederschlagssummen in mittleren bis längeren Dauerstufen in einem großen Gebiet. Auch wenn sich lokal Wiederkehrintervalle von 100 Jahren und seltener nach KOSTRA-DWD-2010R ergaben, so sind die maximalen Intensitäten bei weiten nicht mit denen des Münster-Ereignisses 2014 zu vergleichen. Sensitivitätsstudien haben darüber hinaus gezeigt, dass die Hinzunahme der Daten aus dem Jahr

2021 die zuvor berechnete Statistik nur wenig verändern würde und somit bei einer Verlängerung der Zeitreihe über 2020 als Basis von KOSTRA das Ereignis im Juli 2021 sehr wahrscheinlich nicht als Ausreißer zu behandeln ist. Signifikante Erhöhungen von Starniederschlagssummen wären vor allem punktuell an Stationen mit langer Zeitreihe und starker Beregnung im Juli 2021 (z.B. Kall-Sistig) zu erwarten. Der Datensatz reagiert dabei scheinbar sensibler auf das Hinzukommen sehr extremer Ereignisse bei langen Zeitreihen, da diesen ein höheres Gewicht in der Regionalisierung zukommt. Der Effekt verstärkt sich nochmals, wenn bisher an der Station lediglich vergleichsweise deutlich schwächere Ereignisse registriert wurden. An dieser Stelle muss aber auch noch einmal deutlich auf die Notwendigkeit der differenzierten Betrachtung von meteorologischen Ereignissen und den dadurch ausgelösten hydrologischen Hochwasserereignissen hingewiesen werden.

Die Fortschreibung von KOSTRA-DWD wird auch zukünftig regelmäßig erfolgen. Dabei wird weiterhin an der stetigen Vergrößerung der Datengrundlage durch Digitalisierung historischer Daten und der Verlängerung der Zeitreihen in die Gegenwart gearbeitet. Wesentlicher Forschungsschwerpunkt für die nächsten Jahre wird die zusätzliche Einbindung von Wetterradar-daten sein. Untersuchungen im Rahmen der aktuellen Fortschreibung zeigen ein hohes Potential für weitere Verbesserungen, jedoch gibt es hier aktuell immer noch weiteren Forschungsbedarf, da die Reihen relativ kurz sind und die Messmethodik inklusive der Messfehler sich signifikant von den herkömmlichen Niederschlagsmessungen unterscheidet.

Das Niederschlagsereignis im Juli 2021 ist nicht explizit in die Aufstellung des KOSTRA-DWD-2020-Datensatzes eingegangen. Bisherige Sensitivitätsstudien zeigen tendenziell, dass das Juli-Ereignis 2021 die KOSTRA-DWD-Statistik nicht wesentlich verändert hätte. Für eine abschließende Beurteilung bedarf es jedoch weiterer Untersuchungen. An dieser Stelle wird auf die Unterschiede zwischen der Niederschlagsstatistik und der Hochwasserstatistik hingewiesen.

Daher wird empfohlen, die Daten des KOSTRA-DWD-2020 bei der Aktualisierung von Hochwasserstatistiken zu berücksichtigen. Der neue Datensatz steht zur Verfügung⁷ und löst zum 01.01.2023 KOSTRA-DWD-2010R als Bemessungsgrundlage ab.

5.2 Generierung langer Niederschlagszeitreihen mittels Wettergenerator

Der Wettergenerator (RWG – Regional Weather Generator) des GFZ liefert kontinuierliche Zeitreihen mit täglicher Auflösung für Niederschlag sowie für weitere Klimavariablen (Temperatur, relative Feuchte, Strahlung) für ein gegebenes Gebiet – entweder ein regelmäßiges Raster oder ein (unregelmäßiges) Netz von Stationslokationen. Die erzeugten Zeitreihen berücksichtigen die Autokorrelation innerhalb einer Zeitreihe sowie die räumliche Korrelation zwischen Zeitreihen einer Variablen. RWG ist eine Weiterentwicklung eines Modells, das von Y. Hundecha an der Ruhr-Universität (Hundecha et al., 2009) entwickelt wurde. Kern ist ein multi-site autoregressives stochastisches Modell (MAR-1). Im ersten Schritt wird der Niederschlag generiert; die anderen Klimavariablen werden dann auf die bereits generierten Niederschläge konditioniert. Die Verteilung des Niederschlags wird durch die „extended Generalized Pareto“ Verteilung beschrieben (– es gibt aber auch andere Versionen). Eine detaillierte Beschreibung und Evaluierung von RWG findet sich in Nguyen et al. (2021).

⁷ https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/return_periods/precipitation/KOSTRA/KOSTRA_DWD_2020/

Der Wettergenerator wurde ursprünglich für kleinere Einzugsgebiete entwickelt. In den letzten Jahren wurde er so modifiziert, dass Wetter für größere Regionen erzeugt werden kann. Er wurde in verschiedenen Studien und mehreren Einzugsgebieten in Deutschland und Österreich eingesetzt (z.B. Hundecha & Merz, 2012, Falter et al., 2015, Winter et al., 2019). Die bisher größten Regionen waren das Rheineinzugsgebiet (Ullrich et al., 2021) sowie ganz Deutschland (Sairam et al., 2021). In der bisherigen Version wurden die Modellparameter monatsweise gewählt und der Wettergenerator konnte nur stationäres Klima erzeugen. Im letzten Jahr wurde eine Version entwickelt, deren Parameter auf atmosphärische Zirkulationsmuster konditioniert sind. Zusätzlich kann eine Abhängigkeit des lokalen Niederschlags von der großräumigen Temperatur berücksichtigt werden. Diese beiden Optionen erlauben es, nichtstationäres Wetter – unter Klimawandel – zu erzeugen. Zirkulationsmuster sowie die großräumige Temperatur werden dabei aus GCMs entnommen.

RWG benötigt Zeitreihen der Klimavariablen in täglicher Auflösung; typischerweise Beobachtungen, aber es können auch Reanalyse-Daten verwendet werden. In den bisherigen Anwendungen wurden tägliche Zeitreihen mit einer Länge von 5000 bis 10000 Jahren erzeugt.

Im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekt „Klima-Anpassung, Hochwasser und Resilienz“ (KAHR-Projekt) wurde RWG für ein Raster mit ca. 10 km Auflösung implementiert, das die Einzugsgebiete Ahr, Erft und Rur einschließt. Für jede Rasterzelle wurden statistische Verteilungen für Niederschlag und Temperatur auf der Basis des E-OBS v25.0e Datensatzes für die Periode 1.1.1950 – 31.12.2021 angepasst, d.h. die Beobachtungen des Sommers 2021 sind in die Anpassung eingeflossen. Außerdem wurde ein Algorithmus entwickelt, der die täglichen Daten auf stündliche Daten disaggregiert. Im KAHR-Projekt liefert RWG sehr lange Zeitreihen als Input für das hydrologische Modell, um extreme Hochwasser – auch unter Klimawandel – und die damit verbundenen Schäden abschätzen zu können. Der Wert von RWG besteht in der Bereitstellung von Zeitreihen für räumlich verteilte Niederschlagsfelder; für eine gegebene Lokation wird versucht, die beobachteten Lokationsbeobachtungen möglichst gut durch das statistische Modell wiederzugeben. Durch die Berücksichtigung der räumlichen Korrelation erfolgt allerdings bei der Generierung der räumlichen Niederschlagsfelder eine gewisse Übertragung von beobachteten Extremniederschlägen auf Nachbarlokationen.

Es wurde beschlossen, den Ansatz des Wettergenerators in Kombination mit der N-A-Modellierung im KAHR-Projekt zu testen. Im Falle eines positiven Ergebnisses wird das GFZ den Wettergenerator für ein Raster, das ganz NRW umfasst, implementieren, parametrisieren und evaluieren. Auf dieser Basis werden stündliche Zeitreihen für jede Rasterzelle ($dx \sim 10$ km) für das momentane Klima und Klimawandelprojektionen für NRW als Input für N-A-Modelle in NRW bereitgestellt.

Bei positivem Ergebnis wird empfohlen, die mit dem Wettergenerator erzeugten langen Niederschlagszeitreihen in der N-A-Modellierung zu verwenden und die Ergebnisse als Werkzeug der Informationserweiterung im Sinne des DWA-M 552 bei der Aktualisierung von Hochwasserstatistiken zu verwenden.

Darüber hinaus kann der Wettergenerator für Hochwasserabschätzungen unter Klimawandel eingesetzt werden, indem für ausgewählte Emissionsszenarien und zukünftige Zeit-

räume lange Niederschlags- und Temperaturzeitreihen generiert werden, die auf großräumigen Klimavariablen von globalen Klimamodellen (GCMs) beruhen (siehe auch Kapitel 6.1).

5.3 Daten historischer Hochwasserereignisse

Informationen zu historischen Hochwasserereignissen können helfen, die vorhandene Datenbasis auf der Grundlage von Pegeldaten in Hinblick auf die Häufigkeit und die Höhe von Hochwasserereignissen zu erweitern. Als historische Hochwasserereignisse sind die Hochwasser definiert, für die keine systematischen Pegelaufzeichnungen vorliegen. Während für das 20. Jahrhundert häufig Informationen verfügbar sind, nehmen die Informationen ab, je weiter man in die Vergangenheit kommt.

Für die Recherche historischer Hochwasserereignisse ist eine systematische Recherche durchzuführen. Informationen zu historischen Hochwasserereignissen finden sich entweder als Flutmarken an historischen Gebäuden (z.B. Kirchen, Kloster, alter Bauernhöfe) oder in Archiven der Wasserverbände, der Bezirksregierungen, der Städte und Kommunen, des Landes, der Historienvereine sowie weiterer Dritter. Ziel ist es, wenn möglich Zeitpunkt, Höhe und Auswirkungen der historischen Hochwasserereignisse sowie deren hochwasserauslösende Prozesse zu ermitteln. Diese Daten sind mit weitergehenden Informationen z.B. zur historischen Landnutzung zu verschneiden, über hydro-numerische Modellverfahren zu bewerten und für die erweiterte Pegelstatistik aufzubereiten. Die Recherche und Analyse historischer Hochwasserereignisse erfordert eine interdisziplinäre Zusammenarbeit von Historikern, Geographen und Wasserbauingenieur*innen.

Eine Rekonstruktion dieser Ereignisse hilft, die Pegelstatistik zu erweitern und damit eine verlässlichere Extremwertstatistik zu erhalten. Beispielsweise zeigen aktuell Vorogushyn et al. wie die Wiederkehrperiode des Hochwasserereignisses 2021 an der Ahr unter Berücksichtigung der Hochwasserereignisse in den Jahren 1804 und 1910 von „*theoretisch über 100 Millionen Jahren auf etwa 8600 Jahre*“ sinkt.

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts Klimaanpassung, Hochwasser und Resilienz (KAHR) werden aktuell historische Hochwasser für die Erft, Rur (mit Inde und Vicht) durch das Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen recherchiert und chronologisch zusammengestellt.

Wo Daten zu historischen Hochwasserereignissen zur Verfügung stehen, sollten diese bei der Aufstellung der Hochwasserstatistik berücksichtigt werden (siehe dazu auch die Empfehlungen des DWA-M 552 in Kapitel 4.1).

Es wird empfohlen, historische Hochwasserereignisse landesweit zu recherchieren und für die hydrologische Extremwertstatistik aufzubereiten.

5.4 Aufstellung einer Regionalisierung für NRW

An Pegelmessstellen mit Abflusserfassung können punktuell Abfluss-Kennwerte meistens mit statistischen Auswertungen auf Basis langjähriger Zeitreihen gut bestimmt werden. In der wasserwirtschaftlichen Praxis werden die Abfluss-Kennwerte für o. g. Fragestellungen jedoch an beliebigen Gewässerstellen, an denen keine langjährigen Abflussaufzeichnungen vorliegen, benötigt. Um dies zu erreichen, stehen grundsätzlich mehrere Methoden zur Verfügung. Eine

weit verbreitete Möglichkeit ist die Aufstellung und Nutzung von Niederschlag-Abfluss-Modellen (N-A-Modelle). Hiermit können –basierend auf hydrologischen Prozessinformationen– flächendeckend Hochwasserkennwerte generiert werden; allerdings liefern diese Modelle nicht a priori richtige und plausible Ergebnisse. Ein zentraler Baustein ist die Modellkalibrierung anhand von gemessenen Daten. Liegen in Gebieten keine Daten vor, so sind die Ergebnisse der N-A-Modelle mit größeren Unsicherheiten behaftet.

Eine andere Möglichkeit zur Ableitung von flächendeckenden Hochwasserkennwerten sind (statistische) Regionalisierungsverfahren, die auf Pegeldaten beruhen. Ein Regionalisierungsmodell basiert in der Regel auf multiplen Regressionsansätzen und erlaubt die Beschreibung von mittleren und T-jährlichen Abfluss-Kennwerten auf Basis maßgebender Einzugsgebietskenngrößen und Landschaftsgroßräumen. Ggfls. sind auch neue Methoden aus dem Bereich des Machine-Learning zu testen. Eine solche Regionalisierung bietet gegenüber N-A-Modellen Vorteile, aber auch Nachteile (vgl. die Dokumentation zur in Baden-Württemberg durchgeführten Regionalisierung im Projekt „Abfluss BW“⁸). Insofern können sich beide Methoden gegenseitig ergänzen. Eine auf Pegeldaten durchgeführte Regionalisierung kann als ein belastbares hydrologisches Grundgerüst für NRW angesehen werden. Daher ist die Erstellung eines NRW-weiten Regionalisierungsmodells „Abfluss-NRW“ von hohem Nutzen.

Folgende Aspekte sollten beachtet werden:

- Die Umsetzung eines Regionalisierungsmodells für NRW ist möglich, der Aufwand jedoch aufgrund der starken anthropogenen Überprägung vieler Einzugsgebiete wahrscheinlich hoch.
- Das Regionalisierungsmodell muss in regelmäßigen Abständen (z.B. 5 oder 10 Jahre) überprüft und aktualisiert werden.
- Ein ausreichend umfangreiches Pegelnetz wird zur Aufstellung und Validierung des Regionalisierungsmodells benötigt. Gerade bei in der Häufigkeit und Intensität zunehmenden Starkregenereignissen wird ein dichtes Pegelnetz benötigt, um die aus diesen Ereignissen resultierenden Auswirkungen auf das Abflussverhalten der Gewässer erfassen zu können.
- Für das Regionalisierungsmodell muss u.a. eine Datenbasis der Abflusswerte aller relevanten Pegel in NRW zur Verfügung stehen. Das LANUV NRW betreibt ca. 300 Pegel in NRW. Durch die Pegel der Wasserwirtschaftsverbände kommt nochmals eine Anzahl in etwa gleicher Größenordnung hinzu. Es gibt derzeit keine Datenbank, in der all diese Daten zusammengeführt werden. Dieser Schritt ist –insbesondere vor dem Hintergrund der notwendigen Aktualisierungen des Regionalisierungsmodells– essentiell.
- Historische Hochwasserereignisse sollten in einem Regionalisierungsverfahren in NRW berücksichtigt werden.
- Die Daten und Ergebnisse des Regionalisierungsmodells sollten im Rahmen einer OpenData-Strategie frei verfügbar sein.

⁸ <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/wasser/regionalisierte-abflusskennwerte>

Eine einheitliche Datenbasis in Form eines Regionalisierungsverfahrens würde für NRW wertvolle zusätzliche Informationen für die Aufstellung der Hochwasserstatistiken an einzelnen Pegeln liefern. Darüber hinaus können für Gebiete, in denen keine Pegel vorhanden sind, Hochwasserkennwerte berechnet werden.

Daher wird empfohlen, eine NRW-weite Regionalisierung der Hochwasserabflussstatistiken aufzustellen.

5.5 Niederschlags-Abfluss-Modellierung mit dem Regenereignis Juli 2021 als Grundlage für die Durchführung von hydrologischen Stresstests

Die Niederschlags-Abfluss-Modellierung mit „räumlichem Verschieben“ des Niederschlagsereignisses aus dem Juli 2021 ist insbesondere dafür geeignet, Erkenntnisse auf Gebiete, die nicht vom Juli-Hochwasser 2021 betroffen waren, zu übertragen. Damit könnte z.B. ein hydrologischer Stresstest durchgeführt werden, mit dem die Wirksamkeit des Hochwasserrisikomanagements in einem Einzugsgebiet unter Extrembedingungen geprüft und verbessert wird.

Dazu kann beispielsweise die durch die Radardaten des DWD abgebildete räumliche und zeitliche Entwicklung des Regenereignisses verwendet werden und dieses Regenereignis dann mit unterschiedlichen räumlichen Startpunkten als Randbedingung in einem N-A-Modell des jeweils betrachteten Einzugsgebiets verwendet werden (siehe z. B. Slager und de Bruijn, 2022). Der Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer Hamburg (LSBG) setzte hingegen für seine N-A-Modellierungen zur „Übertragung des extremen Regenereignisses im Ahrtal von Juli 2021 auf Hamburg“ (LSBG, 2022) flächenhaft die Zeitreihe des Niederschlags an der Station Wipperfürth-Gardeweg (Bergisches Land) für die untersuchten Gebiete an.

Das Verfahren ist besonders dafür geeignet, das Niederschlagsereignis aus dem Juli 2021 als Beispiel eines Extremereignisses als Randbedingung eines N-A-Modells für Erkenntnisse zu extremen Abflussverhältnissen zu verwenden. Zu diesem Zweck wurde es bereits in den o. g. Projekten für die Niederlande (Slager und de Bruijn, 2022) und Hamburg (LSBG, 2022) angewandt. Anhand der Ergebnisse wurden Schlussfolgerungen formuliert, u. a. zu folgenden wasserwirtschaftlichen/hydrologischen Auswirkungen als auch im Hinblick auf die daraus entstehenden Randbedingungen für die Gefahrenabwehr und den Katastrophenschutz:

- Betroffene und überflutete Gebiete sowie Dauer der Hochwasser
- Belastungen und mögliches Versagen von Hochwasserschutzanlagen
- Abgleich der vorhandenen Ressourcen und Einsatzpläne (sowohl der Wasserwirtschaft als auch der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes) mit den im Extremszenario benötigten Ressourcen
- Erkenntnisse zu Gefahren für Leib und Leben
- Abschätzung der Schadenssummen im Ereignisfall
- Mittelfristige Folgen z. B. infolge des Ausfalls kritischer Infrastruktur
- Logistik der Gefahrenabwehr und des Katastrophenschutzes
- u. v. m.

Das „Verschieben der Wolke“ ist daher insbesondere dafür geeignet, Erkenntnisse über mögliche Auswirkungen eines Extremhochwassers zu erlangen und notwendige Vorbereitungen

zu treffen. Zu diesen Vorbereitungen gehören insbesondere Abstimmungen zwischen Wasserwirtschaft und Gefahrenabwehr/Katastrophenschutz.

Das Niederschlagsereignis vom Juli 2021 könnte an jedem Ort auftreten. Sehr schwer einzuschätzen ist allerdings die Eintrittswahrscheinlichkeit am jeweiligen Ort. Daher können die mit einem solchen Verfahren berechneten Abflusswerte nicht als direkte Eingangsgröße für Hochwasserstatistiken verwendet werden. Trotzdem liefert ein solches Verfahren Erkenntnisse auch für die Hochwasserstatistik, da auch ohne Verknüpfung der berechneten Abflusswerte zu Wiederkehrintervallen Erkenntnisse zur möglichen Ergebnisbandbreite der Abflüsse gesammelt werden können. Historische Hochwasserereignisse können helfen, die mit Verfahren berechneten Hochwasser in der Jährlichkeit einzuordnen.

Die Niederschlags-Abfluss-Modellierung mit „räumlichem Verschieben“ des Niederschlagsereignisses aus dem Juli 2021 bietet darüber hinaus den Vorteil, dass die Kommunikation der Ergebnisse sowohl in der Öffentlichkeit als auch zwischen den Fachbereichen Wasserwirtschaft und Gefahrenabwehr/Katastrophenschutz im Vergleich zu einem erdachten Extremszenario erleichtert wird. Dadurch wird auch die Akzeptanz der Ergebnisse erhöht.

Die Niederschlags-Abfluss-Modellierung mit „räumlichem Verschieben“ des Niederschlagsereignisses aus dem Juli 2021 kann für Betrachtungen zum Verhalten von Hochwasserschutzbauwerken und Stauanlagen in Extremszenarien verwendet werden. Die Ergebnisse können Hinweise dazu geben, ob und in welcher Tiefe Anlagen ggfls. überprüft werden sollten, allerdings sind keine direkten Schlüsse zu Bemessungsgrößen möglich.

Die Niederschlags-Abfluss-Modellierung mit „räumlichem Verschieben“ des Niederschlagsereignisses aus dem Juli 2021 sollte für den Erkenntnisgewinn insbesondere im Hinblick auf die Auswirkungen von Hochwasser-Extremszenarien genutzt werden.

Daraus sollten Erkenntnisse sowohl für die Wasserwirtschaft als auch die Gefahrenabwehr/den Katastrophenschutz abgeleitet werden. Die gewonnenen Erkenntnisse sollten insbesondere in die gemeinsamen Planungen der beiden Fachbereiche vor einem Hochwasser, den Informationsaustausch im Hochwasserfall und in gemeinsame Übungen zu Extremszenarien einfließen.

Wie eingangs erläutert, können für die N-A-Modellberechnung die im Kapitel 2.2 beschriebenen Niederschlagsdaten der Boden- und Radarstationen verwendet werden. Das Starkregenereignis vom Juli 2021 war aber nicht nur in NRW, sondern auch im Ahrgebiet, in Ostbelgien und im niederländischen Limburg verbreitet. Daher ist ggfls. zu prüfen, ob nicht auch die Niederschlagsdaten dieser benachbarten Regionen mit in die Methodik der „Verschiebung der Wolke“ einbezogen werden sollten, um das tatsächliche mögliche Maximum aus dem Juli-Ereignis 2021 ermitteln zu können. Der Wasserverband Eifel-Rur und die Waterschap Limburg beabsichtigen, für das Einzugsgebiet der Eifel-Rur einen hydrologischen Stresstest unter Verwendung dieser Methodik durchzuführen. Im Rahmen des Vorhabens kann pilothaft geprüft werden, inwieweit die Niederschlagsdaten aus den Nachbarregionen für eine vollständige Anwendung des Verfahrens der „Verschiebung der Wolke“ erforderlich sind. Die Erkenntnisse daraus könnten dann auf andere Einzugsgebiete in NRW übertragen werden.

Über die hier beschriebene N-A-Modellierung hinaus sind viele der in Kapitel 4 beschriebenen Verfahren geeignet, Erkenntnisse auf Gebiete zu übertragen, die nicht vom Juli-Hochwasser

2021 betroffen waren. Dies ist in den jeweiligen Unterkapiteln an entsprechender Stelle vermerkt.

6 Berücksichtigung der Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Hochwasserstatistik

Um eine bessere Vorbereitung auf zukünftige Hochwasserereignisse zu ermöglichen und die Forderung der EU-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie zu erfüllen, in den Hochwasserrisikomanagementplänen die voraussichtlichen Auswirkungen von Klimaänderungen auf das Auftreten von Hochwasser zu berücksichtigen, müssen diese möglichen Auswirkungen ermittelt werden. Empfehlungen dazu werden im folgenden Kapitel formuliert.

6.1 Berücksichtigung der Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Hochwasserstatistik am Beispiel des KLIWA-Vorhabens

Um die Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Hochwasserstatistik zu quantifizieren und zu analysieren, müssen diese Klimaänderungen und deren Auswirkungen zunächst modelliert werden. Die Kooperation „Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ (KLIWA) der Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz sowie des Deutschen Wetterdienstes stellt ein mögliches Vorgehen dar. Dieses hat das Ziel „künftige Veränderungen des Wasserhaushalts als Folge der Klimaveränderungen aufzuzeigen und der Wasserwirtschaftsverwaltung Hinweise über damit verbundene Auswirkungen auf die quantitativen und qualitativen gewässerkundlichen Grundlagen zu geben sowie nachhaltige Handlungsstrategien für die Umsetzung im Sinne des Vorsorgeprinzips zu entwickeln“ (Kooperation KLIWA, 2015).

Zur Abschätzung möglicher Auswirkungen zukünftiger Klimaveränderungen auf den Wasserhaushalt bzw. den Abfluss kommen in KLIWA Wasserhaushalt- und Bodenwasserhaushaltsmodelle zum Einsatz. Die klimatischen Eingangsgrößen in diese Modellierungen bilden regionale Klimaprojektionen, berechnet mit regionalen Klimamodellen, welche wiederum auf globalen Klimaprojektionen / –modellen, angetrieben durch ein definiertes Emissionsszenario, basieren (siehe Abbildung 9).

Globale Klimamodelle basieren auf einem atmosphärischen Modell, das mit einem Ozean-, einem Schnee- und Eis-, sowie einem Vegetationsmodell gekoppelt ist. Durch verschiedene Treibhausgas-Emissionsszenarien werden anthropogene Einflüsse auf das Klima berücksichtigt. Allerdings ist die Rasterweite eines globalen Klimamodells für differenzierte regionale Analysen zu grob. Daher werden regionale Ausprägungen von Klimaänderungen mit einem regionalen Klimamodell berechnet (Kooperation KLIWA, 2018). Mit dem regionalen Klimamodell werden wiederum die Randbedingungen für ein Wasserhaushaltsmodell des betrachteten Gebietes berechnet, das die zukünftigen Abflussverhältnisse modelliert. Durch den Vergleich der modellierten Wasserhaushaltgrößen im Referenz- und Zukunftszeitraum kann ein Änderungssignal abgeleitet werden.

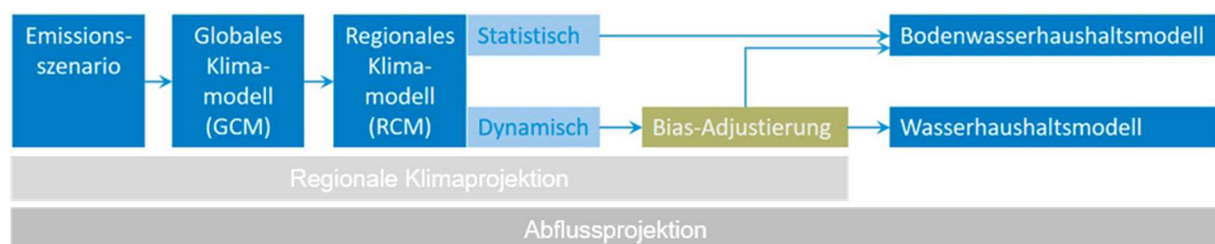


Abbildung 9: Modellkette vom Emissionsszenario bis zu Wasserhaushaltsmodellen (verändert nach Kooperation KLIWA (2018) und <https://www.kliwa.de/hydrologie-grundlagen-zukunft.html>)

Das gewählte Emissionsszenario zu Beginn der Modellkette und auch jedes weitere Modell enthält Annahmen sowie modelltechnische Vereinfachungen der physikalischen Prozesse, die Unsicherheiten und Ungenauigkeiten in die Ergebnisse und die daraus abgeleiteten Aussagen einbringen. Die Ergebnisse der Modellkette sind daher insbesondere von drei Entscheidungen abhängig:

- Wahl der Modelle
- Wahl der Randbedingungen und Szenarien
- Referenzzeitraum und Zeitraum in der Zukunft, für den die Modellrechnungen durchgeführt werden

Um möglichst belastbare Aussagen treffen zu können, ist es daher zielführend, verschiedene Randbedingungen und Szenarien sowie Modelle zu verwenden. Das so generierten Ensemble an Wasserhaushalts- bzw. Abflussprojektionen für den jeweils betrachteten Zeitraum in der Zukunft lassen dann Rückschlüsse bzgl. der wahrscheinlichen Ergebnisbandbreite zu.

Insbesondere bei der Wahl des betrachteten Zeitraums in der Zukunft, für den die Änderungen des Wasserhaushalts berechnet werden, sowie bei der Wahl der Emissionsszenarien fließen neben fachlichen Kriterien auch gesellschaftliche Zielvorstellungen mit ein.

Um die möglichen Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Hochwasserstatistik abschätzen zu können, müssen diese Auswirkungen modelltechnisch quantifiziert werden. Dies ist im Kooperationsvorhaben KLIWA mit einer Modellkette aus Klima- und Wasserhaushaltsmodellen gelungen. Ein ähnliches Vorgehen wird daher auch für NRW empfohlen.

Das beschriebene Vorgehen für einzelne Einzugsgebiete in getrennten Verfahren durchzuführen, ist sehr aufwendig. Auch ist zu berücksichtigen, dass es sich bei der Klimaänderung um ein überregionales Phänomen handelt. Daher scheint hier ein mindestens landesweites Vorgehen, ggfls. aber auch ein länderübergreifendes Vorgehen, sinnvoll.

Weitere Vorteile des o. g. Vorgehens liegen darin, dass zum einen die Ergebnisse des Vorgehens gut kommunizierbar sind, da Methoden nach dem Stand der Wissenschaft verwendet werden. Zum anderen können neue Erkenntnisse (neue Modelle, neue Emissionsszenarien usw.) verwendet werden, um die Ergebnisse fortlaufend zu überprüfen.

6.2 Statistisches Downscaling für die Ableitung von Starkregenstatistiken aus regionalen Klimasimulationen

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit geförderten Forschungsvorhabens ESKAPE⁹ (Entwicklung StädteRegionaler KlimaanpassungsProzesse) der Städtereion Aachen unter Beteiligung der RWTH Aachen und des Wasserverbandes Eifel-Rur wurden Klimaänderungen und Risiken durch zukünftige Hochwasserereignisse in der StädteRegion Aachen untersucht. Dabei war ein Schwerpunkt die Ermittlung von Klimafaktoren für die Erfassung der künftigen Veränderung des Starkregengeschehens in der Region.

Weltweite Klimaänderungen und die Folgen von Treibhausgasemissionen auf das Klima werden durch globale Klimamodelle (GCMs) mit einer relativ groben räumlichen Auflösung simuliert. Um daraus regional genauere Informationen abzuleiten, werden diese mit regionalen

⁹ <https://www.staedtereion-aachen.de/de/navigation/aemter/mobilitaet-und-klimaschutz-s-64/klimaschutz/i-individuelle-anpassung/eskape>

Klimamodellen (RCMs) gekoppelt. Die kleinskaligen Prozesse, die bei der Entstehung von Starkregen eine Rolle spielen, werden auch von relativ hochauflösenden regionalen Klimasimulationen (EURO-CORDEX EUR-11: 0.11° horizontale Auflösung) nicht abgebildet. Um Informationen über kleinräumige Starkregen abzuleiten, wurde ein statistisches Downscalingverfahren mithilfe von Beobachtungsdaten für die Region Aachen und benachbarte Regionen durchgeführt.

Mit statistischen Downscalingverfahren können Daten von Klimaprojektionen auf kleinere Skalen übertragen werden und damit für die Untersuchung einer Reihe hydrologischer Prozesse nutzbar gemacht werden. Es wurde ein statistisches Downscalingverfahren angewandt, um die Tageswerte der regionalen Klimasimulationen auf der Skala 0.11° in hochaufgelöste Daten auf der Stationsskala zu überführen. Dies erfolgte mit statistischen Beziehungen, die empirisch aus Beobachtungsdaten abgeleitet wurden.

Für jede der relevanten Dauerstufen und jede Modellrealisierung wurden empirische Verteilungsfunktionen bestimmt und daraus auf Basis von 30 Jahren Modelldaten statistische Starkregenhöhen abgeleitet (Auswertung nach Dauer und Wiederkehrzeit). Diese wurden genutzt, um Änderungssignale der Starkregenhöhen für die Projektionszeiträume im Vergleich zum Referenzzeitraum zu berechnen. Betrachtet wurden die drei Zeiträume: Referenzzeitraum (1971-2000), „nahe Zukunft“ (2021-2050) und „ferne Zukunft“ (2071-2100).

Ergebnisse

Mittlerer und saisonaler Niederschlag: Gemittelt über die 8 ausgewerteten Klimaprojektionen ergeben sich geringe Änderungen der mittleren Jahresniederschlagssumme für die Projektionszeiträume im Vergleich zu 1971-2000. Eine Gegenüberstellung der saisonalen Niederschlagstrends zeigt, dass die Niederschläge vor allem im Herbst und Winter zunehmen, während im Sommer Abnahmen auftreten, insbesondere in der fernen Zukunft für das Szenario RCP 8.5.

Starkregenhöhen im Referenzzeitraum: Ein Vergleich der resultierenden Starkregenhöhen für den Referenzzeitraum mit Beobachtungsdaten und KOSTRA zeigte, dass die mithilfe des statistischen Downscalings abgeleiteten Starkregenhöhen im (unteren) Spannungsbereich der Starkregenhöhen von Beobachtungen in der Region liegen.

Starkregenhöhen Änderungssignale: Ausgehend von den ermittelten Starkregenhöhen wurden die relativen Niederschlagsänderungen für die „nahe Zukunft“ und die „ferne Zukunft“ berechnet. Die mittleren Änderungssignale liegen für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zu 1971-2000 überwiegend im Bereich 3% - 6%. Für die ferne Zukunft fallen sie höher aus, mit ungefähr 7% - 12% je nach Dauerstufe und Wiederkehrzeit. Die Spannweite, die durch das Minimum und das Maximum der 8 regionalen Simulationen angegeben ist, lässt teilweise erhebliche Unterschiede zwischen den regionalen Klimasimulationen erkennen. In der fernen Zukunft reicht die Spannweite von Abnahmen um -15% bis hin zu Zunahmen über 30% (im Szenario RCP 4.5). Ursache für die unterschiedlichen Ergebnisse sind insbesondere unterschiedliche Niederschlagstrends in den regionalen Klimasimulationen vor dem statistischen Downscaling.

Modellübergreifend gibt es eine Tendenz hin zu selteneren aber extremeren Ereignissen. Weiterhin fallen die Trends für die längeren Dauerstufen höher aus als für die kürzeren Dauerstufen. Eine mögliche Ursache findet sich in der Verschiebung der Niederschläge hin zu mehr Niederschlägen im Herbst und Winter und abnehmenden Niederschlägen im Sommer.

Unsicherheiten: Bei der Anwendung des statistischen Downscalings auf Projektionsdaten von Klimamodellen liegt die Annahme zugrunde, dass sich die statistischen Beziehungen zwischen den Skalen unter zukünftigen Bedingungen nicht wesentlich ändern (d. h. keine grundlegend anderen Zirkulationsmuster oder grundlegend anderen Extremereignisse auftreten). Außerdem übertragen sich die Unsicherheiten der projizierten Klimaänderungen aus den globalen und regionalen Klimamodellen auf die Ergebnisse des Downscalings. Das Ensemble von 8 regionalen Klimaprojektionen bildet diese Unsicherheiten in einem gewissen Maße ab. Für die Änderungssignale der Starkregen spielen insbesondere die Unsicherheiten bei den Niederschlagstrends eine Rolle, die je nach globaler und regionaler Klimasimulation im Untersuchungsgebiet unterschiedlich ausfallen.

Verwendung der abgeleiteten Starkregenstatistiken

Mit den ermittelten Starkregenfaktoren wurde das Flusseinzugsgebiet der Wurm bei Aachen und Herzogenrath näher untersucht. Dazu wurden die statistischen Niederschlagshöhen des damals aktuellen KOSTRA DWD 2010R um die entsprechenden Faktoren erhöht und in eine Niederschlag-Abflussmodellierung gegeben. Mit den daraus resultierenden Abflüssen und einer 2D-hydraulischen Berechnung wurden die Hochwasserstände unter Klimawandelbedingungen berechnet. Dabei zeigten sich signifikante Erhöhungen des Hochwasserrisikos.

Fazit

Mit dem Verfahren des statistischen Downscalings können Starkregenstatistiken aus regionalen Klimasimulationen auch für kleine Niederschlagsdauerstufen abgeleitet werden. Damit wird es möglich, die Veränderung des Starkregengeschehens in urbanen Gebieten und des Hochwasserverhaltens in kleinen Einzugsgebieten unter den Bedingungen des Klimawandels zu prognostizieren. Die erforderliche Datenbasis von zeitlich hochaufgelösten Niederschlagsstationsdaten für das Downscaling liegt in NRW vor und könnte zusätzlich um die in NRW vorliegenden, langjährigen kalibrierten Radardatensätze aus der Radardatenkooperation des DWD, der Wasserverbände und des Landes ergänzt werden (siehe Kap. 2.2).

Das in Kapitel 6.1 erläuterte KLIWA-Verfahren ist vor allem für größere Flusseinzugsgebiete mit entsprechend großen räumlichen und zeitlichen Skalen entwickelt worden. Das Downscaling-Verfahren bietet demgegenüber einen Lösungsansatz insbesondere für kleine und hochdynamische Flusseinzugsgebiete.

Mit dem Downscalingverfahren werden aber auch die größeren Niederschlagsdauerstufen bis hin zu Tageswerten betrachtet. Damit könnte das Verfahren als Variante oder Ergänzung des KLIWA-Verfahrens eingesetzt werden. Mit den aus dem Downscaling-Verfahren ermittelten Änderungssignalen für den Niederschlag und einer (landesweiten) N-A-Modellierung könnte die künftige Veränderung des Hochwasserabflussgeschehens mittels Modellregenberechnung auch für die großen Flussgebiete in NRW bestimmt werden. Damit stünde eine Alternative bzw. eine Ergänzung zur in Kapitel 6.1 dargestellten Wasserhaushaltsberechnung (Langzeitsimulation) zur Verfügung.

Das Verfahren des statistischen Downscalings für die Ableitung von Starkregenstatistiken aus regionalen Klimasimulationen bietet das Potenzial, landesweit angewandt zu werden. Dazu sollten weitergehende Tests in einem Pilotvorhaben zur Bestätigung des Verfahrens durchgeführt werden, um dieses bei positivem Ergebnis landesweit anzuwenden.

Damit könnte eine wertvolle Datenbasis für die Starkregen- und Hochwasserrisikomanagementplanung in NRW geschaffen werden.

6.3 Berücksichtigung der Abflussprojektionen im Hochwasserrisikomanagement

Um die Abflussprojektionen unter Einfluss des Klimawandels bei der Hochwasserrisikomanagementplanung zu berücksichtigen, müssen Methoden zur Übertragung der Ergebnisse in die Planungsprozesse entwickelt werden. Dazu können die Ergebnisse beispielsweise für Bemessung von Hochwasserschutzanlagen in Form von „Klimaänderungsfaktoren“ vereinfacht werden, die auf die für die Planung der Anlagen maßgebenden Abflüsse angewendet werden.

Mit den Ergebnissen aus KLIWA wurde beispielsweise in Baden-Württemberg der Leitfaden „Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes“ (LUBW, 2005) eingeführt. Dieser gibt vor, dass bei der Planung neuer Hochwasserschutzanlagen der Lastfall Klimaänderung zu prüfen ist. Auf der Grundlage von Klimaänderungsszenarien werden im Leitfaden regionale Klimaänderungsfaktoren für Hochwasser verschiedener Jährlichkeiten zur Verfügung gestellt.

In Bayern wurde auf Grundlage der Ergebnisse aus KLIWA für neue staatliche Hochwasserschutzmaßnahmen ein landesweit gültiger Klimaänderungsfaktor eingeführt, dessen Größe ebenfalls mit der Jährlichkeit des betrachteten Hochwassersabflusses variiert (LfU BY, 2005).

Wenn die möglichen Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Hochwasserstatistik modelltechnisch quantifiziert werden, sollte parallel eine Vorgehensweise entwickelt werden, um die Ergebnisse bei der Planung von Hochwasserschutzanlagen zu berücksichtigen.

Solange keine landesweiten Untersuchungen in NRW vorliegen, bieten die Ergebnisse der Kooperation KLIWA und die darauf aufbauenden Vorgehensweisen der Länder Baden-Württemberg und Bayern zur Berücksichtigung von Klimafaktoren bei der Planung von Hochwasserschutzanlagen eine geeignete Grundlage zur Berücksichtigung der Auswirkungen des Klimawandels auch in NRW.

Es sollte darüber hinaus geprüft werden, in welcher Weise die Auswirkungen von Klimaänderungen in anderen Bereichen des Hochwasserrisikomanagements berücksichtigt werden können.

6.4 Weitere Aspekte

Die Änderung von Hochwasserkennwerten und –wahrscheinlichkeiten ist nur eine mögliche Auswirkung des Klimawandels auf den Wasserhaushalt. Mit dem Wasserhaushaltsmodell (siehe Modellkette in Abbildung 9) können sowohl weitere wasserwirtschaftliche Fragestellungen untersucht werden (z. B. Niedrigwasser) als auch Daten für die Bewertung weiterer Folgen (z. B. Auswirkungen auf Ökologie) gewonnen werden. Weitere Themenbereiche wie beispielsweise Trinkwasserversorgung und Abwasserbeseitigung schließen sich an.

Auch wenn in einem ersten Schritt bei der Modellierung der Auswirkungen von Klimaänderungen eine Fokussierung auf das Thema Hochwasser sinnvoll sein sollte (wie im KLIWA-Projekt

geschehen), sollte die Erweiterung des Untersuchungsrahmens um die o. g. Themenbereiche geprüft werden.

7 Zusammenarbeit innerhalb der Wasserwirtschaft

Die für eine die Bestimmung der Niederschläge und Abflüsse des Hochwassers 2021 relevanten Daten werden von verschiedenen Institutionen erhoben. Diese Daten ergänzen sich teilweise und ihre Zusammenführung lässt Interpretationen zu, die aus den einzelnen Datenbeständen nicht möglich sind. Als Beispiel sei die in Kapitel 2.2 beschriebene Kooperation von DWD, LANUV und Wasserverbänden im Bereich von Niederschlagsdaten genannt.

Über das Erheben und Zusammentragen der Informationen hinaus ist für wichtige Interpretationen der Daten, wie z. B. die Bestimmung von Scheitelabflusswerten, die Zusammenarbeit mehrerer Institutionen zwingend erforderlich. In Kapitel 2.1 wird beispielsweise die Bestimmung der Scheitelabflusswerte beschrieben. Beim LANUV liegen Wasserstands-Abfluss-Beziehungen der Hochwassermeldepegel und der gewässerkundlichen Pegel vor. Diese sind allerdings durch Messungen bei deutlich geringeren Abflüssen als denen des Juli-Hochwassers 2021 erstellt worden. Eine Extrapolation dieser Wasserstands-Abfluss-Beziehungen für die Scheitelwasserstände des Hochwassers ist, je nach Pegelstandort und Ausprägung des Hochwassers an diesem Standort, mit großen Unsicherheiten behaftet oder gar nicht zulässig. Die Scheitelabflüsse können daher nur über Modellrechnungen rekonstruiert bzw. geschätzt werden, siehe z. B. die Berechnung des Scheitelabflusses mit einem zweidimensionalen numerischen Modell an der Erft (vgl. Kapitel 3.2). Diese Modelle liegen beim LANUV nicht vor, weshalb hier je nach Gewässer eine Zusammenarbeit z. B. mit den Bezirksregierungen oder Wasserverbänden erforderlich ist, bei denen diese Modelle mindestens für die Risikogewässer (nach HWRM-Risikokulisse) zumeist vorliegen. Umgekehrt ist eine Kalibrierung und Validierung der numerischen Modelle nur durch Zuhilfenahme der durch das LANUV erstellten Wasserstands-Abfluss-Beziehungen möglich.

Aufgrund der vorhandenen Aufgabenzuschnitte der einzelnen Institutionen ist keine dieser Institutionen alleine in der Lage, die notwendigen Daten für die Beschreibung des Hochwasserereignisses und die Aktualisierung der Hochwasserstatistik zu sammeln und zu interpretieren.

Daher ist eine enge Zusammenarbeit innerhalb der Wasserwirtschaft erforderlich. Diese Zusammenarbeit sollte themenspezifisch organisiert und durch Ergänzung der verschiedenen Kompetenzen der Institutionen durchgeführt werden.

Eine solche Zusammenarbeit benötigt insbesondere für übergreifende Fragestellungen wie die Aktualisierung von Hochwasserstatistiken Formate, in denen sich Experten regelmäßig austauschen. Eine Verstetigung des Austauschs zu Grundlagendaten, Projekten zur statistischen Einordnung und neuen Forschungsergebnissen bzgl. der Hochwasserstatistik ist wünschenswert, gerade im Hinblick auf die Änderung der wasserwirtschaftlichen Systeme im Zuge des Klimawandels.

Der Austausch sollte explizit zwischen Forschung und Praxis (d. h. Verwaltung, LANUV, Wasserverbände und Forschungsinstitutionen) stattfinden und eine Art „ständiges Forum“ sein. Vorbilder für einen solchen Austausch können die nach der Sturmflut 1962 gegründeten Foren der deutschen Küstenländer sein, z. B. der „Ausschuss für Küstenschutzwerke“.

Daher wird ein ständiges Austauschformat zur Hochwasserstatistik empfohlen, bei dem sich die genannten Akteure in festgelegtem (z. B. vierteljährlichen) Turnus zusammenfinden, um fachliche Fragen zu erläutern und sich darüber auszutauschen.

8 Zeithorizonte und Abhängigkeiten der einzelnen empfohlenen Maßnahmen

Um den weiteren Prozess der Umsetzung der in diesem Dokument gegebenen Empfehlungen zu unterstützen, werden im folgenden Kapitel Schätzungen zu den benötigten Dauern für die Umsetzung der Maßnahmen gegeben sowie deren Abhängigkeiten dargestellt. Bei den hier aufgeführten Maßnahmen handelt es sich um solche, die eine landesweite Umsetzung erfordern. Dies sind im Wesentlichen Maßnahmen zur landesweiten Erweiterung der hydrologischen Datenbasis:

1. Ermittlung der Scheitelabflüsse des Juli-Hochwassers 2021 (siehe Kapitel 2.1)
2. Ermittlung der Niederschlagsdaten des Ereignisses (siehe Kapitel 2.2)
3. Durchführung einer landesweiten Ereignisanalyse des Juli-Hochwassers 2021 (siehe Kapitel 3.3)
4. Durchführung einer landesweiten Recherche historischer Hochwasser (siehe Kapitel 5.3)
5. Aufstellung einer landesweiten Regionalisierung (siehe Kapitel 5.4)
6. Regionale Informationen über Rekordhochwasser (siehe Kapitel 4.3)
7. Vergleich der BHQs von Stauanlagen (siehe Kapitel 4.4)
8. Wasserhaushaltsmodellierung unter Klimawandeleinfluss (siehe Kapitel 6.1)
9. Ableitung von Starkregenstatistiken mittels statistischem Downscaling (siehe Kapitel 6.2)

Da die Verwendung von mit dem Wettergenerator erzeugten langen Niederschlagszeitreihen in der N-A-Modellierung noch in den KAHN-Modellregionen getestet wird (siehe Kapitel 5.2), ist diese Empfehlung hier nicht aufgeführt.

Unter der Prämisse, dass die notwendigen Ressourcen für die Umsetzung der Maßnahmen zur Verfügung stehen, werden in Abbildung 10 die geschätzten Zeitrahmen für die Umsetzung sowie die Abhängigkeiten der einzelnen Maßnahmen dargestellt.

In Abbildung 10 sind in grün Zeitrahmen für die Vorbereitung der Maßnahmen berücksichtigt, die blau gekennzeichneten Flächen stellen die eigentliche Umsetzung der Maßnahme dar. Die Maßnahmen 1 bis 4 könnten weitgehend parallel anlaufen, während die Umsetzung Aufstellung einer landesweiten Regionalisierung (5) auf die Scheitelabflüsse des Juli-Hochwassers 2021 (1) sowie die Ergebnisse der Recherche historischer Hochwasser (4) und auf die Ereignisanalyse (3) angewiesen ist.

Mit Vorliegen der Hochwasserscheitelabflüsse kann die Maßnahme „Regionale Informationen über Rekordhochwasser“ (6) gestartet werden, ggfls. könnten weitere hydrologische Informationen aus der landesweiten Ereignisanalyse (3) hilfreich sein. Der landesweite Vergleich der Bemessungshochwasser BHQ für Stauanlagen (7) benötigt keine Vorgängermaßnahme und könnte unmittelbar gestartet werden. Für die dann daraus abzuleitenden Schlussfolgerungen und Maßnahmen für die einzelnen Stauanlagen könnte dann der Input aus den landesweiten Maßnahmen, insb. aus der landesweiten Regionalisierung (5) und den regionalen Informationen über Rekordhochwasser (6), sehr hilfreich sein.

Nr.	Beschreibung	Vorgänger	Jahr				
			1	2	3	4	5
1	Scheitelabflüsse						
2	Niederschlagsdaten (Radardaten)		fertiggestellt				
	Niederschlagsdaten (Stationsdaten)		fertiggestellt				
3	Landesweite Ereignisanalyse						
4	Landesweite Recherche hist. Hochwasser	1,2					
5	Landesweite Regionalisierung	1,3,4,(6)					
6	Regionale Informationen über Rekordhochwasser	1,(4)					
7	Vergleich der BHQs von Stauanlagen						
8	Wasserhaushaltsmodellierung unter Klimawandeleinfluss	1,2,(6),(9)					
9	Ableitung von Starkregenstatistiken mittels statistischem Downscaling	2		*			

*) Bei Verwendung von Radardaten 1 Jahr längere Bearbeitungszeit

() Vorgängermaßnahme nicht zwingend erforderlich

Abbildung 10: Zeitrahmen für die Umsetzung sowie die Abhängigkeiten der einzelnen Maßnahmen.

Die Maßnahme „Wasserhaushaltsmodellierung unter Klimawandeleinfluss“ (8) ist ähnlich aufwändig wie die Aufstellung der landesweiten Regionalisierung (5), da eine umfangreiche Mo-

dellkette durchlaufen werden muss. Die erforderlichen Wasserhaushalts- und Bodenwasserhaushaltsmodelle müssen ggfls. aufgestellt werden und, je nach Modellgebiet und Zusammenarbeit mit weiteren Ländern, ein länderübergreifendes Projekt abgestimmt werden. Der in der Abbildung 10 dargestellte Bearbeitungszeitraum von 3,5 bis 4 Jahren ist daher eher als Mindestzeitraum zu sehen. Für die Studie sollten die Abflüsse und Niederschläge des Juli-Ereignisses vorliegen (1 und 2), die Maßnahmen 6 und 9 könnten weiteren wertvollen Input liefern, der aber problemlos auch erst im Laufe der Maßnahmenumsetzung 8 eingebracht werden könnte. Im Rahmen des KAHR-Projektes wird die Generierung langer Niederschlagszeitreihen auch unter Berücksichtigung des Klimawandels entwickelt und eingesetzt (siehe Kapitel 5.2). Sollte sich dieser Ansatz bewähren, so könnte diese Methodik bei landesweiter Anwendung als Bestandteil der Modellkette den Input für die Wasserhaushaltsmodellierung (8) liefern. Daher sollten ggfls. zunächst die Ergebnisse des KAHR-Projektes bis Ende 2024 abgewartet werden, bevor die Maßnahme 8 gestartet wird.

Die Maßnahme „Ableitung von Starkregenstatistiken mittels statistischem Downscaling“ (9) kann gestartet werden, sobald die Niederschlagsdaten des Juli-Ereignisses 2021 der landeseigenen Bodenstationen zur Verfügung stehen (2). Dazu sollten weitergehende Tests in einem Pilotvorhaben zur Bestätigung des Verfahrens durchgeführt werden, um dieses bei positivem Ergebnis landesweit anzuwenden. Für die Vorbereitung und landesweite Durchführung des Verfahrens sind rd. 1,5 Jahre zu veranschlagen. Sollte es sich als zielführend erweisen, zur räumlichen Verdichtung neben den Bodenstationsdaten auch kalibrierte Radardatensätze aus der Radarkooperation NRW zu verwenden, würde sich die Bearbeitungsdauer um ca. ein Jahr verlängern.

Wie die Darstellung in der Abbildung 10 zeigt, ist mit erheblichen Bearbeitungszeiten zu rechnen. Einige Verfahren, wie z.B. die „Regionalen Informationen über Rekordhochwasser“ (6) sollten zudem noch weiteren Untersuchungen in Wissenschaft und Praxis unterzogen werden. Daher könnte es von Vorteil sein, die Verfahren zunächst in vorlaufenden Pilotvorhaben in Teilregionen von NRW durchzuführen und zu testen. Die dabei gewonnenen Erfahrungen könnten dann die landesweite Anwendung vereinfachen und beschleunigen.

Darüber hinaus ist damit zu rechnen, dass die landesweite Vorgehensweise entsprechend der bei der Umsetzung der bei den Pilotprojekten und Maßnahmen gemachten Erfahrungen fortlaufend anzupassen ist. Daher empfiehlt es sich, die Umsetzung der Maßnahmen durch eine Arbeitsgruppe „Hochwasserstatistik“ zu begleiten, die die landesweite Umsetzung mit fachlichen und praktischen Impulsen unterstützt. Die Arbeitsgruppe könnte aus Vertretern von Landesfachbehörden, den Wasserverbänden und der Wissenschaft zusammengesetzt werden.

Die Umsetzungen der landesweiten Maßnahmen bauen teilweise aufeinander auf und werden mehrere Jahre intensiver Arbeit beanspruchen. Bei der Durchführung werden wichtige wissenschaftliche und praktische Erkenntnisse gesammelt werden.

Es bietet sich an, Maßnahmen, mit denen teilweise fachliches Neuland betreten wird, zunächst in Form von Pilotvorhaben in geeigneten Teilregionen von NRW durchzuführen, bevor sie landesweit ausgerollt werden.

Aufgrund des hohen fachlichen Anspruchs und der Komplexität der Vorhaben wird empfohlen, die Umsetzung der landesweiten Maßnahmen durch eine Arbeitsgruppe zu unterstützen.

9 Zusammenstellung der wesentlichen Empfehlungen

Ausführliche Erläuterungen zu den Empfehlungen sind in den Kapiteln 2 bis 8 enthalten. Welche der Empfehlungen berücksichtigt werden sollten, ist vom betrachteten Gewässer und Einzugsgebiet mit ihren jeweiligen Gegebenheiten abhängig. Die Empfehlungen sind dort zu berücksichtigen, wo die Gegebenheiten eine Umsetzung ermöglichen und durch die Berücksichtigung der Empfehlungen ein relevanter Einfluss auf die Hochwasserstatistik zu erwarten ist.

Die wesentlichen Empfehlungen der Unterarbeitsgruppe sind:

2 Aufbereitung hydrologischer Daten des Juli-Hochwassers 2021

2.1 Scheitelabflüsse des Juli-Hochwassers 2021

Es wird empfohlen, die Scheitelabflüsse des Hochwassers 2021 an so vielen Pegelstandorten wie möglich zu rekonstruieren. Dafür sollten auch numerische Modelle in Kombination mit Verfahren zur Rekonstruktion der maximalen Wasserstände (z. B. Aufnahmen der Geschwemmsellinien, Befliegungsdaten, Satellitenbilder) unterstützend eingesetzt werden.

2.2 Daten der relevanten Niederschläge für das Juli-Hochwasser 2021

Die Niederschlagsdaten des Juli-Ereignisses 2021 liegen als Zeitreihen an Niederschlagsstationen und als hochaufgelöste, angeeichte Radardaten vor und sollten im Rahmen der Aktualisierung der Hochwasserstatistik berücksichtigt werden.

3 Projekte zur statistischen Einordnung von Abfluss und Niederschlag des Juli-Ereignisses 2021

3.1 Statistische Einordnung des Niederschlagsereignisses nach PEN-LAWA

Es wird empfohlen, eine statistische Einordnung der Stationsniederschläge aus 2021 unter Zuhilfenahme der PEN-LAWA-Methodik für die betroffenen Regionen zu prüfen.

Es wird empfohlen, die PEN-LAWA Methodik fortzuschreiben. Diese Fortschreibung der Methodik wird seit dem Frühjahr 2023 durchgeführt.

3.2 Aktualisierung der Hochwasserstatistik an der Erft

Die Arbeiten für die Aufstellung einer neuen Hochwasserstatistik für die Erft unter Berücksichtigung des Juli-Hochwassers 2021 deuten auf erhebliche Veränderungen gegenüber der bisherigen Hochwasserstatistik hin. Für die adäquate Berücksichtigung des Juli-Hochwassers ist eine sorgfältige und umfassende Informationserweiterung gemäß DWA-M 552 daher unerlässlich (vgl. Kapitel 4.1). Dennoch verbleiben gerade für den Bereich großer Jährlichkeiten, der für die Bemessung der Sicherheit von Hochwasserschutz- und Stauanlagen von Bedeutung ist, noch große Unsicherheiten. Daher

sollten möglichst weitere Verfahren und Daten, wie sie in diesem Dokument vorgestellt werden, zur Absicherung der Ergebnisse einbezogen werden.

3.3 Aufstellung einer Ereignisanalyse des Hochwasserereignisses 2021 in NRW

Es wird empfohlen, eine umfassende NRW-weite Ereignisanalyse des Juli-Hochwassers 2021 durchzuführen.

4 Empfehlungen zur Aktualisierung der Hochwasserstatistik

4.1 Empfehlungen des DWA-M 552

Die Empfehlungen des DWA-M 552 sind bei der Aktualisierung von Hochwasserstatistiken immer zu berücksichtigen:

Die Datenbasis sollte größtmöglich gewählt werden; d.h., wenn verfügbar, sollten partielle Serien für die statistische Analyse verwendet werden und historische Hochwasser statistisch berücksichtigt werden.

Die statistische Analyse sollte durch Prozessverständnis ergänzt werden; d.h., sofern verfügbar, sollten die hochwasserauslösenden Prozesse in der statistischen Auswertung berücksichtigt werden, z.B. durch die saisonale Statistik.

Die statistischen Ergebnisse sollten räumlich analysiert werden durch Hinzunahme weiterer Hochwasserinformationen in der Region, z.B. durch Regionalisierung oder räumliche Statistik. Geeignete N-A-Modelle können im Falle von unbeobachteten Einzugsgebieten oder bei nicht ausreichenden Beobachtungsreihen von Abflüssen für die Informationserweiterung genutzt werden.

4.2 Hüllkurvenverfahren

Das Hüllkurvenverfahren bietet sich im Sinne einer Informationserweiterung nach DWA-M 552 dazu an, die Hochwasserabflüsse im Bereich sehr hoher Jährlichkeiten auf ein physikalisch plausibles Maß zu beschränken. Das Verfahren ist bislang in Einzelfällen eingesetzt worden und sollte in Wissenschaft und Praxis weitergehend untersucht werden.

Es wird empfohlen, das Hüllkurvenverfahren insbesondere für Einzugsgebiete von Stauanlagen zu testen und bei Eignung zu verwenden.

Darüber hinaus wird empfohlen, bei der Aufstellung einer Hochwasserstatistik nach DWA-M 552 immer auch über das HQ 200 hinaus die höheren Jährlichkeiten zu beachten und insbesondere bei Talsperren und Hochwasserrückhaltebecken zu prüfen, ob die gewählte statistische Verteilungsfunktion in Extrembereichen physikalisch plausible Abflusswerte widerspiegelt.

4.3 Extremwertstatistik unter Berücksichtigung von regionalen Informationen über Rekordhochwasser und einer oberen Grenze

Es wird empfohlen, das Verfahren nach Guse et al. (2010) in der Wissenschaft und Praxis weitergehend zu untersuchen. Dazu bietet es sich an, das Verfahren zunächst in einem Pilotgebiet anzuwenden und seine Eignung für die in NRW vorliegenden Daten und Verhältnisse zu überprüfen. Bei entsprechend positivem Ergebnis könnte es landesweit zur Anwendung kommen und damit eine zusätzliche, regionalisierte Datenbasis insbesondere für die Bemessung von Stauanlagen bieten.

4.4 Vergleich von Bemessungsgrößen am Beispiel der BHQ-Werte von Talsperren

Es wird empfohlen, ein landesweites Spenden-Einzugsgebietsdiagramm mit den zu den Bemessungsgrößen BHQ1 und BHQ2 korrespondierenden Abflussspenden der Talsperren und Hochwasserrückhaltebecken zu erstellen, Anlagen mit ähnlichen spezifischen Eigenschaften miteinander zu vergleichen und bei neuen Ermittlungen der Bemessungsgrößen für Talsperren/Hochwasserrückhaltebecken die Plausibilität zu prüfen sowie ggfls. näher zu untersuchen.

4.5 Zusammenhang zwischen Niederschlags- und Hochwasserabflussstatistik

Die Einordnung der Eintrittswahrscheinlichkeit des Hochwasserabflusses sollte unter Berücksichtigung des zugrundeliegenden Niederschlagsereignisses in Abhängigkeit der Einzugsgebietsspezifika erfolgen. Eine Übereinstimmung der Eintrittswahrscheinlichkeiten darf dabei nicht vorausgesetzt werden.

5 Erweiterung und Aktualisierung der hydrologischen Datenbasis

5.1 Aktualisierung des KOSTRA-DWD-Datensatzes

Das Niederschlagsereignis im Juli 2021 ist nicht explizit in die Aufstellung des KOSTRA-DWD-2020-Datensatzes eingegangen. Bisherige Sensitivitätsstudien zeigen tendenziell, dass das Juli-Ereignis 2021 die KOSTRA-DWD-Statistik nicht wesentlich verändert hätte. Für eine abschließende Beurteilung bedarf es jedoch weiterer Untersuchungen. An dieser Stelle wird auf die Unterschiede zwischen der Niederschlagsstatistik und der Hochwasserstatistik hingewiesen.

Daher wird empfohlen, die Daten des KOSTRA-DWD-2020 bei der Aktualisierung von Hochwasserstatistiken zu berücksichtigen. Der neue Datensatz steht zur Verfügung und löst zum 01.01.2023 KOSTRA-DWD-2010R als Bemessungsgrundlage ab.

5.2 Generierung langer Niederschlagszeitreihen mittels Wettergenerator

Bei positivem Ergebnis der Erprobung der N-A-Modellierung mit langen, mittels Wettergenerator erzeugten Zeitreihen des Niederschlags im KAHR-Projekt¹⁰ wird empfohlen, die mit dem Wettergenerator erzeugten langen Niederschlagszeitreihen in der N-A-Modellierung zu verwenden und die Ergebnisse als Werkzeug der Informationserweiterung im Sinne des DWA-M 552 bei der Aktualisierung von Hochwasserstatistiken in NRW zu verwenden.

Darüber hinaus kann der Wettergenerator für Hochwasserabschätzungen unter Klimawandel eingesetzt werden, indem für ausgewählte Emissionsszenarien und zukünftige Zeiträume lange Niederschlags- und Temperaturzeitreihen generiert werden, die auf großräumigen Klimavariablen von globalen Klimamodellen (GCMs) beruhen (siehe auch Kapitel 6.1).

5.3 Daten historischer Hochwasserereignisse

Wo Daten zu historischen Hochwasserereignissen zur Verfügung stehen, sollten diese bei der Aufstellung der Hochwasserstatistik berücksichtigt werden.

Es wird empfohlen, historische Hochwasserereignisse landesweit zu recherchieren und für die hydrologische Extremwertstatistik aufzubereiten.

5.4 Aufstellung einer Regionalisierung für NRW

Es wird empfohlen, eine NRW-weite Regionalisierung der Hochwasserabflussstatistiken aufzustellen.

5.5 Niederschlags-Abfluss-Modellierung mit dem Regenereignis Juli 2021 als Grundlage für die Durchführung von hydrologischen Stresstests

Die Niederschlags-Abfluss-Modellierung mit „räumlichem Verschieben“ des Niederschlagsereignisses aus dem Juli 2021 sollte für den Erkenntnisgewinn insbesondere im Hinblick auf die Auswirkungen von Hochwasser-Extremszenarien genutzt werden.

Daraus sollten Erkenntnisse sowohl für die Wasserwirtschaft als auch die Gefahrenabwehr/den Katastrophenschutz abgeleitet werden. Die gewonnenen Erkenntnisse sollten insbesondere in die gemeinsamen Planungen der beiden Fachbereiche vor einem Hochwasser, den Informationsaustausch im Hochwasserfall und in gemeinsame Übungen zu Extremszenarien einfließen.

6 Berücksichtigung der Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Hochwasserstatistik

6.1 Berücksichtigung der Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Hochwasserstatistik am Beispiel des KLIWA-Vorhabens

¹⁰ Vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördertes Projekt „Klima-Anpassung, Hochwasser und Resilienz“ (KAHR).

Um die möglichen Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Hochwasserstatistik abschätzen zu können, müssen diese Auswirkungen modelltechnisch quantifiziert werden. Dies ist im Kooperationsvorhaben KLIWA mit einer Modellkette aus Klima- und Wasserhaushaltsmodellen gelungen. Ein ähnliches Vorgehen wird daher auch für NRW empfohlen.

6.2 Statistisches Downscaling für die Ableitung von Starkregenstatistiken aus regionalen Klimasimulationen

Das Verfahren des statistischen Downscalings für die Ableitung von Starkregenstatistiken aus regionalen Klimasimulationen bietet das Potenzial, landesweit angewandt zu werden. Dazu sollten weitergehende Tests in einem Pilotvorhaben zur Bestätigung des Verfahrens durchgeführt werden, um dieses bei positivem Ergebnis landesweit anzuwenden.

6.3 Berücksichtigung der Abflussprojektionen im Hochwasserrisikomanagement

Wenn die möglichen Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Hochwasserstatistik modelltechnisch quantifiziert werden, sollte parallel eine Vorgehensweise entwickelt werden, um die Ergebnisse bei der Planung von Hochwasserschutzanlagen zu berücksichtigen.

Solange keine landesweiten Untersuchungen in NRW vorliegen, bieten die Ergebnisse der Kooperation KLIWA und die darauf aufbauenden Vorgehensweisen der Länder Baden-Württemberg und Bayern zur Berücksichtigung von Klimafaktoren bei der Planung von Hochwasserschutzanlagen eine geeignete Grundlage zur Berücksichtigung der Auswirkungen des Klimawandels auch in NRW.

Es sollte darüber hinaus geprüft werden, in welcher Weise die Auswirkungen von Klimaänderungen in anderen Bereichen des Hochwasserrisikomanagements berücksichtigt werden können.

7 Zusammenarbeit innerhalb der Wasserwirtschaft

Für Umsetzung der in diesem Dokument gesammelten Empfehlungen der UAG Hochwasserstatistik ist eine enge Zusammenarbeit innerhalb der Wasserwirtschaft erforderlich. Diese Zusammenarbeit sollte themenspezifisch organisiert und durch Ergänzung der verschiedenen Kompetenzen der Institutionen durchgeführt werden.

Darüber hinaus wird ein ständiges Austauschformat zur Hochwasserstatistik empfohlen, bei dem sich die genannten Akteure in festgelegtem Turnus zusammenfinden, um fachliche Fragen zu erläutern und sich darüber auszutauschen.

8 Zeithorizonte und Abhängigkeiten der einzelnen empfohlenen Maßnahmen

Die Umsetzungen der landesweiten Maßnahmen bauen teilweise aufeinander auf und werden mehrere Jahre intensiver Arbeit beanspruchen. Bei der Durchführung werden wichtige wissenschaftliche und praktische Erkenntnisse gesammelt werden.

Es bietet sich an, Maßnahmen, mit denen teilweise fachliches Neuland betreten wird, zunächst in Form von Pilotvorhaben in geeigneten Teilregionen von NRW durchzuführen, bevor sie landesweit ausgerollt werden.

Aufgrund des hohen fachlichen Anspruchs und der Komplexität der Vorhaben wird empfohlen, die Umsetzung der landesweiten Maßnahmen durch eine Arbeitsgruppe zu unterstützen.

10 Literatur

- Castellarin, A., Vogel, R. M., und Matalas, N. C. (2005): Probabilistic behaviour of a regional envelope curve, *Water Resour. Res.*, 41, W06018, doi:06010.01029/02004WR003042.
- Castellarin, A. (2007): Probabilistic envelope curves for design flood estimation at ungauged sites, *Water Resour. Res.*, 43(4), W04406, doi:04410.01029/02005WR004384.
- Falter, D., Schröter, K., Dung, N.V., Vorogushyn, S., Kreibich, H., Hundecha, Y., Apel, H. und Merz, B. (2015): Spatially coherent flood risk assessment based on long-term continuous simulation with a coupled model chain. *Journal of Hydrology*, 524, S. 182–193, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.021>.
- Guse, B., Hofherr, T. H., und Merz, B. (2010): Introducing empirical and probabilistic regional envelope curves into a mixed bounded distribution function. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(12), S. 2465–2478, doi:10.5194/hess-14-2465-2010.
- Hersch, R. W. (2002): The world's maximum observed floods. *Flow measurements and Instrumentation*. Volume 13, Issues 5-6. S. 231 – 235.
- Hundecha, Y., Pahlow, M. und Schumann, A. (2009): Modeling of daily precipitation at multiple locations using a mixture of distributions to characterize the extremes. *Water Resources Research*, 45(12), W12412, <https://doi.org/10.1029/2008WR007453>.
- Hundecha, Y. und Merz, B. (2012) Exploring the relationship between changes in climate and floods using a model-based analysis. *Water Resources Research*, 48(4), W04512, <https://doi.org/10.1029/2011WR010527>.
- Klein, B., Schumann, A. und Pahlow, M. (2006): Extreme Hochwasserereignisse an deutschen Talsperren. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 50 (4), S. 162–168
- Kooperation KLIWA (2015): Vorgehenskonzept. 5. Fortschreibung des Vorgehenskonzeptes vom Dezember 1998 im Rahmen des Kooperationsvorhabens Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, Anlage zur Rahmenvereinbarung zwischen den Ländern Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz sowie dem Deutschen Wetterdienst vom Dezember 2006.
- Kooperation KLIWA (2018): Ergebnisse gemeinsamer Abflussprojektionen für KLIWA und Hessen basierend auf SRES A1B. KLIWA-Kurzbericht im Rahmen des Kooperationsvorhabens Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, ISBN: 978-3-88251-400-1.
- LUBW (2005): Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes. Leitfaden der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LUBW), ISBN 3-88251-288-1.
- LfU BY (2005): Gewässerkundlicher Jahresbericht für Bayern 2005: Klimaänderungsfaktoren bei Planungen für den Hochwasserschutz. Landesamt für Umwelt Bayern (LfU BY), https://www.lfu.bayern.de/wasser/gewaesserkundliche_berichte/sonderberichte/doc/sb_klimaaenderungsfaktoren_bei_planung_hwschutz.pdf.
- LfU RLP (2022): Bericht Hochwasser im Juli 2021. Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU RLP), https://lfu.rlp.de/fileadmin/lfu/Wasserwirtschaft/Ahr-Katastrophe/Hochwasser_im_Juli2021.pdf.

- LfULG (2013): Ereignisanalyse zum Hochwasser im Juni 2013 in Sachsen. Herausgeber: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG).
- LSBG (2022): Beispielhafte Übertragung des extremen Regenereignisses im Ahrtal von Juli 2021 auf Hamburg. Bericht des Landesbetriebes Straßen, Brücken und Gewässer und Hochwasserschutz (LSBG) Nr. 19/2022, ISSN 1867-7959.
- Merz, R. und Blöschl, G. (2008): Flood frequency hydrology: 1. Temporal, spatial, and causal expansion of information, *Water Resour. Res.*, 44, W08432, doi: 10.1029/2007WR006744.
- MULNV (2021): Zweiter fortgeschriebener Bericht zu Hochwasserereignissen Mitte Juli 2021 des Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MULNV). Bericht zur Sitzung des Ausschusses für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landtags Nordrhein-Westfalen am 25. August 2021.
- Nguyen, V. D., Merz, B., Hundecha, Y., Haberlandt, U. und Vorogushyn, S. (2021): Comprehensive evaluation of an improved large-scale multi-site weather generator for Germany. *International Journal of Climatology*, doi:<https://doi.org/10.1002/joc.7107>.
- Sairam, N., Brill, F., Sieg, T., Farrag, M., Kellermann, P., Nguyen, V. D. und Kreibich, H. (2021): Process-Based Flood Risk Assessment for Germany. *Earth's Future*, 9(10), e2021EF002259, doi: <https://doi.org/10.1029/2021EF002259>.
- Shehu, B. und Haberlandt, U. (2022): Uncertainty estimation of regionalised depth–duration–frequency curves in Germany.. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/hess-2022-254>, in review.
- Slager, K. und De Bruijn, K. (2015): What-if the waterbomb would have fallen on the Netherlands? *Deltares*, <https://www.deltares.nl/app/uploads/2022/01/Summary-UK-Waterbomb.pdf>.
- Ullrich, S. L., Hegnauer, M., Nguyen, D. V., Merz, B., Kwadijk, J. und Vorogushyn, S. (2021): Comparative evaluation of two types of stochastic weather generators for synthetic precipitation in the Rhine basin. *Journal of Hydrology*, 601, 126544, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126544>.
- Viglione, A. et al. (2009): On the role of the runoff coefficient in the mapping of rainfall to flood return periods. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13(5), 577-593, doi:10.5194/hess-13-577-2009.
- Vorogushyn, S.; Apel, H.; Kemter, M. und Thieken, A. (2022): Analyse der Hochwassergefährdung im Ahrtal unter Berücksichtigung historischer Hochwasser. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 66 (5), S. 244-254.
- Winter, B., Schneeberger, K., Nguyen, D., Huttenlau, M., Achleitner, S., Stötter, J., Merz, B. und Vorogushyn, S. (2019): A continuous modelling approach for design flood estimation on sub-daily time scale. *Hydrological Sciences Journal*, 64(5), S. 539–554.