

SAGA-F

**Erarbeitung von
Methoden zur
Durchführung von
Standortgefährdungs-
analysen für
Überflutungen aus
kleinen und mittleren
Einzugsgebieten
(Phase I)**

SAGA-F

Erarbeitung von Methoden zur Durchführung von Standortgefährdungs- analysen für Überflutungen aus kleinen und mittleren Einzugsgebieten (Phase I)

Christian Strack

August 2023

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) unter dem Förderkennzeichen RS1587 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der GRS.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der GRS wieder und muss nicht mit der Meinung des BMUV übereinstimmen.

Deskriptoren

Kleine Einzugsgebiete, Niederschläge, Probabilistische Standortgefährdungsanalyse, Überflutungen

Kurzfassung

Im Rahmen des Vorhabens RS1587 „Erarbeitung von Methoden zur Durchführung von Standortgefährdungsanalysen für Überflutungen aus kleinen und mittleren Einzugsgebieten (Phase I)“ wurde mit der Erstellung einer probabilistischen Standortgefährdungsanalyse für Hochwasser aus kleinen Einzugsgebieten begonnen.

Die Wahl für das Modellgebiet fiel dabei auf ein kleines Einzugsgebiet südlich der Sieg an der Landesgrenze von Nordrhein-Westfalen zu Rheinland-Pfalz, das typische Eigenschaften für ein kleines Einzugsgebiet im Mittelgebirgsraum aufweist. Das Modellgebiet wurde in seinen Eigenschaften erfasst. Dies bestimmt die Eingabeparameterbereiche für die Rechenmethoden zur Ermittlung von Hochwasserabflüssen.

Anhand dieses Modellgebiets wurde eine probabilistische Standortgefährdungsanalyse durchgeführt. Dazu wurden zwei Methoden zur Ermittlung von Niederschlägen geringer Überschreitenswahrscheinlichkeiten inklusive der Unsicherheitsbandbreiten angewendet und die so ermittelten Niederschlagsverteilungen mittels zweier verschiedener Niederschlags-Abfluss-Beziehungen in Hochwasserabflüsse umgerechnet. Zur Erfassung der Unsicherheiten, sowohl der Niederschlagswerte als auch der sonstigen Eingabeparameter, wurde ein Monte-Carlo-Verfahren eingesetzt.

Zur Ermittlung eines Gesamtergebnisses aus allen möglichen Analysewegen kam ein logischer Baum zum Einsatz, der die unterschiedlichen Wege gewichtet ins Endergebnis einfließen lässt. Im Rahmen dieses Forschungs- und Entwicklungsvorhabens wurden ausschließlich gleichgewichtete Ansätze verwendet, d. h. jede einzelne Simulation hat das gleiche Gewicht.

Im Endergebnis wurde eine Gefährdungskurve für den gewählten Analysepunkt erstellt, die alle im Rahmen dieses Vorhabens erfassten Unsicherheiten beinhaltet. Die Hauptquellen für die Unsicherheitsbandbreite der Ergebnisse wurden diskutiert. Diese sind vor allem die Niederschlagsermittlung, die Verteilung einiger Eingabeparameter (wie der Time of Concentration etc.) und die verwendeten Gewichtungsschemata im logischen Baum.

Abstract

Within the framework of the project RS1587 "Development of methods for the implementation of site hazard analyses for floods from small and medium-size catchments (Phase I)", the development of a probabilistic site hazard analysis for floods from small catchments was started.

The choice for the model area fell on a small catchment area south of the Sieg at the state border of North Rhine-Westphalia to Rhineland-Palatinate, which shows typical characteristics for a small catchment area in the low mountain range region. The characteristics of the model area were collected and recorded. This determines the input parameter ranges for the computational methods to determine the flood runoffs.

Based on this model area, a probabilistic site hazard analysis was performed. For this purpose, two methods for determining precipitations with low exceedance probabilities including the uncertainty ranges were applied and the calculated precipitation distributions converted into flood runoffs by means of two different precipitation-runoff relations. A Monte Carlo approach was used to capture the uncertainties, both of the precipitation values and of the other input parameters.

A logical tree has been applied for determining an overall result from all possible analysis paths, that weights the different paths before incorporating them in the final result. In this research and development project, only equally weighted approaches were used, i.e., each individual simulation has the same weight.

The final result was a hazard curve for the selected analysis point that includes all uncertainties captured in this project. The main sources of the uncertainty range of the results were discussed. These are mainly the precipitation determination, the distribution of some input parameters (like the time of concentration e. g.) and the used weighting schemes in the logical tree.

Inhaltsverzeichnis

	Kurzfassung	I
	Abstract	II
1	Einleitung	1
1.1	Gesamtziel des Vorhabens	1
1.2	Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele	2
1.3	Durchgeführte Arbeiten.....	3
2	Stand der Wissenschaft und Technik: bisherige Arbeiten	5
3	Einzugsgebiet	7
3.1	Auswahl des Einzugsgebiets	7
3.2	Erfassung des Einzugsgebiets.....	8
4	Niederschläge	11
4.1	Bestimmung aus dem Rasterdatensatz des DWD	11
4.2	Bestimmung aus Tagesniederschlägen	13
4.3	Vergleich der Werte beider Extrapolationsmethoden	15
4.4	Niederschlags-Zeit-Verlauf	17
5	Niederschlags-Abfluss-Beziehungen und Annahmen	19
5.1	Time of Concentration	19
5.2	Curve Number Method und Unit Hydrograph Method	22
5.2.1	Curve Number Method.....	23
5.2.2	Unit Hydrograph Method.....	28
5.3	Rational Method und zugeordneter Hydrograph	32
5.3.1	Rational Method	32
5.3.2	Hydrograph.....	35
6	Durchführung der Simulationen und logischer Baum	37
6.1	Gewichtungsschemata für Niederschlagsprofile	38

6.1.1	Curve Number Method.....	38
6.1.2	Rational Method	40
6.2	Gewichtungsschema für Niederschlagsdauern	40
6.2.1	Curve Number Method.....	41
6.2.2	Rational Method	43
6.3	Gewichtungsschema für Methodenkombinationen.....	43
7	Ergebnisse	47
7.1	Ergebnisse der Curve Number Method.....	47
7.1.1	Ergebnisse unter Verwendung des DWD-Rasterdatensatzes	47
7.1.2	Ergebnisse unter Verwendung aus Tagesniederschlägen abgeleiteter Werte.....	49
7.2	Ergebnisse der Rational Method.....	51
7.2.1	Ergebnisse unter Verwendung des Rasterdatensatzes.....	52
7.2.2	Ergebnisse unter Verwendung aus Tagesniederschlägen abgeleiteter Werte.....	54
7.3	Gesamtergebnis	56
8	Zusammenfassung und Ausblick	61
	Literaturverzeichnis.....	67
	Abbildungsverzeichnis.....	71
	Tabellenverzeichnis.....	75
	Abkürzungsverzeichnis.....	77
A	Anhang	79
A.1	Empirische Formeln zur Bestimmung der Time of Concentration.....	79
A.2	Daten zu Extrapolationsergebnissen von Niederschlägen	81

1 Einleitung

Im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung (ab 2018, /BMWI 18/) sowie der BMUV-Forschungsförderung zur nuklearen Sicherheit (ab 2021, /BMWI 21/) werden im Rahmen des Forschungsschwerpunktes zum Forschungsgebiet Reaktorsicherheitsforschung u. a. Arbeiten zur

„Berücksichtigung komplexer Unfallszenarien nach Einwirkungen von innen und außen“

gefördert. Insbesondere zählen zu den Forschungs- und Entwicklungsthemen die

„Weiterentwicklung methodischer Grundlagen zur Durchführung und Bewertung von PSA, z. B. unter Berücksichtigung von Personalhandlungen, Einwirkungen von innen und außen (inkl. Einwirkungskombinationen), technischen Neuerungen (wie DLT) sowie für einen gesamten Anlagenstandort („Site-Level PSA“) mit Berücksichtigung aller Reaktorblöcke („Multi-Unit PSA“)“ /BMWI 21/

Zur Durchführung von PSA mit Bezug auf Einwirkungen von außen bedarf es geeigneter Eingangsdaten zur Bewertung. Diese Eingangsdaten werden in Form von Gefährdungskurven (Wahrscheinlichkeitsverteilungen) als Resultat einer probabilistischen Standortgefährdungsanalyse bereitgestellt. Bisher wurden probabilistische Standortgefährdungsanalysen nur für wenige Einwirkungen von außen (z. B. Erdbeben) durchgeführt.

Ziel dieses Projektes war, die Methoden und Werkzeuge zu entwickeln und zu erproben, die für naturbedingte Einwirkungen von außen die Durchführung einer probabilistischen Gefährdungsanalyse ermöglichen, und bestehende Schwachstellen zu identifizieren. Dabei wurde mit einer bisher nicht vertieft betrachteten Einwirkung begonnen.

1.1 Gesamtziel des Vorhabens

In Deutschland werden seit Jahrzehnten Standortgefährdungsanalysen für Kernkraftwerke durchgeführt. Dabei haben sich in der jüngeren Vergangenheit statistische Verfahren und probabilistische Standortgefährdungsanalysen zunehmend gegenüber deterministischen Verfahren durchgesetzt und werden zunehmend auf immer mehr Einwirkungen von außen angewendet.

Es ist in Zukunft auch nicht auszuschließen, dass sich bedingt durch den Klimawandel die Gefährdungslage verändert. Dies betrifft insbesondere die Gefährdung durch Überflutungen aus kleinen und mittleren Einzugsgebieten, da diese durch lokale Starkregenereignisse geprägt sind. Es gibt Indizien dahingehend, dass (lokale) Starkregenereignisse zukünftig zunehmen werden.

Entwicklungen der letzten Jahre, vor allem in den USA und in Frankreich, zeigen, dass auch im Bereich von Gefährdungen durch anlagenexterne Überflutungsereignisse probabilistische Standortgefährdungsanalysen durchzuführen sind. Vor allem in den USA werden dazu, nicht nur in Bezug auf die Sicherheit kerntechnischer Einrichtungen, umfangreiche Anstrengungen unternommen. Dabei ergaben sich zum Teil überraschende Ergebnisse, wie z. B. extreme Flutereignisse aus paläontologischen Untersuchungen zu Überflutungen. Daraus abgeleitet werden beispielsweise Untersuchungen zu den Gefährdungskurven für große Dämme.

Das Gesamtziel des geplanten Forschungs- und Entwicklungsvorhabens besteht daher in der Bereitstellung von Methoden und Werkzeugen für Sicherheitsbewertungen eines gesamten Kernkraftwerksstandorts nach Stand von Wissenschaft und Technik für die bisher nicht vertieft untersuchte übergreifende Einwirkung von außen *Überflutungen aus kleinen und mittleren Einzugsgebieten*. Dies zielt darauf ab, bestehende Wissenslücken zu schließen und anderweitig etablierte Verfahren auf die bisher im Hinblick auf die sicherheitstechnische Relevanz nur unzureichend untersuchte, übergreifende Einwirkung von außen *Überflutung aus kleinen und mittleren Einzugsgebieten* zu übertragen.

Insgesamt dienen die Arbeiten dazu, die Kenntnisse der Fachleute im Hinblick auf die Durchführung von Standortgefährdungsanalysen zu erhöhen, die Aussagefähigkeit zu naturbedingten Einwirkungen von außen zu verbessern und zusätzliche Kompetenzen zur Bewertung von internationalen Vorgehensweisen aufzubauen.

1.2 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele

Bezüglich probabilistischer Standortgefährdungsanalysen bestehen bei der GRS bisher nur Erfahrungen im Hinblick auf die Bewertung probabilistischer seismischer Gefährdungsanalysen (PSGA). International wird vor allem seitens der U.S. NRC zunehmend die Durchführung probabilistischer Gefährdungsanalysen für Hochwasserereignisse (PHGA) forciert. Das Ziel der geplanten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten besteht deshalb darin, einen methodischen Ansatz für die Durchführung einer PHGA entspre-

chend dem Stand von Wissenschaft und Technik zu entwickeln und zu erproben. Eine solche Analyse kann als Grundlage zur Bewertung der Anlagenrobustheit oder als Eingangsuntersuchung für eine PSA für übergreifende Einwirkungen verwendet werden.

In diesem Vorhaben wurden daher die Grundlagen zur Entwicklung von probabilistischen Hochwassergefährdungsanalysen geschaffen bzw. verbessert. Die Gesamtarbeiten gliedern sich in mehrere Projektphasen, wobei in der ersten Projektphase (Phase I) nur Hochwasser aus kleinen Einzugsgebieten untersucht werden und in einer späteren zweiten Projektphase (Phase II) solche aus mittleren Einzugsgebieten.

Zunächst wurde in einer ersten Projektphase (Phase I) ein kleines Einzugsgebiet betrachtet und dafür mehrere Methoden zur Ableitung von Hochwasserereignissen aus Niederschlägen methodisch untersucht und angewendet. Hintergrund ist, dass in kleinen Einzugsgebieten (im Gegensatz zu mittleren und großen Einzugsgebieten) zumeist keine Pegelmessungen vorliegen oder diese nur sehr kurze Zeiträume umfassen, so dass eine statistische Extremwertanalyse von Pegeldaten nicht oder nur mit sehr großen Unsicherheiten durchgeführt werden kann.

Letztlich dienen die geplanten Arbeiten dazu, den Kenntnisstand hinsichtlich der Durchführung probabilistischer Standortgefährdungsanalysen zu erhöhen und die Fachleute damit in die Lage zu versetzen, solche Analysen auch in Bezug auf Überflutungen aus kleinen Einzugsgebieten durchzuführen und damit die Gefährdung eines zu betrachtenden Standorts besser bewerten zu können. Sie stellen darüber hinaus die Grundlage für eine spätere Ausweitung der Methodik (Phase II) auf die probabilistische Gefährdungsanalyse von Hochwassersereignissen aus mittleren Einzugsgebieten dar.

1.3 Durchgeführte Arbeiten

Bei den durchgeführten Arbeiten wurde mit der Analyse für ein kleines Einzugsgebiet begonnen. Kleine Einzugsgebiete sind vor allem dadurch gekennzeichnet, dass für eine Standortgefährdungsanalyse meist keine Pegelmessdaten für die am Standort vorhandenen Fließgewässer vorliegen, da es an den betreffenden Gewässern üblicherweise keine Pegelmessungen gibt. Zur Analyse müssen daher Methoden zum Einsatz kommen, die aus Niederschlägen den resultierenden Abfluss ermitteln (als Niederschlags-Abfluss-Beziehungen bezeichnet). Alle Niederschlags-Abfluss-Beziehungen erfordern die Ermittlung der anzusetzenden Niederschläge und – in mehr oder weniger großem Umfang – die Erfassung der Eigenschaften des Einzugsgebiets, u. a. Bewuchs, Hang-

neigungen, Bebauungen, etc. Aus den erfassten Eigenschaften des Einzugsgebiets werden dann die wesentlichen Modellparameter abgeleitet.

Bei Niederschlags-Abfluss-Beziehungen handelt es sich im Wesentlichen um deterministische Verfahren, deren Ergebnis vom angesetzten Niederschlag und den gewählten Modellparametern abhängt. Einer probabilistischen Analyse zugänglich gemacht werden diese Beziehungen durch statistische Variationen der Niederschläge und Annahmen über die statistischen Verteilungen der Modellparameter. Im Ergebnis können so probabilistische Gefährdungskurven einschließlich deren Unsicherheitsbandbreiten abgeleitet werden.

Der Fokus der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten lag auf der Erprobung von Methoden zur Erstellung einer derartigen probabilistischen Standortgefährdungsanalyse, um grundlegende Mechanismen einer solchen Analyse zu verstehen. Ziel war es, alle Schritte einer solchen Analyse in mehreren Varianten durchzuführen, um wesentliche Quellen der Unsicherheit zu identifizieren und deren Einfluss auf das Gesamtergebnis bewerten zu können. Zur Reduzierung des Modellierungsaufwandes kamen in der Phase I der Untersuchungen jeweils zwei Methoden zur Bestimmung der anzusetzenden Niederschläge und zwei einfache Niederschlags-Abfluss-Beziehungen zum Einsatz, so dass sich die probabilistische Standortgefährdungsanalyse in vier wesentliche Bestandteile untergliedert.

2 Stand der Wissenschaft und Technik: bisherige Arbeiten

In den vergangenen Jahrzehnten wurden zahlreiche Gefährdungsanalysen, nicht nur in Bezug auf die Sicherheit nuklearer Einrichtungen/Anlagen, mit Bezug auf niederschlagsbedingte Hochwasserereignisse durchgeführt. Hierbei kommen hauptsächlich Verfahren der Extremwertstatistik zum Einsatz, um beobachteten Pegelständen und damit Hochwasserereignissen entsprechende Überschreitenswahrscheinlichkeiten zuzuordnen und daraus auf extreme Hochwasserereignisse geringer Eintrittswahrscheinlichkeit schließen zu können. Ein weiterer möglicher Ansatz, der vor allem in den USA von der U.S. NRC und anderen Behörden genutzt wird, ist der Ansatz eines abdeckenden Niederschlagsereignisses im Einzugsgebiet und der Ableitung daraus resultierender Pegelstände im Gewässer.

In den meisten Fällen wird bei der Verwendung von Verfahren der Extremwertstatistik nur eine Verteilungsfunktion („die am besten passende“) an vorhandene Messdaten angepasst und die Extrapolation zu geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten auf dieser Basis durchgeführt. In den vergangenen Jahren wurden – vor allem in den USA durch die U.S. NRC und andere Behörden, wie der USGS (*United States Geological Survey*) – erhebliche Anstrengungen unternommen, um die Methoden der probabilistischen seismischen Gefährdungsanalyse auch auf eine Überflutungsgefährdungsanalyse zu übertragen und somit nicht nur Werte mittels eines Modells, sondern vieler Modelle abzuleiten und dabei nicht nur aleatorische sondern auch epistemische Unsicherheiten zu quantifizieren.

Zum Thema probabilistischer Gefährdungsanalysen für Hochwasserereignisse (PHGA) führt die U.S. NRC regelmäßig Workshops durch, die sowohl die Entwicklungen im nuklearen als auch im nicht-nuklearen Sektor in Bezug auf PHGA abbilden /NRC 19/. Unter anderem wird ein Vorgehen analog zur probabilistischen seismischen Gefährdungsanalyse entwickelt, das ein dreistufiges Verfahren vorsieht. Dieses dreistufige Verfahren „Structured Hazard Assessment Committee für Flooding“ (SHAC-F) ist ein Verfahren mit begleitendem Peer Review, das von Stufe zu Stufe komplexere Abläufe und Teams umfasst. Gemeinsames Merkmal aller Stufen ist, dass zur Analyse der Hochwassergefährdung die aleatorischen und epistemischen Unsicherheiten erfasst und ausgewiesen werden. Dies bedeutet, dass zur Analyse nicht nur ein Modell zur Ermittlung der Hochwassergefährdung zum Einsatz kommt, sondern mehrere und dass für alle diese Modelle die aleatorischen Unsicherheiten erfasst werden. Die zunehmende Komplexität der Studien von Stufe zu Stufe ergibt sich vor allem aus der Erweiterung der Datenbasis bei den Untersuchungen /PRA 19/.

Die GRS hat über viele Jahre in erheblichem Umfang methodische Ansätze zur deterministischen wie probabilistischen Bewertung übergreifender Einwirkungen von außen entwickelt oder systematisch erweitert und erprobt. In der jüngeren Vergangenheit sind vertiefte Arbeiten zur Berücksichtigung insbesondere der naturbedingten Einwirkungen Erdbeben, Hochwasser und Überflutungen aus großen Einzugsgebieten, Starkwind (einschließlich Tornado), Starkregen, hohe und tiefe Umgebungstemperaturen etc. (siehe u. a. /SPE 13/, /ROE 17/, /CAM 18/, /ROE 18/, /UTS 19/) durchgeführt worden. Dabei wurde jedoch u. a. die hier zu untersuchende Einwirkung noch nicht näher untersucht.

Im Hinblick auf Standortgefährdungsanalysen zu Überflutungen aus kleinen und mittleren Einzugsgebieten wurden seitens der GRS bislang noch keine Arbeiten ausgeführt. Im BMWi-Vorhaben RS1539 wurde im Rahmen der Weiterentwicklung von PSA für hydrologische Einwirkungen /ROE 17/ die Thematik von Sturzfluten aus kleinen Einzugsgebieten erstmalig betrachtet. Es wurde dabei jedoch keine Standortgefährdungsanalyse im eigentlichen Sinn durchgeführt, sondern nur eine auf Abschätzungen basierende Grobanalyse. Insbesondere wurde keine probabilistische Standortgefährdungsanalyse unter der Einbeziehung verschiedener Modellansätze und der Berücksichtigung der Unsicherheiten der Analysen durchgeführt und auch keine Gefährdungskurven generiert. Hier besteht demzufolge noch ein entsprechender Entwicklungsbedarf. Die GRS hat sich jedoch, u. a. im Rahmen der BMU-Forschungsvorhaben 3613R01368 /CAM 18/ und 3609R01350 /SPE 13/ ausführlich mit Hochwassergefährdungsanalysen für große Einzugsgebiete befasst. Somit konnte auf bereits bestehende Erfahrungen zurückgegriffen werden.

3 Einzugsgebiet

3.1 Auswahl des Einzugsgebiets

Da es sich bei den durchgeführten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten um eine Methodenuntersuchung und nicht um die Untersuchung eines Standortes mit einer kerntechnischen Anlage handelt, bestand der erste Schritt der Arbeiten in einer Auswahl eines geeigneten Einzugsgebiets, um generisch möglichst typische Eigenschaften von kleinen Einzugsgebieten zu erfassen. Dabei waren verschiedenen Kriterien, wie Geländeprofil, Besiedlung und sonstige Landnutzung, die Untergliederung in kleinere Einheiten ebenso wie die Erreichbarkeit für Begehungen, abzuwägen.

Zur Entstehung von sich dynamisch entwickelnden Hochwasserereignissen (sturzflutartigen Ereignissen) ist eine gewisse Mindestneigung des Geländes erforderlich. Das zu wählende Einzugsgebiet liegt dementsprechend in einem hügeligen bis bergigen Gelände und damit im Mittelgebirgsraum. Da typische Standorte für kerntechnische Anlagen in Deutschland nicht im städtischen Raum liegen, sondern zumindest in weniger dicht besiedelten Gebieten, ist davon auszugehen, dass umliegend Land- und Forstwirtschaft betrieben wird und sich in der näheren Umgebung eher kleinere Ortschaften befinden. Nicht zuletzt war auf Grund der Erreichbarkeit für Geländebegehungen des Einzugsgebiets und den Bedingungen zu Projektbeginn (Sars-CoV 2-Pandemie) ein Standort zu wählen, der für die Durchführung der entsprechenden Arbeiten gut zu erreichen war.

Die Wahl fiel auf ein Einzugsgebiet am nördlichen Rand des Westerwaldes, südlich der Sieg mit einer Einzugsgebietsfläche von etwa 16,6 km² in mäßig bis stark profiliertem Gelände mit Wald- und Feldanteilen und mehreren kleinen Siedlungsflächen. Der Höhenunterschied vom höchsten zum niedrigsten Punkt des betrachteten Einzugsgebiets beträgt etwa 230 m, die längste Fließstrecke ist etwa 7,4 km lang. Das Einzugsgebiet lässt sich in drei Teile (sogenannte Teileinzugsgebiete, TEG) mit etwa 2,2 km², 3,5 km² bzw. 10,9 km² Fläche untergliedern. Einen ersten Überblick über das Einzugsgebiet und seine ungefähre Begrenzung gibt Abb. 3.1. Dabei sind Besiedlungsflächen und land- und forstwirtschaftlich genutzte Flächen klar zu unterscheiden.

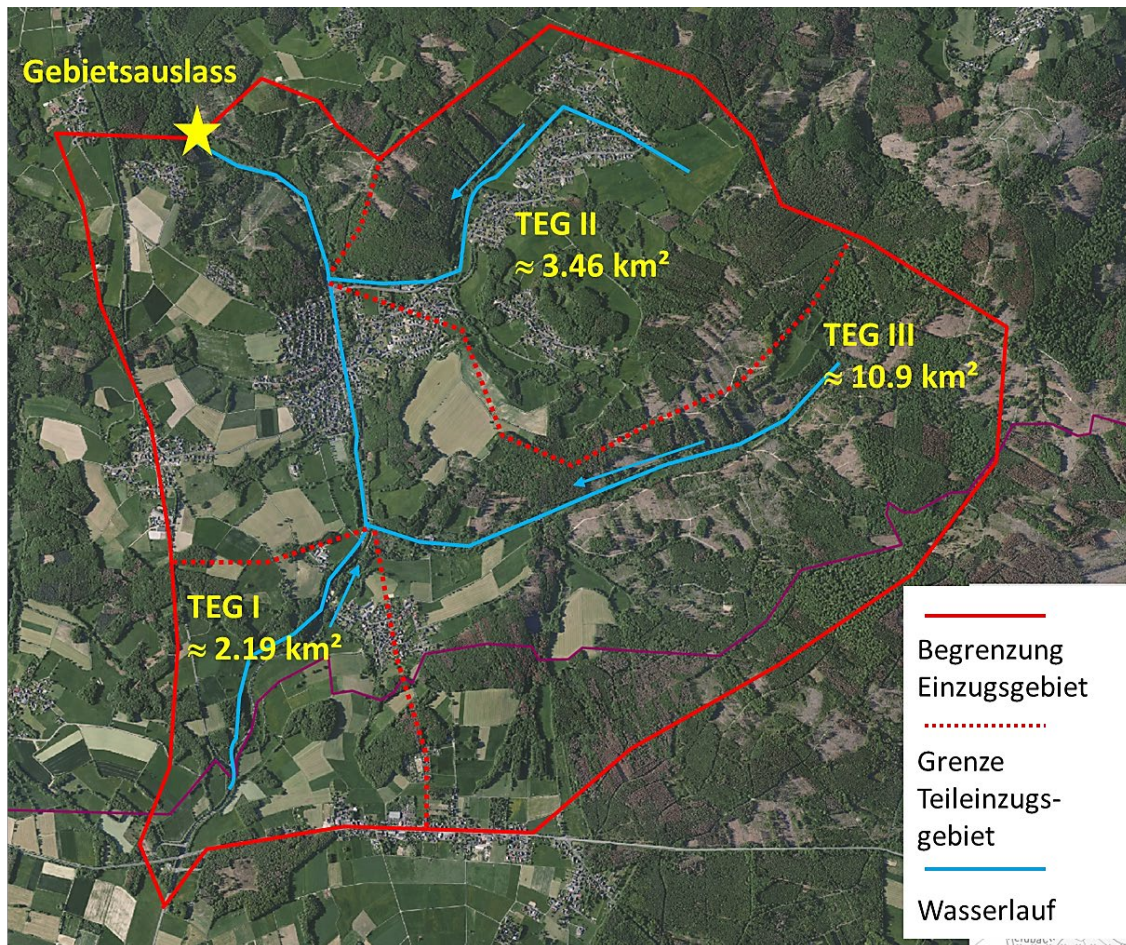


Abb. 3.1 Übersicht über das betrachtete Einzugsgebiet, Unterteilung in Teileinzugsgebiete (TEG) und wesentliche Wasserläufe (digitales Orthophoto aus Geportal.NRW /NRW 20/)

3.2 Erfassung des Einzugsgebiets

Das Einzugsgebiet liegt an der Grenze zwischen den Bundesländern Rheinland-Pfalz (RLP) und Nordrhein-Westfalen (NRW). Die Umrisse des Einzugsgebiets wurden gemäß amtlicher topographischer Karte des Landes Nordrhein-Westfalen /NRW 20/ bzw. amtlicher topographischer Karte des Landes Rheinland-Pfalz /RLP 20/ erfasst. Zudem wurde das Einzugsgebiet und seine Grenzen umfangreich begangen, um unklare Gegebenheiten zu klären.

Aus dem Luftbild und den Begehungen lässt sich erschließen, dass weite Teile des ursprünglichen Waldbestandes (vornehmlich Fichten) durch die Dürre 2018 und die anschließenden trockenen Jahre abgestorben waren und gefällt wurden. Große Teile die-

ser Flächen werden nicht gezielt wieder bepflanzt, sondern sich selbst überlassen, so dass spätestens zwei Jahre nach Fällung ein durchgehender Bewuchs bestand.

Wichtig zur Beurteilung des Abflussverhaltens des Einzugsgebiets sind neben dem Bewuchs und der Bebauung des Einzugsgebiets zudem Hangneigungen (die im Rahmen des Vorhabens nur implizit erfasst wurden) und Versickerungseigenschaften der Böden. Die Böden des Einzugsgebietes sind überwiegend durch eher dünne Humusschichten auf teils sandigen bis lehmigen Unterböden charakterisiert. Das unterliegende Gestein ist vornehmlich Devonschiefer, vereinzelt treten vulkanische Basalte auf /NRW 20/. Die Versickerungseigenschaften der Böden werden daher als mäßig betrachtet.

Für die in NRW liegenden Teile der Einzugsgebiete wurde die Flächennutzung und ihre relativen Anteile auf Grund der Daten des amtlichen Liegenschaftskatasters ALKIS /NRW 20/ erfasst. Für RLP liegen diese Daten nicht öffentlich zugänglich vor, daher wurden die verbleibenden Restflächen auf Grund von Luftbildern und Flächenmesstools erfasst. Da sich die Abflusskennwerte für Flächen mit Bewuchs nicht allzu drastisch unterscheiden, sind die dabei entstehenden Fehler als eher klein einzuschätzen. Dies trifft umso mehr zu, da die Ergebnisse gut vergleichbar waren mit den Ergebnissen aus der präzisen Erfassung der Teile des Einzugsgebiets in NRW. Da sich der Bewuchs im Jahresverlauf und durch die Landnutzung laufend verändert, sind die Unsicherheiten durch die angenommenen Bandbreiten der Abflusskennwerte abgedeckt.

4 Niederschläge

Die anzusetzenden Niederschläge für die Niederschlags-Abfluss-Beziehungen wurden in diesem Vorhaben auf zwei verschiedenen Wegen ermittelt. Einerseits wurden offizielle Rasterdaten (Kostras DWD 2010R /DWD 15/) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zu Starkniederschlägen genutzt, die 2017 aktualisiert wurden. Andererseits wurden Daten zu Tagesniederschlägen der Wetterstation Hennef Lückert mittels Extremwertstatistik analysiert und auf kürzere Zeiträume heruntergerechnet. Die Station Hennef Lückert weist nahezu ununterbrochen Daten seit 1947 auf. Davor gemessene Daten bleiben auf Grund der kriegsbedingten größeren Lücken unberücksichtigt.

4.1 Bestimmung aus dem Rasterdatensatz des DWD

Rasterdaten des DWD liegen auf einem $7 \times 7 \text{ km}^2$ großen Raster deutschlandweit vor. Die Daten umfassen Dauerstufen zwischen fünf Minuten und drei Tagen sowie Wiederkehrperioden für die Niederschläge zwischen einem und 100 Jahren. Die Unsicherheitsbandbreiten werden für die einjährige Wiederkehrperiode mit $\pm 10 \%$ und für die hundertjährige Wiederkehrperiode mit $\pm 20 \%$ angegeben /DWD 15/.

Die Daten für die unterschiedlichen Wiederkehrperioden der einzelnen Dauerstufen folgen einer Exponentialverteilung, so dass zur Extrapolation der Daten und ihrer Unsicherheiten auf Wiederkehrperioden von mehr als 100 Jahren ebenfalls eine Exponentialverteilung verwendet wurde. Die Extrapolation erfolgt mittels Gl. 4.1

$$\begin{aligned} N(T) &= u + w * \ln(T) \\ u &= N(1) \\ w &= \frac{N(100) - N(1)}{\ln(100)} \end{aligned} \tag{4.1}$$

Dabei ist $N(T)$ der Niederschlag einer bestimmten Dauerstufe für eine Wiederkehrperiode T , u der Niederschlag für eine Wiederkehrperiode von einem Jahr und w die Steigung in der logarithmischen Darstellung, die sich unter Verwendung der Niederschlagswerte für hundertjährige und einjährige Niederschläge ergibt. Analog werden die unteren und oberen Grenzen der Unsicherheitsbandbreiten der jeweiligen Dauerstufen unter Verwendung der oben angegebenen Fehlerbandbreiten für den einjährigen bzw. hundertjährigen Niederschlag bestimmt (siehe Abb. 4.1). Wiederkehrperioden von mehr als

100 Jahren liegen im Extrapolationsbereich. Für eine Simulation eines Niederschlags-Zeit-Verlaufs (vgl. Kap. 4.4) für eine bestimmte Wiederkehrperiode wird aus der Unsicherheitsbandbreite (Zufallsauswahlbereich) zwischen oberer und unterer Grenze ein Wert zufällig ausgewählt (roter Stern).

Da der DWD keine Aussagen darüber trifft, welcher Verteilung die Unsicherheiten unterliegen, wird im Folgenden von einer Gleichverteilung zwischen der unteren und der oberen Grenze ausgegangen.

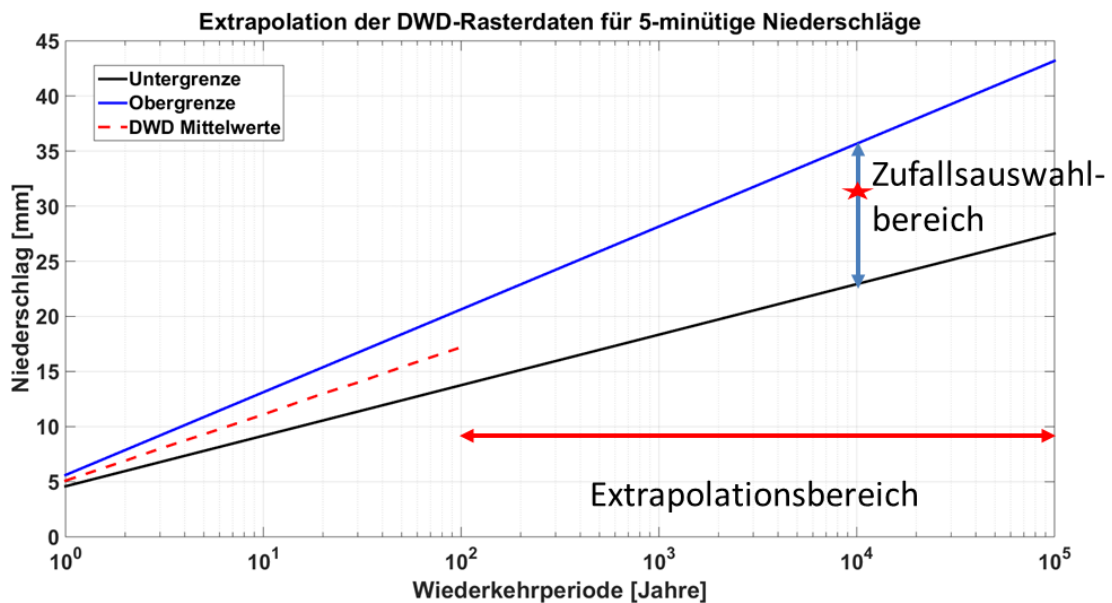


Abb. 4.1 Beispielhafte Darstellung der Extrapolation der oberen und unteren Grenze der DWD-Rasterdaten für fünfminütige Niederschläge

Die Wahl der Verteilungsfunktion innerhalb der Unsicherheitsbandbreite hat einen wesentlichen Einfluss auf die Simulationsergebnisse, da tendenziell große (kleine) Niederschlagswerte zu großen (kleinen) Hochwassern führen. Die Wahl einer Gleichverteilung beeinflusst so unmittelbar die Simulationsergebnisse im Vergleich mit anderen möglichen Verteilungsfunktionen und damit die Unsicherheitsbandbreite. Ohne vertiefte Untersuchungen und genauere Kenntnis der Datensatzermittlung des DWD lassen sich darüber jedoch keine Aussagen treffen. Daten zu Unter- und Obergrenzen für unterschiedliche Zeitdauerstufen und Wiederkehrperioden sind im Anhang (Kap. A.2) aufgeführt.

4.2 Bestimmung aus Tagesniederschlägen

Eine Bestimmung aus Tagesniederschlägen einer Wetterstation kann in einem Verfahren mit zwei Schritten erfolgen. Zunächst werden Jahresextremwerte des Tagesniederschlags bestimmt und mittels des in /BRI 09/ beschriebenen Verfahrens zu großen Wiederkehrperioden extrapoliert. Dabei wird eine Gumbelverteilung verwendet. Das Vorgehen ist in /CAM 18/ näher beschrieben.

Van den Brink und Können /BRI 09/ argumentieren auf Grundlage theoretischer Untersuchungen /WIL 05/, die durch Datensatzuntersuchungen validiert wurden, dass die Jahresmaxima von $u = R^{2/3}$ (Erläuterung siehe unten) exponentialverteilt sein müssen, mit rascher Konvergenz gegen eine Gumbelverteilung. Auf dieser Grundlage weisen van den Brink und Können durch empirische Untersuchungen an Zeitreihen nach, dass zumindest für Europa die theoretischen Ergebnisse von Wilson und Toumi /WIL 05/ zutreffen und die Gumbelverteilung gute Ergebnisse bis zu Wiederkehrperioden von etwa 50.000 Jahren liefert.

Ausgehend von van den Brink und Können /BRI 09/ wird zuerst aus der in aufsteigender Reihenfolge sortierten Zufallsvariable der Jahresmaxima R der Tagesniederschläge eine Zufallsvariable u ermittelt

$$u = R^{2/3} \tag{4.2}$$

Diese Zufallsvariable u ist ebenfalls in aufsteigender Reihenfolge geordnet und gemäß der Argumentation von van den Brink und Können Gumbel-verteilt.

Aus der Zufallsvariable u wird die normierte Zufallsvariable G

$$G = \frac{u - \bar{u}}{s_u} \tag{4.3}$$

abgeleitet, wobei \bar{u} den arithmetischen Mittelwert der Variable u bezeichnet und s_u die Standardabweichung der Zufallsvariable u .

Nach van den Brink und Können ist \underline{u} Gumbel-verteilt und damit ist auch die normierte Zufallsvariable G Gumbel-verteilt. Somit kann die Zufallsvariable G durch eine Gumbel-Verteilung

$$F(G) = \exp\left(-e^{-\frac{1}{\beta}(G-\mu)}\right) \quad (4.4)$$

beschrieben werden, wobei $\beta > 0$ der Skalierungsparameter und μ der Lageparameter der Gumbelverteilung ist. Die so extrapolierten Werte können durch Rücktransformation wieder in Tagesniederschläge mit bestimmten Wiederkehrperioden umgerechnet werden.

Im zweiten Schritt werden die Tagesniederschläge mittels der Ergebnisse von /MON 16/ auf kürzere Zeitdauern heruntergerechnet. Dieses Verfahren macht sich die verschachtelte Struktur von Starkniederschlägen zu Nutze. Verschachtelte Struktur heißt in diesem Kontext, dass z. B. innerhalb eines Regenereignisses das 30-Minuten-Intervall mit maximalem Niederschlag auch jeweils 15-, 10- und 5-Minuten-Intervalle mit den maximalen Niederschlägen enthält. Unter diesen Annahmen, die experimentell gut abgesichert sind, lassen sich Niederschlagsintensitäten für unterschiedliche Dauerstufen gemäß Gleichung 4.5 ineinander umrechnen

$$I(t) = I(t_0) \left(\frac{t_0}{t}\right)^n \quad (4.5)$$

Dabei ist $I(t)$ die Niederschlagsintensität für eine Dauerstufe t (z. B. 30 Minuten), $I(t_0)$ die Niederschlagsintensität der Referenzdauerstufe t_0 (in diesem Bericht 1 Tag = 1.440 Minuten) und n der Exponent des zugrunde liegenden Potenzgesetzes. Für Europa liegt der Wert von n etwa bei 0,55 mit einer Unsicherheitsbandbreite von 0,45 bis 0,65.

Da sowohl die Bestimmung der Tagesniederschläge als auch die rechnerische Bestimmung der Niederschläge kürzerer Zeitdauer mit Unsicherheiten verknüpft sind, wird die Unsicherheit innerhalb der Rechenkette mit Hilfe der Bootstrapping-Methode für die Extrapolation der Tagesniederschläge und einer Monte-Carlo-Methode bei der Bestimmung der Niederschläge kürzerer Zeitdauer aus den extrapolierten Tagesniederschlagswerten bestimmt. Dazu wird angenommen, dass der Exponent n des Potenzgesetzes (siehe Gl. 4.5) einer Dreiecksverteilung unterliegt. Durch 5.000-malige Wiederholung

wird damit eine empirische Verteilung der Niederschläge innerhalb der Unsicherheitsbandbreite der Niederschläge einer bestimmten Zeitdauer und einer bestimmten Wiederkehrperiode ermittelt (siehe Abb. 4.2).

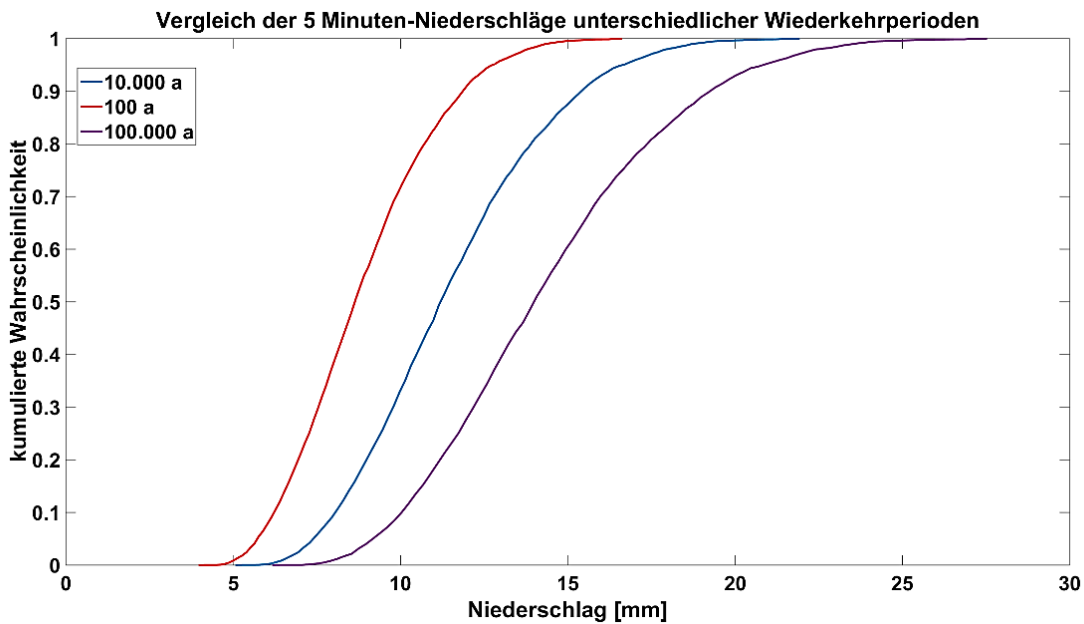


Abb. 4.2 Beispielhafte Darstellung der Ergebnisse aus 5.000-facher Simulation der 5-Minuten-Niederschläge für Wiederkehrperioden 100, 10.000 und 100.000 Jahre

4.3 Vergleich der Werte beider Extrapolationsmethoden

Da bei der Extrapolation des DWD-Rasterdatensatzes (N_{DWD}) Unter- bzw. Obergrenze ermittelt wurden, werden diese mit den Minimal- bzw. Maximalwerten der Ermittlung aus Tagesniederschlagsextrapolationen ($N_{Tagesniederschläge}$) verglichen.

Ein erster Vergleich zeigt auf, dass die Niederschlagswerte, die sich aus der Extrapolation von Tagesniederschlagswerten ergeben, fast durchgängig kleiner sind als die Niederschlagswerte, die sich aus der Extrapolation des DWD-Rasterdatensatzes ergeben (siehe Abb. 4.3 und Abb. 4.4). Die Abweichungen sind vor allem im Bereich großer Wiederkehrperioden und bei Zeitdauerstufen von 45 bis 240 Minuten deutlich ausgeprägt.

Die Werte für Unter- und Obergrenze der Extrapolation aus DWD-Rasterdaten bzw. für Minimal und Maximalwert der aus der Extrapolation von Tagesniederschlägen abgeleiteten Niederschläge sind im Anhang Kap A.2 tabelliert.

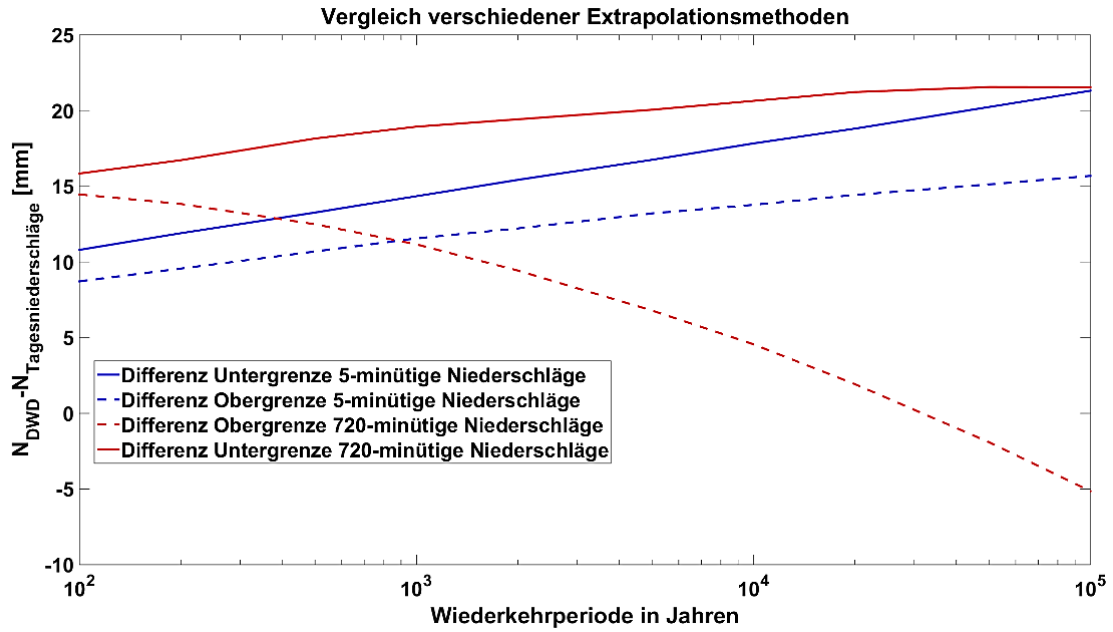


Abb. 4.3 Darstellung der Differenzen von Unter- bzw. Obergrenze der Extrapolation aus DWD-Rasterdatensatz mit den Minimal- bzw. Maximalwerten der Ermittlung aus Tagesniederschlagsextrapolationen für fünfminütige bzw. 720-minütige Zeitdauerstufe

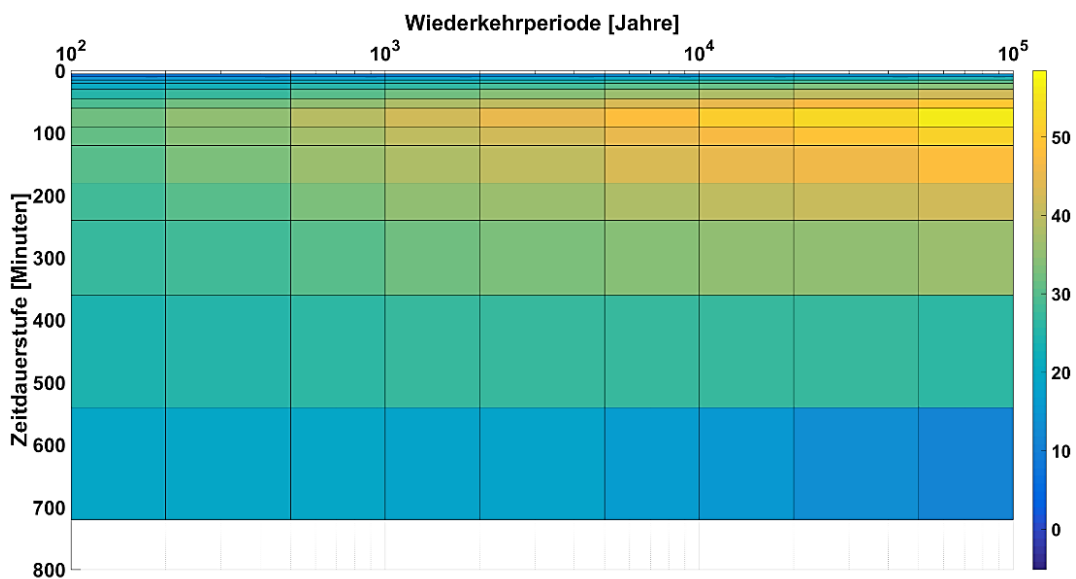


Abb. 4.4 Vergleich Obergrenze mit dem Maximalwert für verschiedene Zeitdauerstufen und Wiederkehrperioden

4.4 Niederschlags-Zeit-Verlauf

Zur Nutzung der Niederschlags-Abfluss-Beziehungen und vor allem zur Erzeugung der Abfluss-Zeit-Verläufe der Hochwasserereignisse (Hydrographen) werden die Niederschlags-Zeit-Verläufe (Hyetographen) für die zugrunde liegenden Niederschlagsereignisse benötigt. Um diese synthetischen Niederschlagsereignisse in ihrem Zeitverlauf realitätsnah zu simulieren, wurde erneut auf die verschachtelte Struktur der Niederschlagsereignisse zurückgegriffen. Dabei wurde davon ausgegangen, dass der 5-Minuten-Zeitraum mit dem maximalen 5-Minuten-Niederschlag im 10-Minuten-Zeitraum mit dem maximalen 10-Minuten-Niederschlag liegt und dieser wiederum im 15-Minuten-Zeitraum mit dem maximalen 15-Minuten-Niederschlag und so weiter.

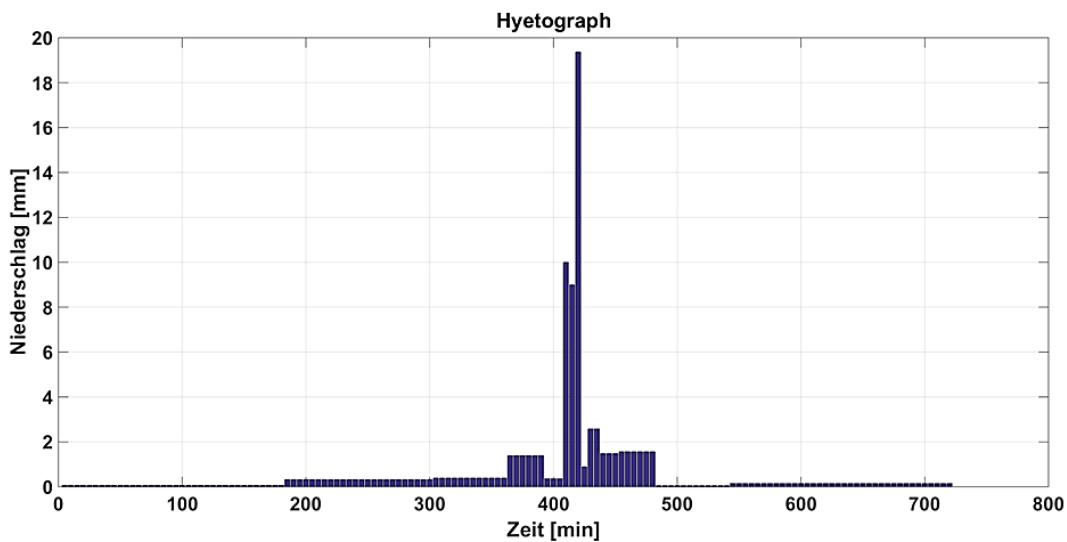


Abb. 4.5 Beispielhafte Darstellung eines mittenbetonten synthetischen Niederschlags-Zeit-Verlaufs mit einer Niederschlagsdauer von 12 Stunden (720 Minuten)

Zur Erzeugung eines Niederschlags-Zeit-Verlaufs einer bestimmten Wiederkehrperiode werden in aufsteigender Reihenfolge beginnend für den 5-Minuten-Zeitraum zufällig Niederschlagswerte aus den jeweiligen Unsicherheitsbandbreiten (vgl. Kap. 4.1 und 4.2) der entsprechenden x-Minuten-Zeiträume ausgewählt. Dabei ist zu beachten, dass der ausgewählte Niederschlagswert nicht unter dem zuvor ausgewählten Wert des kürzeren Zeitraums liegen kann (keine negativen Niederschläge). Der gesamte Niederschlags-Zeit-Verlauf wird auf diese Weise in 5-Minuten-Intervalle unterteilt. Um die natürliche Variabilität der Niederschläge anzunähern, werden für jede simulierte Wiederkehrperiode acht verschiedene Niederschlagszeitdauern zwischen 60 Minuten und 12 Stunden (60, 90, 120, 180, 240, 360, 540 und 720 Minuten) für Niederschlagsereignisse und

zudem für jede Niederschlagszeitdauer drei unterschiedliche Profile – anfangs-, mitten- und endbetont – simuliert. Diese unterscheiden sich in der Annahme zum Zeitpunkt des Auftretens der stärksten Niederschläge (zu Anfang des Niederschlagsereignisses, in der Mitte oder am Ende, vgl. Abb. 4.5).

5 Niederschlags-Abfluss-Beziehungen und Annahmen

Niederschlags-Abfluss-Beziehungen berechnen aus Niederschlags-Zeit-Verläufen (Hyetographen) Spitzenabflüsse und Abfluss-Zeit-Verläufe (Hydrographen). Es gibt Niederschlags-Abfluss-Beziehungen, wie die hier verwendete „Rational Method“ (vgl. Kap. 5.3), die aus maximalen Niederschlagsintensitäten (Niederschlagshöhe pro Zeiteinheit) Spitzenabflüsse ermitteln und Beziehungen, wie die hier verwendete „Curve Number Method“ (siehe Kap. 5.2), die aus Niederschlagsvolumina zum Abfluss kommende Volumina bestimmen.

Beide Möglichkeiten erfordern jedoch für eine Analyse etwas komplexerer Einzugsgebiete (mehr als ein Teileinzugsgebiet) geeignete Methoden, um den zeitlichen Verlauf zu erfassen und aus dem zeitlichen Verlauf dann die resultierenden Spitzenabflüsse zu ermitteln.

Zudem sind beide Wege auf zusätzliche Informationen angewiesen, um aus Niederschlags-Zeit-Verläufen Abfluss-Zeit-Verläufe zu machen. Bei beiden Wegen ist die Kenntnis der sogenannten „Time of Concentration“ erforderlich, so dass der Bestimmung ein eigenes Kapitel (Kap. 5.1) gewidmet ist. Weitere Informationen, die auf beiden Wegen benötigt werden, sind die Informationen zu Landnutzung, Bewuchs etc. und zu Bodeneigenschaften. Die Umsetzung dieser Informationen in Simulationsparameter unterscheidet sich jedoch zwischen den beiden Wegen, so dass die Beschreibung dieser Umsetzung in den jeweiligen Kapiteln (Kap. 5.2 und Kap. 5.3) erfolgt.

5.1 Time of Concentration

Die Bestimmung der „Time of Concentration“ ist zur Umsetzung sowohl der „Rational Method“, als auch der „Curve Number Method“ erforderlich. Die Bestimmung unterscheidet sich dabei nicht.

Die „Time of Concentration“ wird dabei als die Zeitspanne verstanden, die Niederschlagswasser vom hydrologisch am weitesten entfernten Punkt des (Teil-)Einzugsgebiets bis zum Gebietsauslass (dem Untersuchungspunkt) benötigt /USD 10/. Dahinter steckt das simple Konzept, dass dann das komplette (Teil-)Einzugsgebiet zur Hochwassergenese beiträgt und damit das maximal mögliche Hochwasser erreicht wird.

Zur Bestimmung der Time of Concentration existieren unterschiedliche Formeln, die auf bestimmten Eigenschaften des Einzugsgebietes wie der Länge des längsten Wasserlaufweges, dem durchschnittlichen Gefälle, der Einzugsgebietsgröße und -form etc. beruhen. Es sind zumeist empirische Formeln, die die verschiedenen berücksichtigten Größen miteinander verknüpfen. Als Beispiel mag hier die Formel von Kirpich /USD 10/ dienen

$$T_c = 0,007l^{0.77}S^{-0.385} \quad (5.1)$$

Dabei ist T_c die Time of Concentration in Minuten, l die Länge des Bachlaufs von der Quelle bis zum (Teil-)Gebietsauslass in Fuß und S die Steigung des längsten Kanals in Fuß/Fuß. Der Vorfaktor 0,007 wird heute überwiegend eher als 0,0078 angesetzt (vgl. /CWS 22/) und im vorliegenden Bericht verwendet.

Empirische Formeln haben den Vorteil, dass sie zumeist einfach anzuwenden sind und ohne großen Rechenaufwand Ergebnisse liefern. Gleichzeitig wurden die Formeln allerdings für spezifische Bedingungen abgeleitet. Eine Übertragung auf andere Gebiete und Bedingungen ist nur eingeschränkt möglich. Untersuchungen zeigen zudem, dass die Time of Concentration auch für ein festes Einzugsgebiet größeren Schwankungen unterliegen kann, d. h. die gemessene Time of Concentration variiert von Regenfallereignis zu Regenfallereignis. Wobei auch hier bei Nutzungen von Messdaten von idealisierten Annahmen ausgegangen wird.

Unter diesen Voraussetzungen erscheint es sinnvoll, eine Bandbreite von möglichen Berechnungsformeln heranzuziehen und die Bandbreite der Ergebnisse einer Bewertung zu unterwerfen, in dem Sinne, dass einzelnen Ergebnissen eine Wahrscheinlichkeit zugeordnet wird. Dies deckt dann auch die Schwankungen der gemessenen Time of Concentration mit ab.

Für die Zwecke dieses Vorhabens wurden acht empirische Formeln verwendet, die nach einer Vorauswahl als prinzipiell anwendbar bewertet wurden. In den Tabellen Tab. 5.1 bis Tab. 5.3 sind die Ergebnisse dieser Untersuchungen zur Time of Concentration für die Teileinzugsgebiete I bis III aufgeführt. Sie decken für die betrachteten Teileinzugsgebiete eine Bandbreite möglicher Ergebnisse ab. Die Formeln und die Referenzen zu diesen Formeln sind im Anhang, Abschnitt A.1 angegeben.

Tab. 5.1 Ergebnisse der Untersuchungen zur Time of Concentration für das Teileinzugsgebiet I

T _c -Formel	Kirpich	Ven Te Chow	Corps of Engineers	Mata-Lima	Temez	Yen und Chow	Williams	Haktanir und Sezen
T _c [min]	25,54	45,11	38,46	50,39	63,81	77,06	60,85	96,77
P	0,500	0,100	0,300	0,050	0,015	0,007	0,025	0,003

Tab. 5.2 Ergebnisse der Untersuchungen zur Time of Concentration für das Teileinzugsgebiet II

T _c -Formel	Kirpich	Ven Te Chow	Corps of Engineers	Mata-Lima	Temez	Yen und Chow	Williams	Haktanir und Sezen
T _c [min]	32,64	55,31	48,59	61,20	82,36	93,29	81,59	130,19
P	0,500	0,100	0,300	0,050	0,015	0,007	0,025	0,003

Tab. 5.3 Ergebnisse der Untersuchungen zur Time of Concentration für das Teileinzugsgebiet III

T _c -Formel	Kirpich	Ven Te Chow	Corps of Engineers	Mata-Lima	Temez	Yen und Chow	Williams	Haktanir und Sezen
T _c [min]	72,19	106,98	90,82	146,72	160,81	173,15	170,27	240,59
P	0,500	0,100	0,300	0,050	0,015	0,007	0,025	0,003

Die so erhaltenen Ergebnisse werden für die weiteren Untersuchungen mit Wahrscheinlichkeiten gewichtet, in dem Sinne, dass jedem Ergebnis eine Eintrittswahrscheinlichkeit zugeordnet wird und damit eine kumulierte Verteilungsfunktion konstruiert wird. Die Zuordnung der Wahrscheinlichkeiten erfolgt auf Grund von Erfahrungen und Plausibilitätsbetrachtungen mit Einzugsgebieten vergleichbarer Größen und ähnlicher Struktur. Im Ergebnis dieser Überlegungen werden den kleineren Werten für die Time of Concentra-

tion höhere Eintrittswahrscheinlichkeiten (P) zugeordnet und größeren Werten kleinere Eintrittswahrscheinlichkeiten, wie aus den Tabellen Tab. 5.1 bis Tab. 5.3 ersichtlich wird.

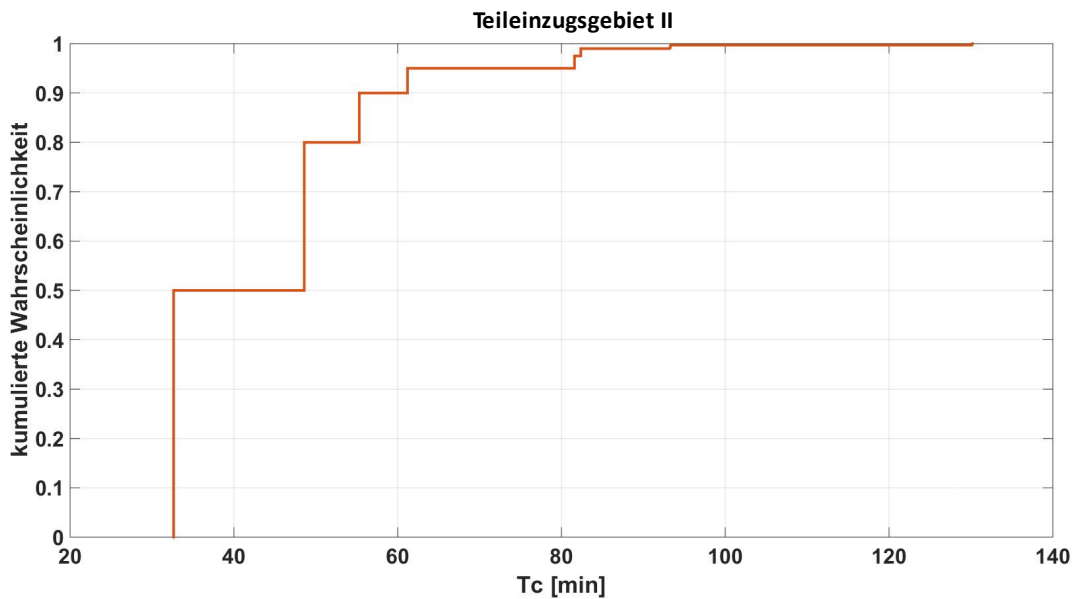


Abb. 5.1 Darstellung der kumulierten Wahrscheinlichkeitsverteilung für das Teileinzugsgebiet II, die sich aus den Überlegungen ergibt

Die Wahl der Verteilungsfunktion für die Time of Concentration ist einer der wesentlichen Einflussfaktoren auf die Simulationsergebnisse. Kleine Werte für T_c führen tendenziell zu großen Spitzenabflusswerten und umgekehrt. Bei Durchführung einer probabilistischen Standortgefährdungsanalyse muss auf diesen Einfluss geachtet werden. Angesichts des Fehlens von Pegeln an den meisten kleinen Einzugsgebieten und damit dem Fehlen von objektiven Messwerten zur Time of Concentration, sind subjektive Einschätzungen und Annahmen aber nicht zu vermeiden.

5.2 Curve Number Method und Unit Hydrograph Method

Die „Curve Number Method“ ist ein breit eingesetztes und vielfach variiertes Verfahren, um aus Niederschlägen zum Abfluss kommende Volumina zu ermitteln. In Verbindung mit der „Unit Hydrograph Method“ können Abfluss-Zeit-Verläufe (Hydrographen) ermittelt werden.

5.2.1 Curve Number Method

Die Curve Number Method wurde vom „Soil Conservation Service“¹ der Vereinigten Staaten von Amerika basierend auf empirischen Untersuchungen entwickelt. Das Verfahren beruht auf Gl. 5.2

$$N_{aw} = \begin{cases} 0 & \text{für } N \leq I_a \\ \frac{(N - I_a)^2}{N - I_a + S} & \text{für } N > I_a \end{cases} \quad (5.2)$$
$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$
$$I_a = kS$$

Dabei bezeichnet N_{aw} den Anteil des Niederschlags, der zum Abfluss kommt (in Inch), N den Niederschlag (in Inch), S den maximalen Rückhalt von Wasser durch Bodenfeuchtigkeit (in Inch), I_a den Rückhalt von Niederschlagswasser aus Infiltration in den Boden, Benetzung von Pflanzen und Bebauung (in Inch), CN ist die namensgebende Curve Number, die von Landnutzung und Bodeneigenschaften abhängt, und k ist ein Vielfaches von S , das ursprünglich zu $k = 0,2$ angenommen wurde. Neuere Untersuchungen /HAW 02/ legen ein $k = 0,05$ unter Verwendung eines modifizierten $S_{0,05}$ gemäß Gl. 5.3 nahe.

$$S_{0,05} = 1,33S_{0,2}^{1,15} \quad (5.3)$$

Dabei ist $S_{0,2} = S$ als das in Gleichung 5.2 definierte S zu verstehen.

Ein Vergleich der sich daraus ergebenden Rückhalte $I_{a0,2}$ und $I_{a0,05}$ zeigt, dass $I_{a0,05}$ durchgehend kleiner ist und damit der Rückhalt als kleiner eingeschätzt wird. Der Unterschied zu $I_{a0,2}$ beträgt bei kleiner Curve Number (< 40) etwas unter einem Faktor von 2 und wächst dann zu großen Curve Numbers (> 90) monoton auf über 3,5 (vgl. Abb. 5.2) an.

¹ Daher ist die namensgebende Curve Number auch als SCS Curve Number geläufig.

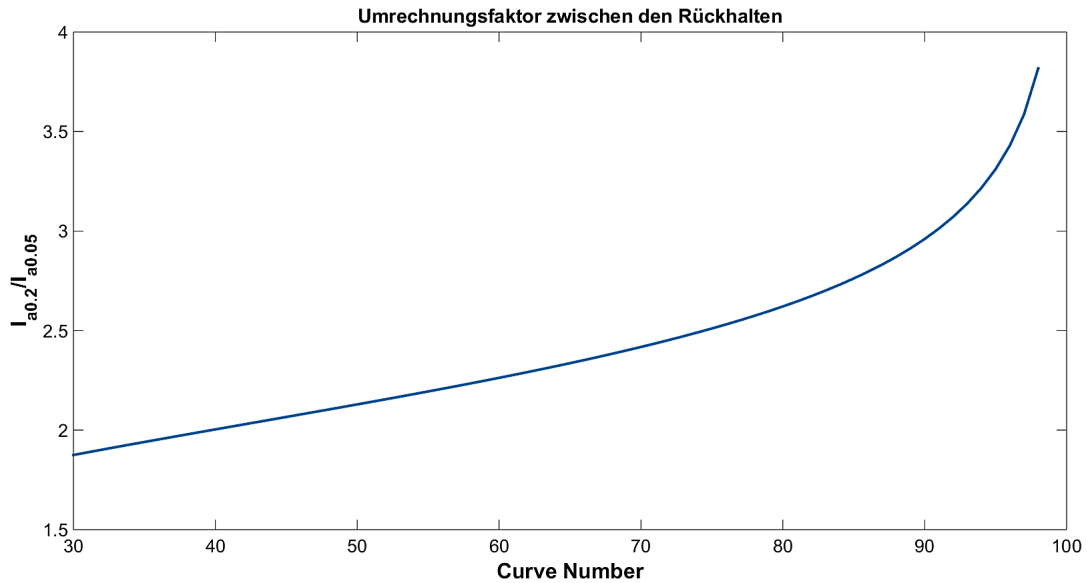


Abb. 5.2 Vergleich der sich ergebenden Rückhalte aus Gl. 4.2 bzw. 4.3

In diesem Projekt wurde der modifizierte Rückhalt gemäß Gl. 4.3 verwendet.

Das Verfahren ist auf ein Niederschlagsereignis inkrementell anzuwenden, d. h., dass im Niederschlags-Zeit-Verlauf für jeden Zeitschritt erneut das Verfahren nach Gl. 4.2 zu durchlaufen ist, wobei alle bisher erfolgten Niederschläge aufsummiert zu betrachten sind. Ein Beispiel für die Ergebnisse dieser Berechnung für ein synthetisches Niederschlagsereignis ist in Abb. 5.3 dargestellt.

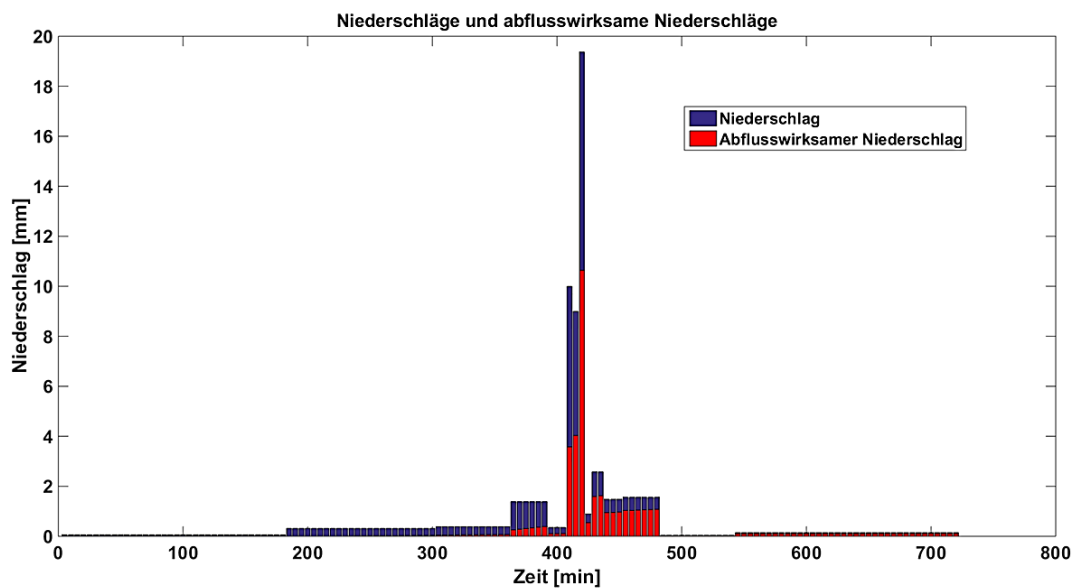


Abb. 5.3 Vergleich zwischen Niederschlagswerten und für den Abfluss wirksam werdenden Niederschlagsanteilen

Deutlich zu erkennen ist in Abb. 5.3, dass für viele Zeitschritte des Niederschlags-Zeit-Verlaufs der für den Abfluss wirksame Anteil des Niederschlags (rote Balken) nahe Null liegen. Erst bei Zeitdauern von mehr als 300 Minuten im Zeitverlauf wachsen die roten Balken an, selbst bei gleichbleibenden 5-Minuten-Niederschlägen. Dieses Anwachsen ist auf die Berücksichtigung der in den vorherigen Zeitschritten gefallenen Niederschlägen zurückzuführen, die die Rückhalte zunehmend ausschöpfen und damit höhere Anteile des gefallenen Niederschlags direkt abfließen lassen.

Zur Bestimmung der anzuwendenden Curve Number werden die Flächen in den Teileinzugsgebieten in ihren Eigenschaften, wie in Kap. 3.2 beschrieben, erfasst. Jedem erfassten Teil des Einzugsgebiets wird ein Curve Number-Intervall zugeordnet, um die Unsicherheiten bei der Bestimmung zu berücksichtigen. Dies betrifft vor allem die Unsicherheiten hinsichtlich der Bodengruppe.

Tab. 5.4 Beispieltabelle für die Bestimmung der Curve Number nach /USD 86/

Cover description			Curve numbers for hydrologic soil group			
Cover type	Treatment	Hydrologic condition	A	B	C	D
Fallow	Bare soil	—	77	86	91	94
	Crop residue cover (CR)	Poor	76	85	90	93
		Good	74	83	88	90
Row crops	Straight row (SR)	Poor	72	81	88	91
		Good	67	78	85	89
	SR + CR	Poor	71	80	87	90
		Good	64	75	82	85
	Contoured (C)	Poor	70	79	84	88
		Good	65	75	82	86
	C + CR	Poor	69	78	83	87
		Good	64	74	81	85
	Contoured & terraced (C&T)	Poor	66	74	80	82
		Good	62	71	78	81

Cover description			Curve numbers for hydrologic soil group				
Cover type	Treatment	Hydrologic condition	A	B	C	D	
	C&T + R	Poor	65	73	79	81	
		Good	61	70	77	80	
Small grain	SR	Poor	65	76	84	88	
		Good	63	75	83	87	
	SR + CR	Poor	64	75	83	86	
		Good	60	72	80	84	
	C	Poor	63	74	82	85	
		Good	61	73	81	84	
	C + CR	Poor	62	73	81	84	
		Good	60	72	80	83	
	C&T	Poor	61	72	79	82	
		Good	59	70	78	81	
	C&T + R	Poor	60	71	78	81	
		Good	58	69	77	80	
	Close-seeded or broadcast legumes or rotation meadow	SR	Poor	66	77	85	89
			Good	58	72	81	85
		C	Poor	64	75	83	85
			Good	55	69	78	83
C&T		Poor	63	73	80	83	
		Good	51	67	76	80	

Tab. 5.4 gibt ein Beispiel für Auswahltabellen aus /USD 86/. Nach der Bestimmung der Landnutzung und Bewuchsform für jedes Flächenstück müssen auch die Bewuchsbedingungen in „poor“ (< 50 % Bedeckung) und „good“ (> 50 % Bedeckung) unterschieden werden für Bepflanzungen mit Getreiden oder Hülsenfrüchten. Für Grasland (Weideflächen) wird in drei Stufen unterschieden. Die Auswahl der Bodengruppe „soil group“

erfolgt auf Grund der Versickerungseigenschaften der Böden. Die Bodengruppen A bis D sind nach /USD 86/ wie folgt definiert:

- **Böden der Gruppe A** haben ein geringes Abflusspotenzial und eine hohe Infiltrationsrate, selbst wenn sie gut durchfeuchtet sind. Sie bestehen vor allem aus tiefgründigem, gut bis übermäßig entwässertem Sand oder Kies und haben eine hohe Wasserdurchlässigkeit.
- **Böden der Gruppe B** haben mäßige Infiltrationsraten bei gründlicher Befeuchtung und bestehen hauptsächlich aus mäßig tiefen bis tiefen, mäßig gut bis gut entwässerten Böden mit mäßig feiner bis mäßig grober Textur. Diese Böden haben eine mäßige Wasserdurchlässigkeit.
- **Böden der Gruppe C** haben eine geringe Infiltrationsrate, wenn sie gründlich befeuchtet werden, und bestehen hauptsächlich aus Böden mit einer Schicht, die die Infiltration des Wassers behindert, und Böden mit mäßig feiner bis feiner Textur. Diese Böden haben eine geringe Wasserdurchlässigkeit.
- **Böden der Gruppe D** haben ein hohes Abflusspotenzial. Sie haben sehr niedrige Infiltrationsraten, wenn sie gründlich befeuchtet sind und bestehen hauptsächlich aus Tonböden mit hohem Quellungspotenzial, Böden mit permanent hohem Grundwasserspiegel, Böden mit einer Tonpfanne oder Tonschicht an oder nahe der Oberfläche und flachen Böden über nahezu undurchlässigem Material. Diese Böden haben eine sehr geringe Wasserdurchlässigkeit.

Auf Grund der in Kap. 3.2 beschriebenen Bodeneigenschaften wird für die Untersuchungen im Rahmen dieses Projekts angenommen, dass die Bodengruppe im Übergangsbereich zwischen B und C liegt. Somit sind für jedes Flächenstück als Untergrenze für die Curve-Number-Intervalle die Werte für die Bodengruppe B zu wählen und als Obergrenze die Werte der Bodengruppe C.

Nach Ermittlung der Curve Number für jedes Flächenstück wird eine flächengewichtete Curve Number für das gesamte Teileinzugsgebiet nach Gl. 5.4 ermittelt.

$$CN = \sum_{i=1}^N p_i CN_i \quad (5.4)$$

Dabei ist CN die Curve Number für das gesamte Einzugsgebiet, p_i der Flächenanteil des i -ten Flächenstücks an der Gesamtfläche, CN_i die Curve Number für dieses Flächenstück und N die Anzahl der Flächenstücke. Da für jedes Flächenstück eine Ober- und eine Untergrenze bestimmt wurde, werden die Ober- bzw. Untergrenze von CN jeweils aus den Ober- bzw. Untergrenzen der Flächenstücke bestimmt. Für Simulationen wurde die Verteilung der Curve Number als gleichverteilt zwischen den ermittelten Ober- und Untergrenzen angenommen.

Bei der „Curve Number Method“ nach /USD 86/ kann zudem noch zwischen den dem Niederschlagsereignis vorhergehenden Feuchtebedingungen unterschieden werden, wobei trockene Vorbedingungen zu einer Reduzierung der Curve Number führen und feuchte Vorbedingungen zu einer Erhöhung der Curve Number. Für die Zwecke dieses Forschungsvorhabens und angesichts des mäßig feuchten, gemäßigten Klimas in Deutschland wurde jedoch hierauf verzichtet.

5.2.2 Unit Hydrograph Method

Der zentrale Gedanke hinter der Unit Hydrograph Method ist, dass jeder Zeitabschnitt mit abflusswirksamen Niederschlägen (wie nach Kap. 5.2.1 bestimmt), in einen Teil-Abfluss-Zeit-Verlauf (Teilhydrographen) umgerechnet werden kann. So wird für jeden Zeitabschnitt der daraus resultierende Abfluss einem zeitlichen Verlauf zugeordnet. Zur Berechnung des resultierenden Hydrographen für alle Zeitabschnitte werden dann diese Teilhydrographen der einzelnen Zeitabschnitte aufsummiert.

Es existieren sehr viele verschiedene Varianten der Unit Hydrograph Method. In diesem Projekt wird die in /USD 07/ beschriebene Methode verwendet, da sie auf die Verwendung mit der Curve Number Method abgestimmt ist. Es wird hierbei das vereinfachte Verfahren benutzt, das den Hydrographen durch ein flächengleiches Dreieck mit gleich großem Spitzenabfluss annähert (vgl. Abb. 5.4 und die nachfolgenden Erläuterungen). Der dimensionslose Unit Hydrograph dient dazu, aus einem abflusswirksamen Niederschlag („Excess rainfall“) eines Zeitabschnitts einen Hydrographen zu erzeugen. Zur Konstruktion eines solchen Hydrographen werden verschiedene Größen benötigt, die im Weiteren näher erläutert werden. Die Fläche unter dem Dreieck entspricht dabei dem gesamten zum Abfluss kommenden Volumen.

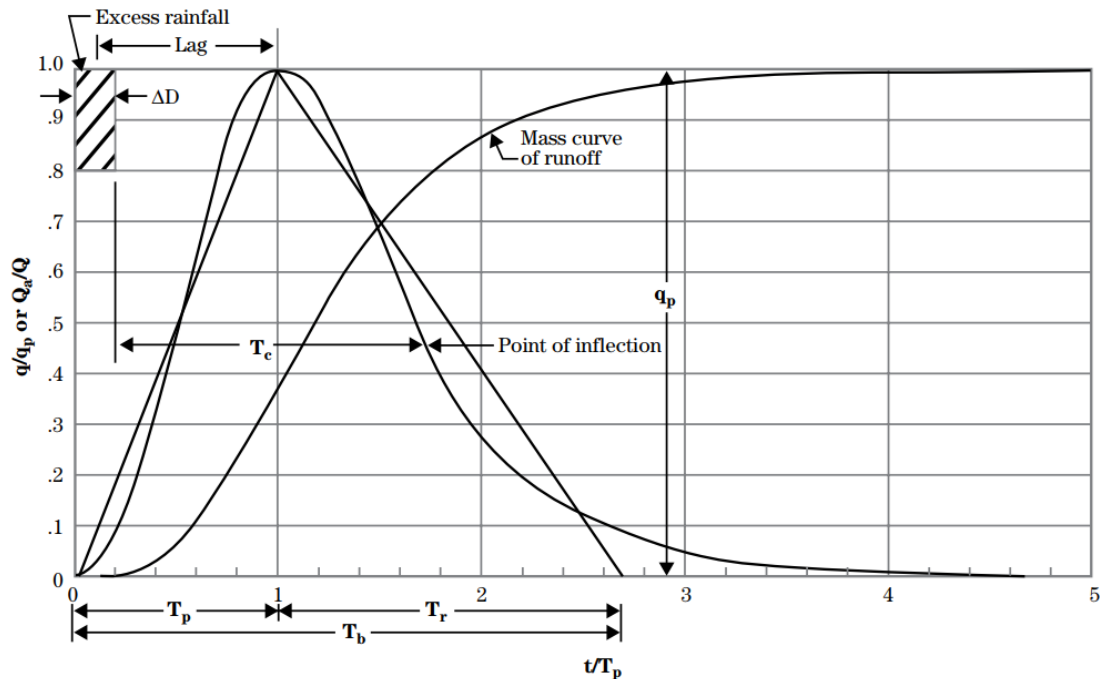


Abb. 5.4 Beispielhafte Darstellung für einen dimensionslosen Unit Hydrograph
/USD 07/

Zur Umrechnung der abflusswirksamen Niederschläge der jeweiligen Zeitabschnitte in Teilhydrographen muss zuerst die Lage des maximalen Abflusses („Time to peak“ T_p) bestimmt werden. Für das hier beschriebene Verfahren wird nach /USD 07/ die „Time of Concentration“ (T_c) in die „Time to peak“ pauschal mit $T_p = 0,6 T_c$ umgerechnet. Um die Dreiecksfläche zu bestimmen, ist festzulegen, wie groß die Basislänge des Dreiecks $T_b = T_p + T_r$ ist, d. h. wie schnell das Hochwasser nach Erreichen des Spitzenabflusses (q_p), gemessen durch die „Recession time“ T_r , zurückgeht. Die Länge der „Recession time“ T_r ist dabei von den Eigenschaften des Einzugsgebietes abhängig und kann im Bereich von $T_r = T_p$ (bei Gebirgsbächen) bis $T_r > 4 T_p$ (für Flachland) liegen. Als Standardwert wird in der Literatur gerne $T_r = 1,67 T_p$ verwendet, der für viele Einzugsgebiete ganz gut passt. Um die Charakteristik des Einzugsgebietes und deren Unsicherheiten zu erfassen, wurden die Werte T_r als gleichverteilt über das für das betrachtete Einzugsgebiet relevante Intervall [1,67; 3,33] angenommen.

Der Spitzenabfluss q_p (Höhe des Teilhydrographen) ergibt sich aus den zum Abfluss kommenden Volumina (Produkt aus dem zum Abfluss kommenden Niederschlag und der Teilgebietsfläche) und der Basislänge des Dreieckshydrographen.

$$q_{p,i,k} = \frac{2N_{aw,i}A_k}{T_{b,k}} \quad (5.5)$$

Dabei ist $q_{p,i,k}$ (in m^3/s) der Spitzenabfluss, der sich aus dem abflusswirksamen Niederschlag des i -ten Zeitabschnitts $N_{aw,i}$ (in mm) im k -ten Teileinzugsgebiet mit der Fläche A_k (in m^2) und der Basislänge des Hydrographen $T_{b,k}$ (in Sekunden) ergibt.

Aus den Angaben zu $T_{b,k}$ und $q_{p,i,k}$ lässt sich für jeden abflusswirksamen Niederschlag $N_{aw,i}$ der zugehörige dreiecksförmige Teilhydrograph $H_{i,k}$ konstruieren und zeitlich zuordnen.

Die Hydrographen H_k für die k -ten Teileinzugsgebiete ergeben sich dann jeweils als die Summe über alle Teilhydrographen $H_{i,k}$

$$H_k = \sum_i H_{i,k} \quad (5.6)$$

Um den resultierenden Hydrographen H_{ges} des gesamten Einzugsgebiets am Gebietsauslass zu berechnen, ist zu beachten, dass die Punkte, für die diese Hydrographen H_k berechnet wurden, unterschiedlich sind. Für das Teileinzugsgebiet III stimmt dieser Punkt mit dem Gebietsauslass überein, für die Teileinzugsgebiete I und II nicht. Zur korrekten zeitlichen Überlagerung dieser Hydrographen am Gebietsauslass müssen die Laufzeiten ($T_{L,k}$) der Hochwasserwellen von den Teileinzugsgebietsauslässen der Teileinzugsgebiete I und II bis zum Gebietsauslass ermittelt werden², um die Hydrographen H_k korrekt zeitlich überlagern zu können.

Zur Bestimmung der Laufzeiten werden die Methoden zur Bestimmung der Time of Concentration (vgl. Kap. 5.1) übernommen, sofern sie anwendbar sind, und angepasst ($T_L = 0,6T_c$) auf die entsprechenden Laufwege angewendet. Im Ergebnis ergeben sich ähnliche Wahrscheinlichkeitsverteilungen wie bei der Ermittlung von T_c (siehe Tab. 5.5 und Tab. 5.6).

² Die Laufzeit für das Teileinzugsgebiet III ist Null ($T_{L,III} = 0$), da der Teilgebietsauslass identisch ist mit dem Gebietsauslass.

Tab. 5.5 Ergebnisse der Untersuchungen zur Laufzeit für das Teileinzugsgebiet I bis zum Gebietsauslass

T _L -Formel	Kirpich	Ven Te Chow	Corps of Engineers	Temez	Yen und Chow	Haktanir und Sezen
T _L [min]	25,90	41,87	30,21	50,23	69,59	59,68
P	0,500	0,150	0,300	0,040	0,003	0,007

Tab. 5.6 Ergebnisse der Untersuchungen zur Laufzeit für das Teileinzugsgebiet II bis zum Gebietsauslass

T _L -Formel	Kirpich	Ven Te Chow	Corps of Engineers	Temez	Yen und Chow	Haktanir und Sezen
T _L [min]	13.49	24.34	16.37	25.77	41.85	27.80
P	0,500	0,150	0,300	0,040	0,003	0,007

Für die Simulationen wird eine Zufallsauswahl aus dieser Verteilungsfunktion getroffen.

Mit den ermittelten Laufzeiten können die Hydrographen H_k zeitlich entsprechend verschoben werden in Hydrographen $H_{v,k}$ und diese zum Gesamthydrographen H_{ges} summiert werden.

$$H_{ges} = \sum_k H_{v,k} \quad (5.7)$$

Als Simulationsergebnis für ein einzelnes Niederschlagsereignis wird dann der Maximalwert des Abflusses dieses Gesamthydrographen ermittelt. Ein Beispiel für ein solches Gesamtergebnis ist in Abb. 5.5 dargestellt. Dabei sind als gestrichelte Kurven die Hydrographen $H_{v,k}$ der Teileinzugsgebiete nach Laufzeitanpassung, als gepunktete Linie die Hydrographen H_k der Teileinzugsgebiete I und II und als rote durchgezogene Linie der Gesamthydrograph am Gebietsauslass. Der rote Stern markiert den Maximalwert des Abflusses, der als Simulationsergebnis übernommen wird. Im Inset ist das dazugehörige Niederschlagsereignis (vgl. Abb. 5.3) dargestellt.

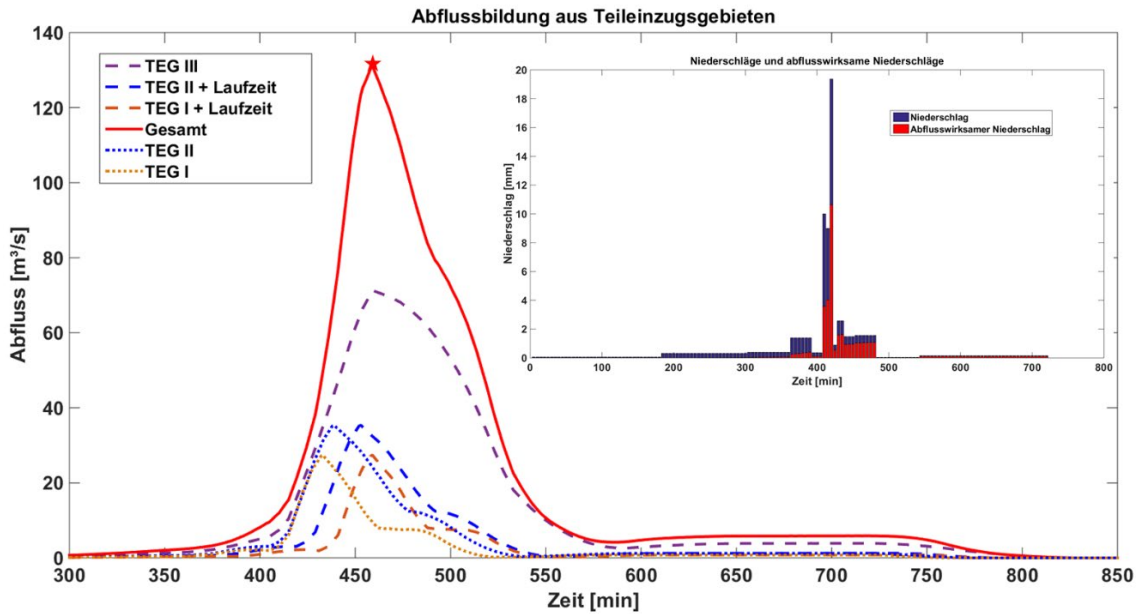


Abb. 5.5 Beispielhafte Darstellung eines Simulationsergebnisses

5.3 Rational Method und zugeordneter Hydrograph

Die Rational Method ist eine der ältesten und einfachsten Methoden, um aus Niederschlägen Abflüsse zu ermitteln. Erste dokumentierte Nutzungen dieser Methode lassen sich bis ins Jahr 1851 zurückverfolgen /SIM 14/. Die Rational Method ist zudem ein immer noch einsetzbares Verfahren, das gelegentlich noch verwendet wird und z. B. im französischen Regelwerk /ASN 13/ als zulässige Methode gilt.

5.3.1 Rational Method

Die Methode ist eng verknüpft mit der Idee der Time of Concentration. Der Spitzenabfluss Q ergibt sich aus drei Faktoren

$$Q = C I(T_c) A \tag{5.8}$$

Dabei ist C ein dimensionsloser Koeffizient, $I(T_c)$ die Niederschlagsintensität in m(Niederschlagshöhe)/s, die sich aus den im Zeitraum T_c gefallenen Niederschlägen (in m) und T_c (in Sekunden) ergibt, und A die Fläche des Einzugsgebiets in m^2 .

Analog zum Vorgehen bei der Curve Number Method (Bestimmung der Curve Number) ist der dimensionslose Koeffizient C aus tabellierten Werten zu bestimmen. Hierzu werden die Flächen in den Teileinzugsgebieten in ihren Eigenschaften, wie in Kap. 3.2 beschrieben, erfasst. Jedem erfassten Teil des Einzugsgebiets wird ein C -Intervall zugeordnet, um die Unsicherheiten bei der Bestimmung zu berücksichtigen. Dies betrifft vor allem die Unsicherheiten hinsichtlich der Bodengruppe. Ein Beispiel für eine solche Zuordnungstabelle ist in Tab. 5.7 dargestellt.

Sind diese Zuordnungen erfasst, so wird analog zu Gleichung 5.4 die flächengewichtete Summe über alle C -Koeffizienten der einzelnen Flächenstücke gebildet

$$C = \sum_{i=1}^N p_i C_i \quad (5.9)$$

Dabei ist C der dimensionslose Koeffizient für das gesamte Einzugsgebiet, p_i der Flächenanteil des i -ten Flächenstücks an der Gesamtfläche, C_i die dimensionslosen Koeffizienten für dieses Flächenstück und N die Anzahl der Flächenstücke.

Da für jedes Flächenstück eine Ober- und eine Untergrenze bestimmt wurde, werden die Ober- bzw. Untergrenze von C jeweils aus den Ober- bzw. Untergrenzen der Flächenstücke bestimmt. Für die Simulationen wurde die Verteilung des dimensionslosen Koeffizienten C als gleichverteilt zwischen den ermittelten Ober- und Untergrenzen angenommen (vgl. Tab. 5.7). Die hydrologischen Bodengruppen sind hierbei identisch zu Kap. 5.2.1 definiert.

Tab. 5.7 Beispieltabelle aus /MAI 22/ zur Zuordnung von dimensionslosen Koeffizienten C für verschiedene Nutzungs- und Bewuchsformen. Unterschieden wird zudem noch nach hydrologischer Bodengruppe und mittlerer Flächenneigung.

RUNOFF COEFFICIENTS FOR THE RATIONAL FORMULA BY HYDROLOGIC SOIL GROUP AND SLOPE												
Land Use	A			B			C			D		
	0-2%	2-6%	6+%	0-2%	2-6%	6+%	0-2%	2-6%	6+%	0-2%	2-6%	6+%
<i>First row of each entry provides runoff coefficients for storm recurrence intervals of 25 years or less. Second row provides runoff coefficients for storm recurrence intervals of 25 years or more.</i>												
Cultivated Land	0.08	0.13	0.16	0.11	0.15	0.21	0.14	0.19	0.26	0.18	0.23	0.31
	0.14	0.18	0.22	0.16	0.21	0.28	0.20	0.25	0.34	0.24	0.29	0.41
Pasture	0.12	0.20	0.30	0.18	0.28	0.37	0.24	0.34	0.44	0.30	0.40	0.50
	0.15	0.25	0.37	0.23	0.34	0.45	0.30	0.42	0.52	0.37	0.50	0.62
Meadow	0.10	0.16	0.25	0.14	0.22	0.30	0.20	0.28	0.36	0.24	0.30	0.40
	0.14	0.22	0.30	0.20	0.28	0.37	0.26	0.35	0.44	0.30	0.40	0.50
Forest	0.05	0.08	0.11	0.08	0.11	0.14	0.10	0.13	0.16	0.12	0.16	0.20
	0.08	0.11	0.14	0.10	0.14	0.18	0.12	0.16	0.20	0.15	0.20	0.25
Residential												
Lot Size (1/8 acre)	0.25	0.28	0.31	0.27	0.30	0.35	0.30	0.33	0.38	0.33	0.36	0.42
	0.33	0.37	0.40	0.35	0.39	0.44	0.38	0.42	0.49	0.41	0.45	0.54
Lot Size (1/4 acre)	0.22	0.26	0.29	0.24	0.29	0.33	0.27	0.31	0.36	0.30	0.34	0.40
	0.30	0.34	0.37	0.33	0.37	0.42	0.36	0.40	0.47	0.38	0.42	0.52
Lot Size (1/3 acre)	0.19	0.23	0.26	0.22	0.26	0.30	0.25	0.29	0.34	0.28	0.32	0.39
	0.28	0.32	0.35	0.30	0.35	0.39	0.33	0.38	0.45	0.36	0.40	0.50
Lot Size (1/2 acre)	0.16	0.20	0.24	0.19	0.23	0.28	0.22	0.27	0.32	0.26	0.30	0.37
	0.25	0.29	0.32	0.28	0.32	0.36	0.31	0.35	0.42	0.34	0.38	0.48
Lot Size (1 acre)	0.14	0.19	0.22	0.17	0.21	0.26	0.20	0.25	0.31	0.24	0.29	0.35
	0.22	0.26	0.29	0.24	0.28	0.34	0.28	0.32	0.40	0.31	0.35	0.46
Industrial	0.67	0.68	0.68	0.68	0.68	0.69	0.68	0.69	0.69	0.69	0.69	0.70
	0.85	0.85	0.85	0.85	0.86	0.86	0.86	0.86	0.87	0.86	0.86	0.88
Commercial	0.71	0.71	0.71	0.71	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72
	0.88	0.88	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.90	0.89	0.89	0.90
Streets	0.70	0.71	0.71	0.71	0.72	0.74	0.72	0.73	0.76	0.73	0.75	0.78
	0.76	0.77	0.80	0.80	0.82	0.84	0.84	0.85	0.80	0.89	0.91	0.95
Open Space	0.05	0.10	0.08	0.08	0.13	0.19	0.12	0.17	0.24	0.16	0.21	0.28
	0.11	0.16	0.14	0.14	0.19	0.26	0.18	0.23	0.32	0.22	0.27	0.39
Parking	0.85	0.86	0.85	0.85	0.86	0.87	0.85	0.86	0.87	0.85	0.86	0.87
	0.95	0.96	0.95	0.95	0.96	0.97	0.95	0.95	0.97	0.95	0.96	0.97

5.3.2 Hydrograph

Im Unterschied zur Curve Number Method gibt es kein etabliertes Verfahren zur Bestimmung des Hydrographen bei der Rational Method; dies wird von Fall zu Fall unterschiedlich gehandhabt. Da es sich bei dem in diesem Vorhaben betrachteten Einzugsgebiet um ein etwas komplexeres Einzugsgebiet mit drei Teileinzugsgebieten unterschiedlicher Dynamik (unterschiedliche T_c) handelt, werden jedoch zwingend Hydrographen für die Teileinzugsgebiete benötigt, um die zeitliche Überlagerung der Beiträge der Teileinzugsgebiete am Gebietsauslass zu erfassen.

Zur Konstruktion des Hydrographen wird in diesem Vorhaben daher auf die Proportionalität von Niederschlagsintensität und Abfluss zurückgegriffen. Dafür muss die Niederschlagskurve umgerechnet werden in eine Niederschlagsintensitätskurve $I(t, T_c)$, wobei die Niederschlagsintensitätskurve zum Zeitpunkt t der Quotient aus der Summe der Niederschläge N einer Zeitdauerspanne $t - T_c$ bis t und T_c ist (Gl. 5.10).

$$I(t, T_c) = \frac{1}{T_c} \sum_{(t-T_c) \leq k \leq t} N(k) \quad (5.10)$$

Dann ergibt sich bei wachsendem $I(t, T_c)$ für jeden Zeitpunkt t der Abfluss $(Q(t, T_c))$ gemäß Gl. 5.8. Bei kleiner werdendem $I(t, T_c)$ würde eine direkte Proportionalität den Abfluss unrealistisch schnell abfallen lassen, so dass hier ein langsames Abklingverhalten innerhalb der Recession Time (vgl. Kap. 5.2.2) berücksichtigt wird (siehe Abb. 5.6).

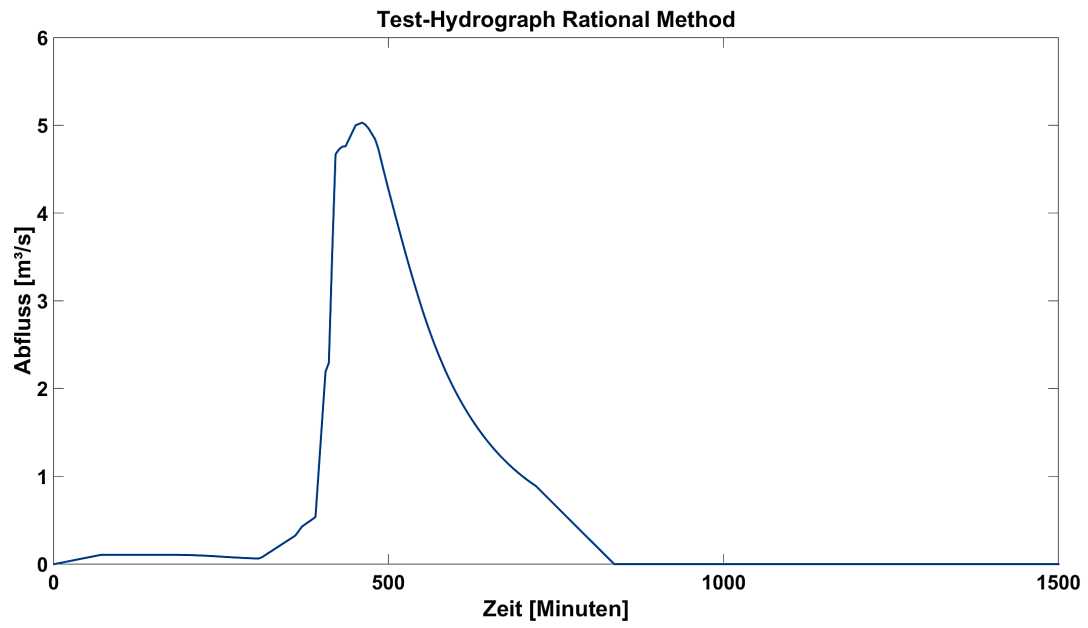


Abb. 5.6 Beispielhafte Darstellung eines Hydrographen für die Verwendung bei Nutzung der Rational Method

6 Durchführung der Simulationen und logischer Baum

Ein logischer Baum dient der Zusammenführung der Ergebnisse aller Einzelsimulationen. Im vorliegenden Bericht gliedert sich der logische Baum in zehn Äste für die zehn betrachteten Wiederkehrperioden von 100 bis 100.000 Jahren. Jeder Ast untergliedert sich jeweils in vier Nebenäste, die sich aus Kombinationsmöglichkeiten der Niederschlagsermittlung mit den Niederschlags-Abfluss-Beziehungen ergeben:

- Rasterdatensatz des DWD – Curve Number Method (NA 1)
- Rasterdatensatz des DWD – Rational Method (NA 2)
- Bestimmung aus Tagesniederschlägen – Curve Number Method (NA 3)
- Bestimmung aus Tagesniederschlägen – Rational Method (NA 4)

So enthält z. B. der Nebenast „W 100 NA 1“ alle Simulationsergebnisse für Wiederkehrperioden von 100 Jahren unter Verwendung des Rasterdatensatzes des DWD und der Curve Number Method. Diese Nebenäste untergliedern sich wiederum in acht Zweige, die sich aus den acht betrachteten Niederschlagsdauern von 60 Minuten bis 720 Minuten ergeben: So enthält z. B. der Zweig „W 100 NA 1 t 60“ alle Simulationen für eine Wiederkehrperiode von 100 Jahren mit 60-minütigen Niederschlagsereignissen.

Jeder dieser Zweige untergliedert sich dann in drei Blätter, die sich aus den drei betrachteten Niederschlagsprofilen ergeben. So enthält z. B. das Blatt „W 100 NA 1 t 60 eb“ alle Simulationen für eine Wiederkehrperiode von 100 Jahren mit einem 60-minütigen Niederschlagsereignis und endbetontem Niederschlagsprofil. Jedes Blatt wiederum enthält 5.000 Simulationen zur Abdeckung des Parameterraums, so dass sich für jeden Ast 1.200.000 Simulationen ($5.000 \cdot 3 \cdot 8 \cdot 10$) und insgesamt 4.800.000 Simulationen ergeben.

Jedes Blatt enthält 5.000 Simulationsergebnisse, aus denen sich eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ergebnisse ergibt. Diese werden in einer Wahrscheinlichkeitsverteilung für das Blatt aggregiert, z. B. „P W 100 NA 1 t 60 eb“. Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen für jeden Zweig ergeben sich aus der Aggregation der Wahrscheinlichkeitsverteilungen seiner Blätter, z. B. „P W 100 NA 1 t 60“ als gewichtete Summe der Wahrscheinlichkeitsverteilungen „P W 100 NA 1 t 60 eb“, „P W 100 NA 1 t 60 mb“ und „P W 100 NA 1 t 60 ab“ (siehe Kap. 6.1).

Im zweiten Schritt werden die Ergebnisse aller Zweige eines Nebenasts in einer Wahrscheinlichkeitsverteilung aggregiert, d. h. die Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die acht betrachteten Zeitdauern zwischen 60 und 720 Minuten werden gewichtet summiert (vgl. Kap. 6.2), z. B. „P W 100 NA 1“ als gewichtete Summe von „P W 100 NA 1 t 60“ bis „P W 100 NA 1 t 720“.

Im letzten Schritt werden dann die Ergebnisse aller Nebenäste in einer Wahrscheinlichkeitsverteilung für den Ast aggregiert (vgl. dazu Kap. 6.3), z. B. „P W 100“ als gewichtete Summe von „P W 100 NA 1“ bis „P W 100 NA 4“.

6.1 Gewichtungsschemata für Niederschlagsprofile

Bei den im Vorhaben RS1587 durchgeführten Arbeiten wurden die drei Niederschlagsprofile anfangs-, mitten und endbetont unterschieden. Dies wurde bewusst so gewählt, um die gesamte Bandbreite möglicher Niederschlagsmuster abzudecken. Da keine Untersuchungen zu Wahrscheinlichkeiten der Niederschlagsverteilungen durchgeführt wurden, wurden diese drei prinzipiellen Möglichkeiten im Rahmen dieses Vorhabens als gleichverteilt angenommen, so dass die Zweige jeweils mit einem Drittel gewichtet wurden.

6.1.1 Curve Number Method

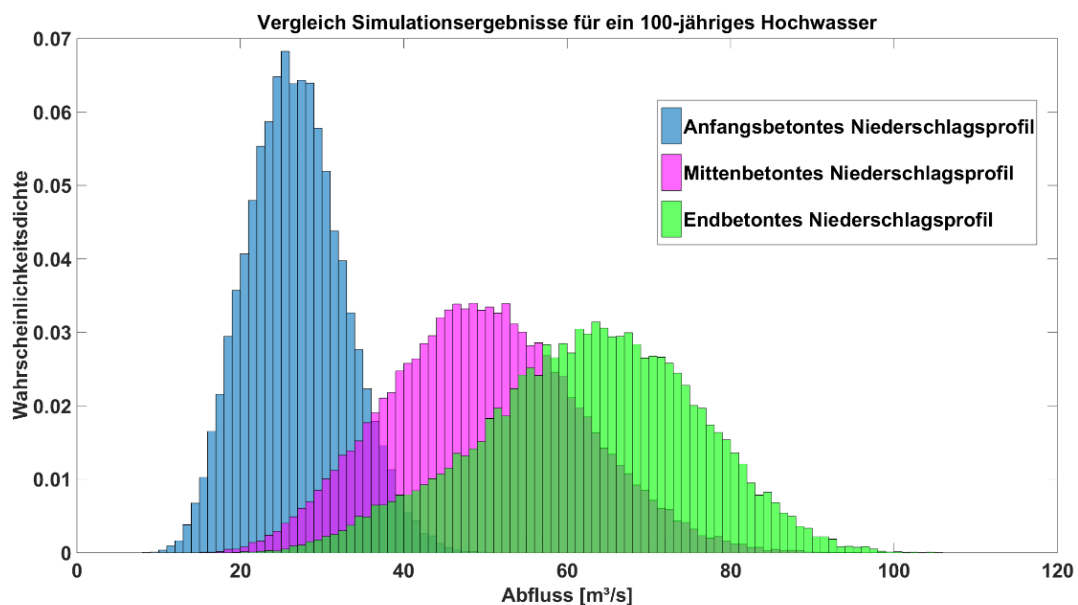


Abb. 6.1 Beispielhafter Vergleich der Simulationsergebnisse für ein 100-jähriges Hochwasser mit der Curve Number Method

Da Simulationsergebnisse mittels der Curve Number Method für Hochwasserabflüsse mit einem endbetonten Niederschlagsprofil tendenziell größer sind als mit einem mittenbetonten Niederschlagsprofil und diese wieder tendenziell größer als solche mit einem anfangsbetonten Niederschlagsprofil (vgl. Abb. 6.1), hat die Annahme der Gleichverteilung einen wesentlichen Einfluss auf die Unsicherheitsbandbreite. Deutlich erkennbar ist dabei, dass tendenziell die Hochwasserabflüsse ansteigen, wenn von anfangs- zu mitten- und endbetonten Niederschlagsprofilen übergegangen wird. Mit Untersuchungen zur Verteilung der Niederschlagsprofile kann hier die Unsicherheitsbandbreite genauer quantifiziert werden, wenn auf Grund objektiver Untersuchungen ein anderes Gewichtungsschema gewählt wird.

Abb. 6.2 stellt den Einfluss unterschiedlicher Gewichtungsschemata für anfangs-, mitten- und endbetonte Niederschlagsprofile auf die resultierende Wahrscheinlichkeitsverteilung dar. Die blaue Kurve ist das Gewichtungsschema, das in der vorliegenden Untersuchung verwendet wurde (Gleichverteilung). Andere Gewichtungsschemata führen zu merkbar unterschiedlichen Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Es ist deutlich erkennbar, dass das Gewichtungsschema einen erheblichen Einfluss auf die resultierende Wahrscheinlichkeitsverteilung hat.

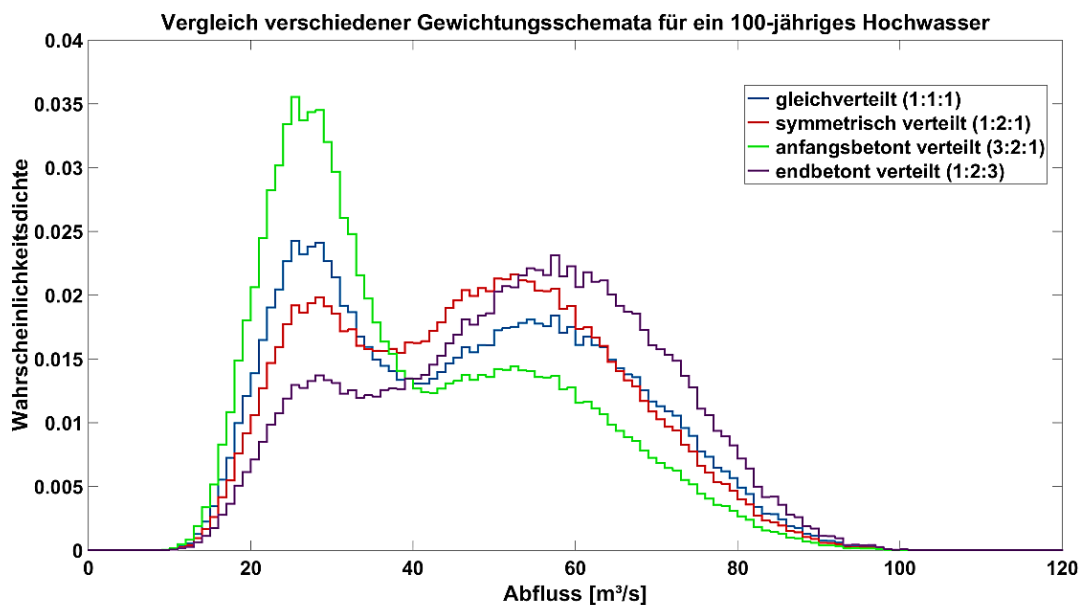


Abb. 6.2 Beispielhafter Vergleich verschiedener Gewichtungsschemata für Simulationsergebnisse für ein 100-jähriges Hochwasser mit der Curve Number Method

6.1.2 Rational Method

Die Simulationsergebnisse für die Rational Method ergeben nur eine geringe Abhängigkeit für die unterschiedlichen Niederschlagsprofile (siehe Abb. 6.3), da die Methode explizit nur von der Niederschlagsmenge in einem gleitenden Zeitfenster (Länge T_c) abhängt. Variationen für unterschiedliche Niederschlagsprofile sind also eher statistischer Natur, so dass dieses Gewichtungsschema hier nur eine untergeordnete Rolle spielt. Bedingt durch die Laufzeitunterschiede der Teilwellen zum Gebietsauslass und die Wahl des Hydrographen kommt es zu kleineren Unterschieden in den Mittelwerten der unterschiedlichen Niederschlagsprofile.

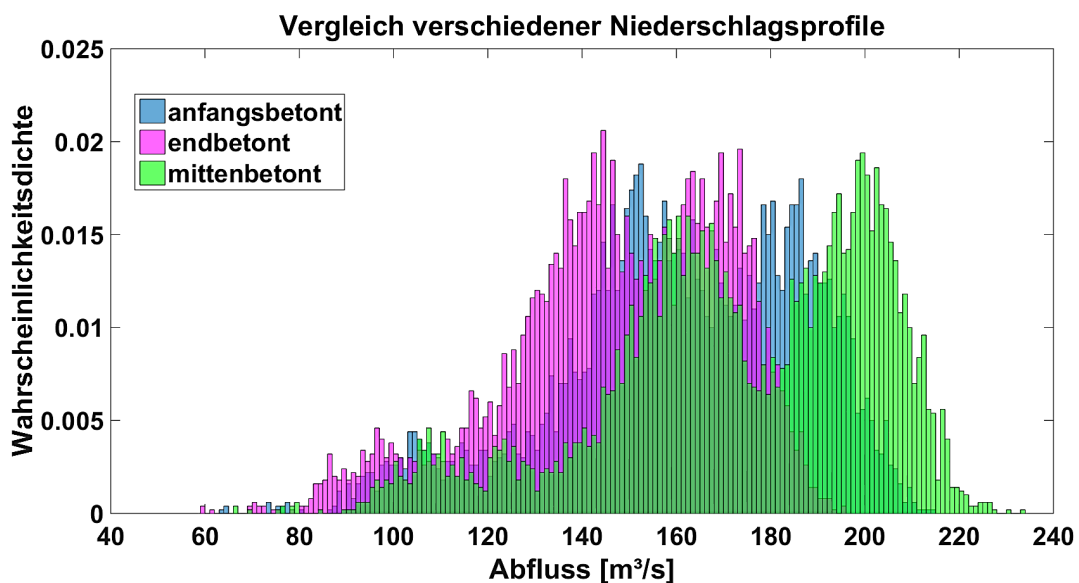


Abb. 6.3 Beispielhafter Vergleich der Simulationsergebnisse für ein 100.000-jähriges Hochwasser mit der Rational Method

6.2 Gewichtungsschema für Niederschlagsdauern

Im Rahmen des Vorhabens RS1587 wurden acht unterschiedliche Niederschlagsdauern zwischen 60 Minuten und 12 Stunden simuliert. Da keine Untersuchungen zur Verteilung der Niederschlagsdauern einzelner Niederschlagsereignisse durchgeführt wurden, wurden die unterschiedlichen Zeitdauern als gleich wahrscheinlich angenommen und diese entsprechend mit jeweils einem Achtel gewichtet.

6.2.1 Curve Number Method

Da Simulationsergebnisse für Hochwasserabflüsse mit der Curve Number Method tendenziell bei längeren Niederschlagsereignissen größer als bei kürzeren sind, weil sich die Rückhaltefähigkeit zunehmend erschöpft, hat diese Annahme der gleichen Wahrscheinlichkeit einen Einfluss auf die Unsicherheitsbandbreite. Mit Untersuchungen zur Verteilung der Niederschlagsdauern kann hier die Unsicherheitsbandbreite genauer quantifiziert werden, wenn auf Grund objektiver Untersuchungen ein anderes Gewichtungsschema gewählt wird. Klar erkennbar in Abb. 6.4 ist, dass tendenziell die Hochwasserabflüsse ansteigen, wenn die Zeitdauer des Niederschlagsereignisses ansteigt. Mit zunehmender Zeitdauer des Niederschlagsereignisses bildet sich zudem eine schiefe Verteilungsfunktion aus, und der Unterschied zwischen den unterschiedlichen Niederschlagsprofilen führt zu einer Wahrscheinlichkeitsdichte mit zwei lokalen Maxima.

Eine Vielzahl möglicher Gewichtungsschemata sind denkbar, so z. B. eine Gewichtung nach repräsentativen Zeitdauerintervallen: Es kann angenommen werden, dass die simulierten Niederschlagsereignisse repräsentativ für jeweils ein Zeitdauerintervall (z. B. das 60-Minuten-Ereignis repräsentativ für das Intervall 46 bis 75 Minuten) sind. Durch diese Annahme würden lange Niederschlagsereignisse höher bewertet, da das 720-Minuten-Ereignis repräsentativ für das Intervall von 631 bis 810 Minuten stehen würde und damit 6-mal höher gewichtet werden würde. Der Vergleich mit dem in diesem Projekt verwendeten Gewichtungsschema erbringt erkennbare Unterschiede, die jedoch keine signifikanten Unterschiede im Endergebnis bedingen (vgl. Abb. 6.5).

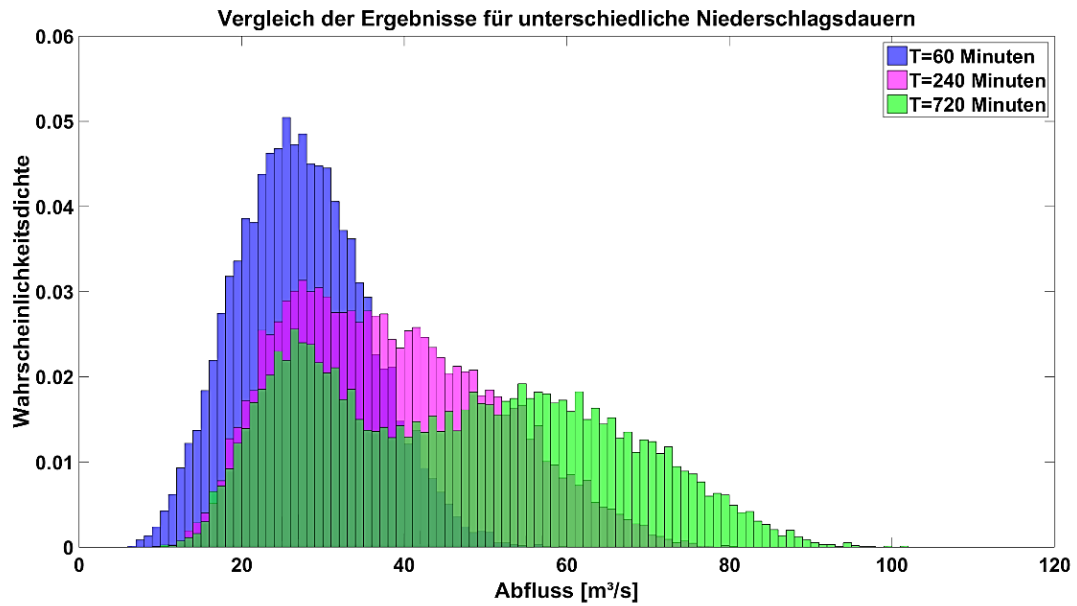


Abb. 6.4 Beispielhafter Vergleich der Simulationsergebnisse für ein 100-jähriges Hochwasser mit unterschiedlichen Niederschlagsdauern (Curve Number Method)

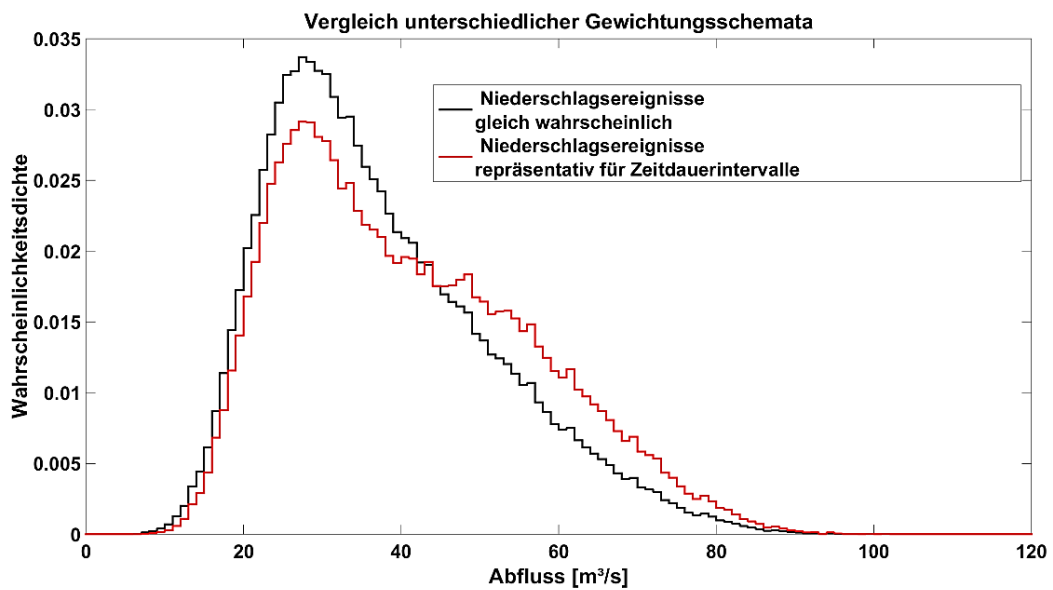


Abb. 6.5 Beispielhafter Vergleich zweier verschiedener Gewichtungsschemata für die Simulationsergebnisse

6.2.2 Rational Method

Ergebnisse unter Verwendung der Rational Method variieren nicht sehr stark mit der Zeitdauer der angenommenen Niederschläge, da die Methode explizit nur von der Niederschlagsmenge in einem gleitenden Zeitfenster (Länge T_c) abhängt. Variationen für unterschiedliche Niederschlagszeitdauern sind also eher statistischer Natur, so dass dieses Gewichtungsschema hier keine Rolle spielt.

6.3 Gewichtungsschema für Methodenkombinationen

Es wurden für jede der zehn unterschiedlichen Wiederkehrperioden von 100 bis 100.000 Jahren (100, 200, 500, 1.000, 2.000, 5.000, 10.000, 20.000, 50.000 und 100.000) Hochwasserereignisse in jeweils vier Nebenästen simuliert. Die Ergebnisse für jede Wiederkehrperiode werden aus den Teilergebnissen der Nebenäste aggregiert. Dabei werden die Nebenäste jeweils zu einem Viertel gewichtet.

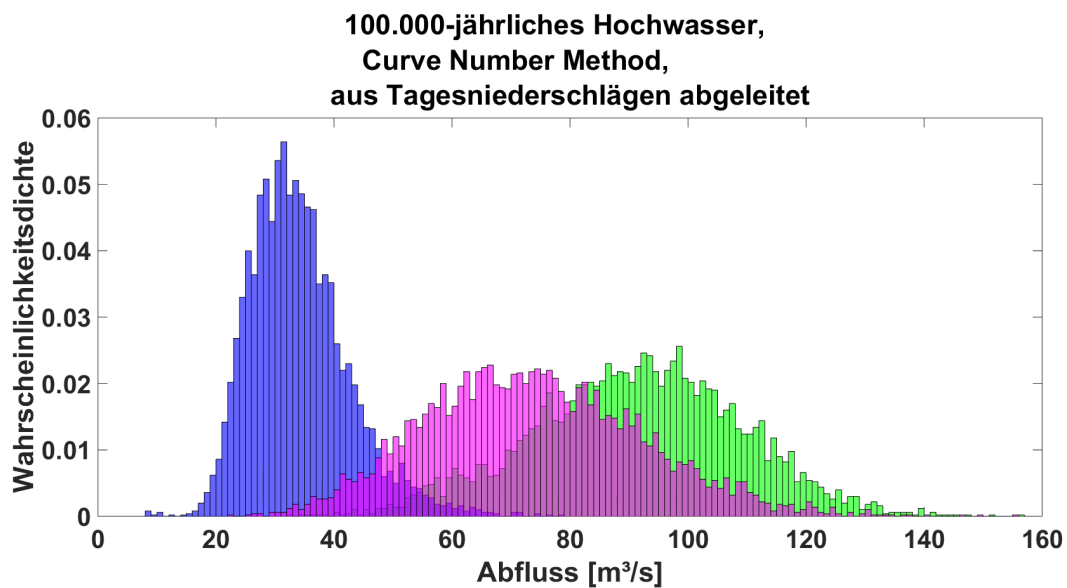


Abb. 6.6 Beispielhafte Darstellung der Abflussverteilung unter Verwendung der Curve Number Method mit 720-minütigen Niederschlägen, die aus Tagesniederschlägen abgeleitet wurden

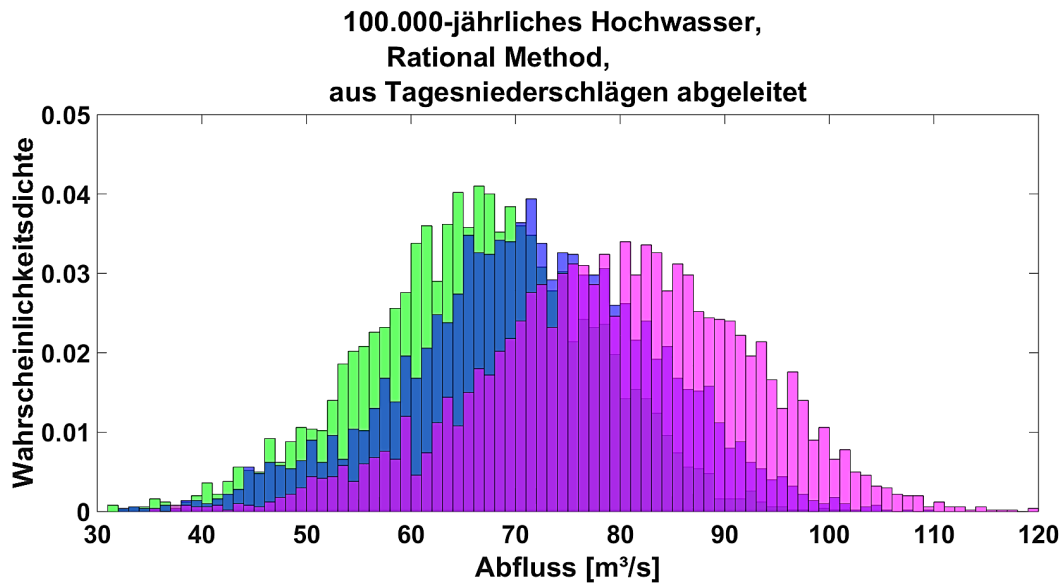


Abb. 6.7 Beispielhafte Darstellung der Abflussverteilung unter Verwendung der Rational Method mit 720-minütigen Niederschlägen, die aus Tagesniederschlägen abgeleitet wurden

Ein Vergleich der Ergebnisse von Rational Method und Curve Number Method bringt zu Tage, dass die Unterschiede hauptsächlich in der Form der resultierenden Verteilung zu erwarten sind (vgl. Abb. 6.6 und Abb. 6.7). Die Mittelwerte sind ähnlich, und die Spannweiten (minimaler Wert bis maximaler Wert) der Verteilungen liegen in einem ähnlichen Bereich.

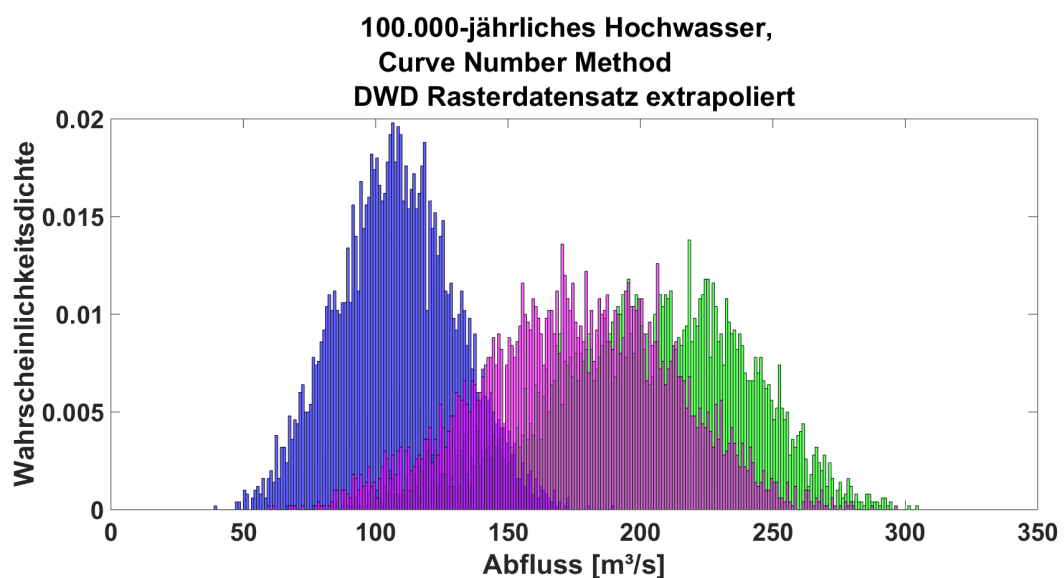


Abb. 6.8 Beispielhafte Darstellung der Abflussverteilung unter Verwendung der Curve Number Method mit 720-minütigen Niederschlägen, die aus dem DWD-Rasterdatensatz extrapoliert wurden

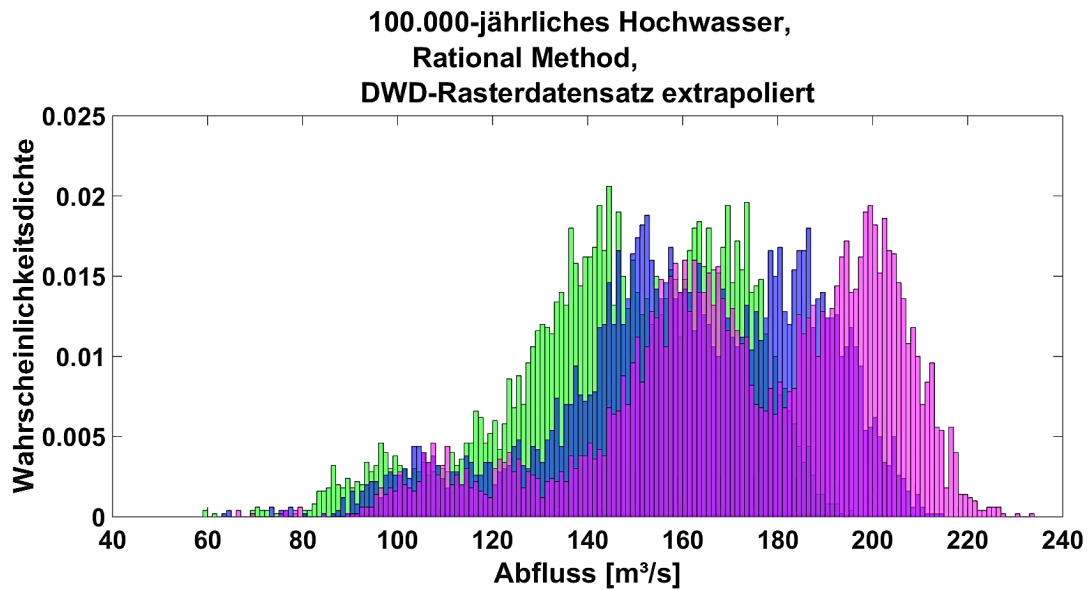


Abb. 6.9 Beispielhafte Darstellung der Abflussverteilung unter Verwendung der Curve Number Method mit 720-minütigen Niederschlägen, die aus dem DWD-Rasterdatensatz extrapoliert wurden

Einen größeren Einfluss hat eine andere Niederschlagsermittlung, da höhere Niederschläge auch zu höheren Abflüssen führen. In Kap. 4.3 sind die Unterschiede zwischen den Niederschlagswerten aus den beiden Ermittlungsmethoden dargestellt. Diese Unterschiede zeigen sich auch deutlich in den ermittelten Abflusswerten (siehe Abb. 6.6 und Abb. 6.7 im Vergleich mit Abb. 6.8 und Abb. 6.9).

Eine unterschiedliche Gewichtung der Niederschlags-Abfluss-Beziehungen würde die Ergebnisse auf Grund der festgestellten und oben dargestellten Ähnlichkeit der Ergebnisse nur unwesentlich beeinflussen. Eine unterschiedliche Gewichtung der Niederschlagsermittlungen hingegen würde die Ergebnisse stark beeinflussen. Eine größere (kleinere) Gewichtung der Niederschlagsermittlung aus dem DWD-Rasterdatensatz würde die Ergebnisse zu größeren (kleineren) Werten verschieben.

7 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Simulationen in Form von Gefährdungskurven dargestellt. Diese Gefährdungskurven werden zunächst für jeden der Nebenäste des logischen Baums getrennt dargestellt und anschließend für das Gesamtergebnis, das sich aus der Kombination aller Nebenäste ergibt. Ergebnisse unter Verwendung der Curve Number Method mit den zwei verschiedenen Methoden der Niederschlagsermittlung sind in Kap. 7.1 dargestellt, Ergebnisse unter Verwendung der Rational Method finden sich in Kap. 7.2.

7.1 Ergebnisse der Curve Number Method

Simulationen mit der Curve Number Method wurden auf Basis von zwei unterschiedlichen Methoden zur Niederschlagsermittlung durchgeführt. Zum einen wurden die Werte verwendet, die sich aus der Extrapolation des DWD-Rasterdatensatzes ergaben (vgl. Kap. 4.1), und zum anderen wurden Werte verwendet, die sich aus der statistischen Extrapolation von Tagesniederschlägen und der Ableitung von Niederschlagswerten kürzerer Zeitdauer aus diesen Niederschlagswerten ergaben (vgl. Kap. 4.2).

Da die ermittelten Niederschlagswerte bei der Extrapolation des DWD-Rasterdatensatzes fast durchgehend höher liegen im Vergleich mit der Ableitung aus extrapolierten Tagesniederschlägen, sind die ermittelten Hochwasserabflüsse unter Verwendung der Curve Number Method bei Verwendung der extrapolierten DWD-Rasterdaten (siehe Kap. 7.1.1) im Mittel höher als die Hochwasserabflüsse, die sich unter Verwendung von aus Tagesniederschlägen abgeleiteten Werten ergeben (siehe Kap. 7.1.2).

7.1.1 Ergebnisse unter Verwendung des DWD-Rasterdatensatzes

Die Simulationen und deren Auswertungen wurden gemäß Kap. 6 durchgeführt. Im Einzelnen wurden für jede der zehn betrachteten Wiederkehrperioden acht unterschiedliche Niederschlagsdauern untersucht. Jede dieser 80 Kombinationen wurde für die drei unterschiedlichen Niederschlagsprofile (anfangs-, mitten- und endbetont) jeweils 5.000-mal simuliert, so dass sich für jede Wiederkehrperiode 120.000 Simulationen und insgesamt 1.200.000 Simulationen ergeben.

Tab. 7.1 Zusammenstellung wesentlicher Ergebnisse der Gefährdungsanalyse bei Verwendung der Curve Number Method und Niederschlägen, die aus dem DWD-Rasterdatensatz extrapoliert wurden

Wiederkehrperiode [a]	Abflussverteilung Kennwerte [m³/s]						
	Median	Mittelwert	25 % 75 %	10 % 90 %	5 % 95 %	1 % 99 %	Min Max
100	34,52	37,42	26,61 46,25	21,42 57,90	18,80 64,88	14,44 76,61	6,89 101,64
200	42,47	45,60	32,90 56,26	26,56 69,54	23,24 77,37	18,02 90,84	8,03 125,24
500	53,83	57,30	42,02 70,28	33,96 86,10	29,85 95,08	23,26 110,51	10,25 142,24
1.000	63,12	66,89	49,42 82,06	40,13 99,53	35,31 109,40	27,56 126,90	11,55 165,63
2.000	72,94	76,92	57,35 94,00	46,71 113,38	41,28 124,48	32,14 143,28	15,10 182,40
5.000	86,32	90,65	68,21 110,36	55,74 132,46	49,26 145,12	38,33 166,05	16,08 214,11
10.000	96,93	101,56	76,89 123,35	62,95 147,18	55,61 160,94	43,82 183,60	20,53 232,87
20.000	108,30	113,02	85,88 137,36	70,32 163,06	62,11 177,59	48,76 201,94	22,65 248,58
50.000	123,36	128,43	98,22 155,98	80,50 183,99	70,97 199,78	55,98 227,11	28,23 281,39
100.000	135,46	140,83	108,27 170,40	88,96 201,09	78,73 218,18	62,04 246,33	32,31 304,39

Für jede Wiederkehrperiode wurden aus den Ergebnissen empirische Verteilungsfunktionen ermittelt. Daraus wurden Medianwerte, arithmetische Mittelwerte und verschiedene Konfidenzintervalle (1 bis 99 %, 5 bis 95 %, 10 bis 90 % und 25 bis 75 %) abgeleitet.

Tab. 7.1 zeigt die wesentlichen Ergebnisse der Simulationen, aufgeschlüsselt nach Wiederkehrperioden. Durchgehend sind die Medianwerte kleiner als die arithmetischen Mittelwerte, und die Verteilung somit rechtsschief. Dies ist auch in der Asymmetrie der unterschiedlichen Konfidenzintervalle zu erkennen. Die angegebenen Minimal- bzw. Maximalwerte sollen ein Gefühl für die Spannbreite der Verteilung geben, sind aber numerisch eher instabil.

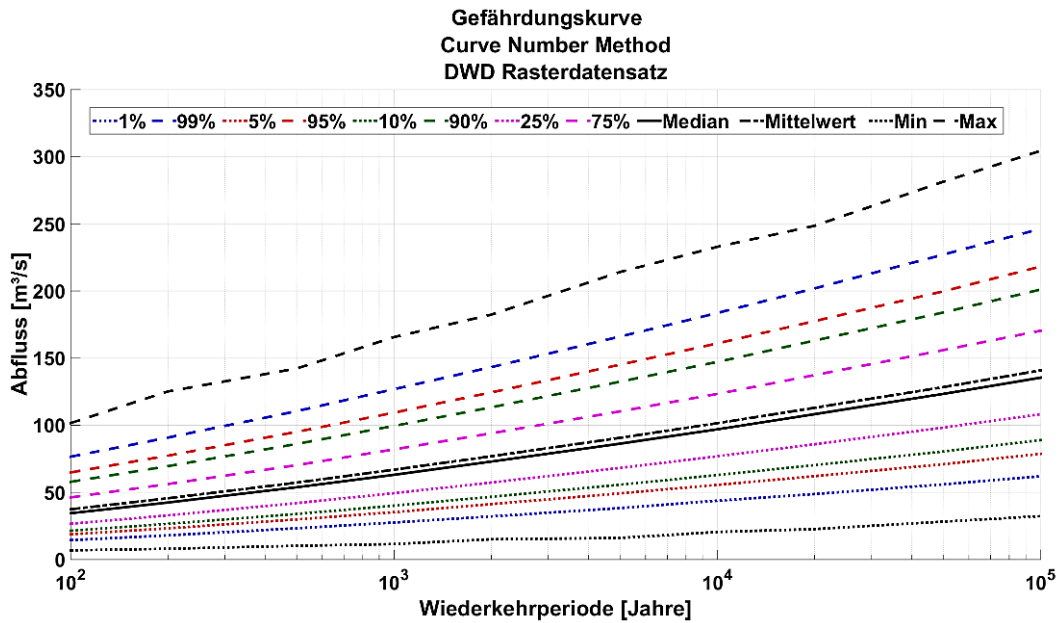


Abb. 7.1 Gefährdungskurve als Ergebnis der probabilistischen Betrachtungen für die Curve Number Method in Verbindung mit der Extrapolation des DWD-Rasterdatensatzes

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abb. 7.1 einfach logarithmisch dargestellt. Gut erkennbar ist die Asymmetrie der Konfidenzintervalle um den Medianwert, der Unterschied zwischen Median- und arithmetischem Mittelwert sowie die numerische Instabilität der Minimal- bzw. Maximalwerte.

7.1.2 Ergebnisse unter Verwendung aus Tagesniederschlägen abgeleiteter Werte

Die Simulationen und Auswertungen wurden gemäß Kap. 6 durchgeführt. Im Einzelnen wurden für jede der zehn betrachteten Wiederkehrperioden acht unterschiedliche Niederschlagsdauern untersucht. Jede dieser 80 Kombinationen wurde für die drei unterschiedlichen Niederschlagsprofile (anfangs-, mitten- und endbetont) jeweils 5.000-mal simuliert, so dass sich für jede Wiederkehrperiode 120.000 Simulationen und insgesamt 1.200.000 Simulationen ergeben.

Für jede Wiederkehrperiode wurden aus den Ergebnissen empirische Verteilungsfunktionen ermittelt. Daraus wurden Medianwerte, arithmetische Mittelwerte und verschiedene Konfidenzintervalle (1 bis 99 %, 5 bis 95 %, 10 bis 90 % und 25 bis 75 %) abgeleitet.

Tab. 7.2 zeigt die wesentlichen Ergebnisse der Simulationen, aufgeschlüsselt nach Wiederkehrperioden. Durchgehend sind die Medianwerte kleiner als die arithmetischen Mittelwerte und die Verteilung somit rechtsschief. Dies ist auch in der Asymmetrie der unterschiedlichen Konfidenzintervalle zu erkennen. Die angegebenen Minimal- bzw. Maximalwerte sollen ein Gefühl für die Spannbreite der Verteilung geben, sind aber numerisch eher instabil.

Tab. 7.2 Zusammenstellung wesentlicher Ergebnisse der Gefährdungsanalyse bei Verwendung der Curve Number Method und Niederschlägen, die aus Tagesniederschlägen abgeleitet wurden

Wiederkehrperiode [a]	Abflussverteilung Kennwerte [m ³ /s]						
	Median	Mittelwert	25% 75%	10% 90%	5% 95%	1% 99%	Min Max
100	5,88	7,58	3,56 9,91	2,13 15,95	1,54 19,83	0,82 25,75	0,02 38,62
200	7,67	9,71	4,80 12,72	3,00 19,96	2,24 24,44	1,29 31,21	0,07 48,70
500	10,43	13,01	6,79 16,99	4,42 26,06	3,41 31,39	2,02 39,80	0,08 60,49
1.000	12,81	15,86	8,51 20,71	5,73 31,18	4,47 37,44	2,78 47,06	0,43 69,20
2.000	15,59	19,06	10,54 24,76	7,20 36,87	5,68 43,84	3,68 54,77	0,45 78,36
5.000	19,65	23,73	13,45 30,91	9,41 44,97	7,51 53,15	4,77 65,74	0,84 94,38
10.000	23,08	27,73	16,01 36,06	11,34 51,90	9,06 61,11	5,97 75,30	1,15 111,56
20.000	26,75	31,90	18,65 41,55	13,49 59,02	10,93 68,91	7,09 84,77	1,27 124,96
50.000	32,28	38,14	22,80 49,54	16,61 69,42	13,56 80,55	8,99 98,35	2,01 138,71
100.000	36,73	43,11	26,09 55,92	19,18 77,62	15,74 89,96	10,56 109,30	1,99 156,35

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abb. 7.2 einfach logarithmisch dargestellt. Gut erkennbar ist die Asymmetrie der Konfidenzintervalle um den Medianwert, der Unterschied zwischen Median- und arithmetischem Mittelwert sowie die numerische Instabilität der Maximalwerte, bedingt auch der Minimalwerte.

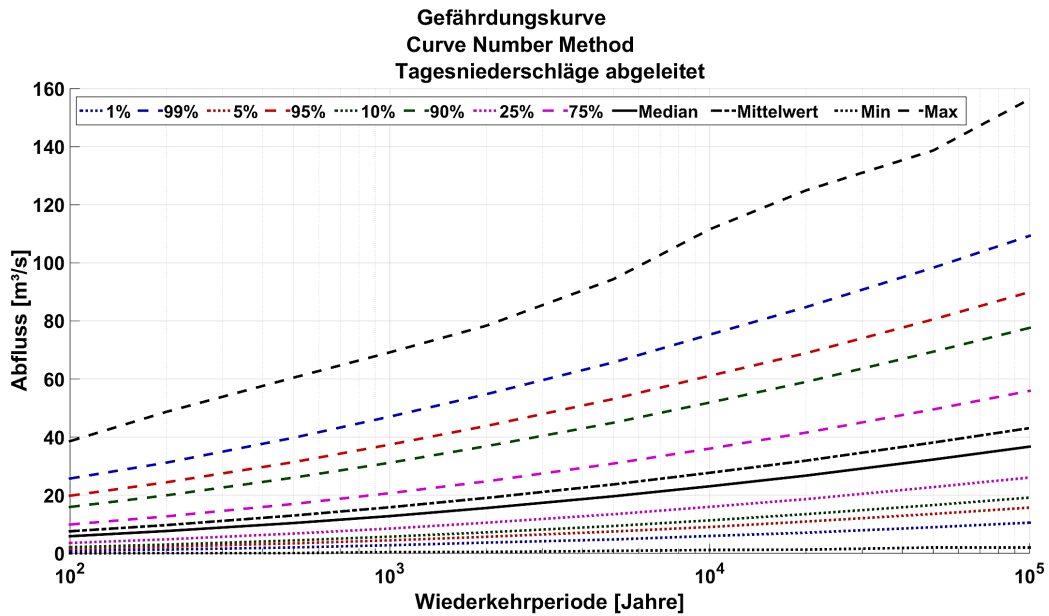


Abb. 7.2 Gefährdungskurve als Ergebnis der probabilistischen Betrachtungen für die Curve Number Method in Verbindung mit aus Tagesniederschlägen abgeleiteten Werten

7.2 Ergebnisse der Rational Method

Simulationen mit der Rational Method wurden auf Basis von zwei unterschiedlichen Methoden zur Niederschlagsermittlung durchgeführt. Zum einen wurden die Werte verwendet, die sich aus der Extrapolation des DWD-Rasterdatensatzes ergaben (vgl. Kap. 4.1) und zum anderen wurden Werte verwendet, die sich aus der statistischen Extrapolation von Tagesniederschlägen und der Ableitung von Niederschlagswerten kürzerer Zeitdauer aus diesen Niederschlagswerten ergaben (vgl. Kap. 4.2).

Da die ermittelten Niederschlagswerte bei der Extrapolation des DWD-Rasterdatensatzes fast durchgehend höher liegen im Vergleich mit der Ableitung aus extrapolierten Tagesniederschlägen, sind die ermittelten Hochwasserabflüsse unter Verwendung der Rational Method bei Verwendung der extrapolierten DWD-Rasterdaten (siehe Kap. 7.2.1) im Mittel höher als die Hochwasserabflüsse, die sich unter Verwendung von aus Tagesniederschlägen abgeleiteten Werten ergeben (siehe Kap. 7.2.2).

7.2.1 Ergebnisse unter Verwendung des Rasterdatensatzes

Die Simulationen und Auswertungen wurden gemäß Kap. 6 durchgeführt. Im Einzelnen wurden für jede der zehn betrachteten Wiederkehrperioden acht unterschiedliche Niederschlagsdauern untersucht. Jede dieser 80 Kombinationen wurde für die drei unterschiedlichen Niederschlagsprofile (anfangs-, mitten- und endbetont) jeweils 5.000-mal simuliert, so dass sich für jede Wiederkehrperiode 120.000 Simulationen und insgesamt 1.200.000 Simulationen ergeben.

Für jede Wiederkehrperiode wurden aus den Ergebnissen empirische Verteilungsfunktionen ermittelt. Daraus wurden Medianwerte, arithmetische Mittelwerte und verschiedene Konfidenzintervalle (1 bis 99 %, 5 bis 95 %, 10 bis 90 % und 25 bis 75 %) abgeleitet.

Tab. 7.3 Zusammenstellung wesentlicher Ergebnisse der Gefährdungsanalyse bei Verwendung der Rational Method und Niederschlägen, die aus dem DWD-Rasterdatensatz extrapoliert wurden

Wiederkehrperiode [a]	Abflussverteilung Kennwerte [m³/s]						
	Median	Mittelwert	25 % 75 %	10 % 90 %	5 % 95 %	1 % 99 %	Min Max
100	78,68	77,89	69,21 88,44	58,69 95,94	51,65 99,01	42,37 103,60	22,40 112,94
200	87,01	86,12	76,54 97,74	64,91 105,97	57,23 109,41	46,81 114,46	26,16 127,21
500	97,84	96,85	86,08 109,89	73,12 119,28	64,31 123,10	52,85 128,83	27,88 142,34
1.000	106,11	105,06	93,31 119,15	79,31 129,40	69,76 133,61	57,43 139,90	27,94 155,61
2.000	114,46	113,27	100,64 128,51	85,49 139,50	75,15 143,96	62,05 150,64	31,15 165,81
5.000	125,19	124,01	110,17 140,63	93,57 152,78	82,42 157,86	68,13 165,19	37,49 181,79
10.000	133,17	131,76	117,04 149,50	98,88 162,58	87,11 167,95	72,18 176,12	38,71 192,99
20.000	141,48	140,08	124,35 158,90	105,19 172,84	92,61 178,59	76,20 186,98	45,09 205,59
50.000	152,64	151,09	134,27 171,25	114,09 186,19	100,45 192,29	82,85 201,23	44,01 223,87

Wiederkehrperiode [a]	Abflussverteilung Kennwerte [m ³ /s]						
	Median	Mittelwert	25 % 75 %	10 % 90 %	5 % 95 %	1 % 99 %	Min Max
100.000	160,72	158,97	141,32 180,29	119,61 196,00	105,01 202,53	86,61 212,02	46,59 233,81

Tab. 7.3 zeigt die wesentlichen Ergebnisse der Simulationen aufgeschlüsselt nach Wiederkehrperioden. Durchgehend sind die Medianwerte etwas größer als die arithmetischen Mittelwerte und die Verteilung somit linksschief, wenn auch nur geringfügig. Die angegebenen Minimal- bzw. Maximalwerte sollen ein Gefühl für die Spannweite der Verteilung geben, sind aber numerisch eher instabil.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abb. 7.3 einfach logarithmisch dargestellt. Gut erkennbar ist die annähernde Symmetrie der Konfidenzintervalle um den Medianwert herum sowie die numerische Instabilität der Minimal- bzw. Maximalwerte. Der Unterschied zwischen Median- und arithmetischem Mittelwert ist kaum erkennbar.

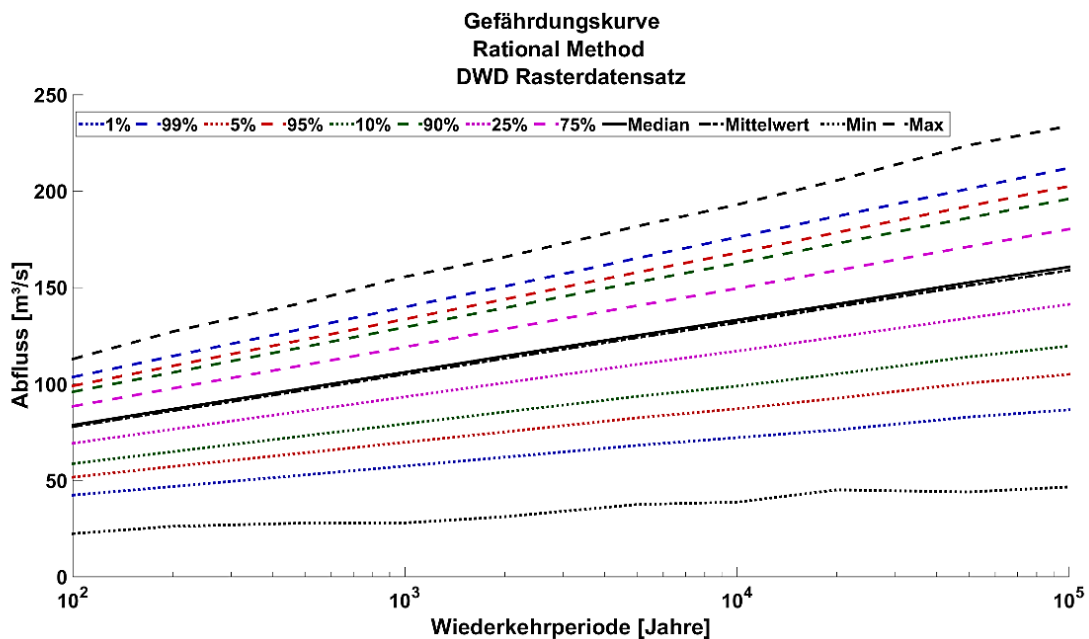


Abb. 7.3 Gefährdungskurve als Ergebnis der probabilistischen Betrachtungen für die Rational Method in Verbindung mit Niederschlagswerten aus der Extrapolation des DWD-Rasterdatensatzes

7.2.2 Ergebnisse unter Verwendung aus Tagesniederschlägen abgeleiteter Werte

Die Simulationen und Auswertungen wurden gemäß Kap. 6 durchgeführt. Im Einzelnen wurden für jede der zehn betrachteten Wiederkehrperioden acht unterschiedliche Niederschlagsdauern untersucht. Jede dieser 80 Kombinationen wurde für die drei unterschiedlichen Niederschlagsprofile (anfangs-, mitten- und endbetont) jeweils 5.000-mal simuliert, so dass sich für jede Wiederkehrperiode 120.000 Simulationen und insgesamt 1.200.000 Simulationen ergeben.

Für jede Wiederkehrperiode wurden aus den Ergebnissen empirische Verteilungsfunktionen ermittelt. Daraus wurden Medianwerte, arithmetische Mittelwerte und verschiedene Konfidenzintervalle (1 bis 99 %, 5 bis 95 %, 10 bis 90 % und 25 bis 75 %) abgeleitet.

Tab. 7.4 zeigt die wesentlichen Ergebnisse der Simulationen aufgeschlüsselt nach Wiederkehrperioden. Durchgehend sind die Medianwerte etwas größer als die arithmetischen Mittelwerte und die Verteilung somit linksschief, wenn auch nur geringfügig. Die Konfidenzintervalle sind nahezu symmetrisch um den Medianwert verteilt. Die angegebenen Minimal- bzw. Maximalwerte sollen ein Gefühl für die Spannbreite der Verteilung geben, sind aber numerisch eher instabil.

Tab. 7.4 Zusammenstellung wesentlicher Ergebnisse der Gefährdungsanalyse bei Verwendung der Rational Method und Niederschlägen, die aus Tagesniederschlägen abgeleitet wurden

Wiederkehrperiode [a]	Abflussverteilung Kennwerte [m³/s]						
	Median	Mittelwert	25 % 75 %	10 % 90 %	5 % 95 %	1 % 99 %	Min Max
100	31,60	31,49	27,67 35,50	23,86 38,99	21,44 40,92	17,25 44,31	9,59 53,31
200	35,05	34,94	30,68 39,40	26,43 43,30	23,77 45,46	19,20 49,25	9,95 58,16
500	39,92	39,80	34,93 44,92	30,10 49,37	27,05 51,87	21,82 56,21	10,40 69,39
1.000	43,71	43,60	38,22 49,21	32,88 54,17	29,49 56,96	23,81 61,83	11,20 74,77
2.000	47,56	47,43	41,56 53,57	35,77 58,90	32,13 61,95	25,74 67,25	13,30 79,38

Wiederkehr- periode [a]	Abflussverteilung Kennwerte [m ³ /s]						
	Median	Mittel wert	25 % 75 %	10 % 90 %	5 % 95 %	1% 99 %	Min Max
5.000	52,82	52,73	46,24 59,52	39,90 65,52	35,83 68,93	28,65 75,01	13,80 93,29
10.000	57,01	56,85	49,80 64,24	42,86 70,71	38,41 74,39	30,66 80,88	16,71 101,37
20.000	61,17	61,05	53,43 68,91	46,11 75,89	41,51 79,92	33,13 87,04	17,19 104,65
50.000	67,00	66,89	58,60 75,53	50,57 83,18	45,31 87,58	35,90 95,26	19,58 115,50
100.000	71,39	71,24	62,33 80,49	53,68 88,70	48,23 93,39	38,30 101,64	17,75 123,44

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abb. 7.4 einfach logarithmisch dargestellt. Der Unterschied zwischen Median- und arithmetischem Mittelwert ist so gering, dass sie graphisch nicht unterscheidbar sind. Gut erkennbar sind die annähernde Symmetrie der Konfidenzintervalle um den Medianwert herum sowie die numerische Instabilität der Minimal- bzw. Maximalwerte.

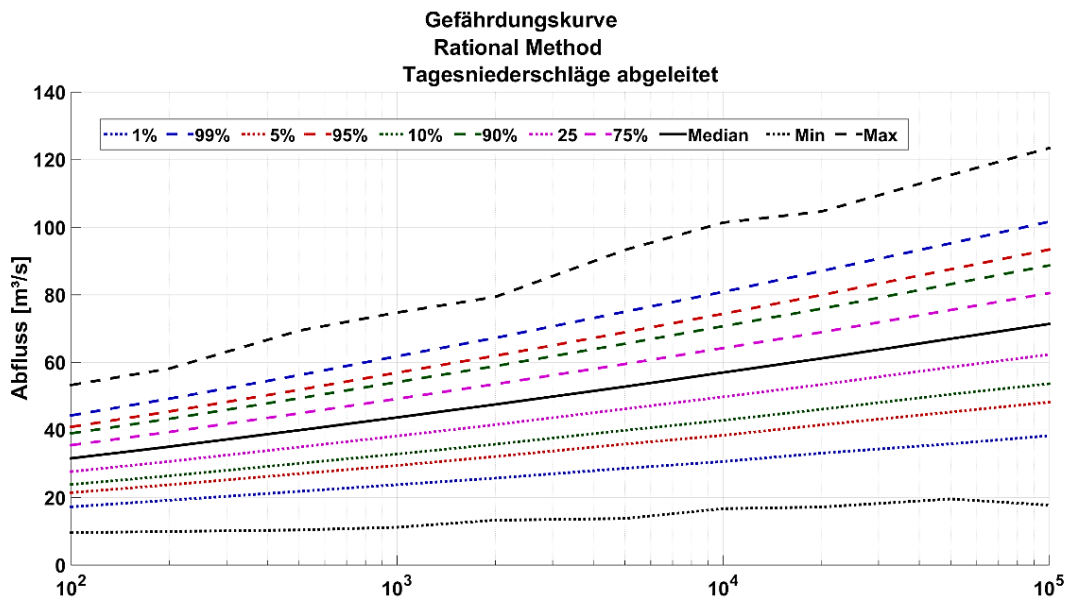


Abb. 7.4 Gefährdungskurve als Ergebnis der probabilistischen Betrachtungen für die Rational Method in Verbindung mit aus der Extrapolation von Tagesniederschlägen abgeleiteten Niederschlägen

7.3 Gesamtergebnis

Für jede Wiederkehrperiode wurden aus den Ergebnissen der vier Nebenäste des logischen Baums empirische Verteilungsfunktionen gebildet. Daraus wurden Medianwerte, arithmetische Mittelwerte und verschiedene Konfidenzintervalle (1 bis 99 %, 5 bis 95 %, 10 bis 90 % und 25 bis 75 %) abgeleitet.

Tab. 7.5 zeigt die wesentlichen Ergebnisse der Simulationen aufgeschlüsselt nach Wiederkehrperioden. Durchgehend sind die Medianwerte kleiner als die arithmetischen Mittelwerte und die Verteilung somit rechtsschief. Dies ist auch in der Asymmetrie der unterschiedlichen Konfidenzintervalle zu erkennen. Die angegebenen Minimal- bzw. Maximalwerte sollen ein Gefühl für die Spannbreite der Verteilung geben, sind aber numerisch eher instabil.

Tab. 7.5 Zusammenstellung wesentlicher Ergebnisse der Gefährdungsanalyse bei Einbeziehung aller vier Nebenäste

Wiederkehrperiode [a]	Abflussverteilung Kennwerte [m ³ /s]						
	Median	Mittelwert	25 % 75 %	10 % 90 %	5 % 95 %	1 % 99 %	Min Max
100	32,47	38,59	18,58 58,28	4,92 82,28	3,10 90,93	1,39 99,81	0,02 112,94
200	37,20	44,09	22,30 67,25	6,48 91,19	4,23 100,56	2,04 110,31	0,07 127,21
500	43,97	51,74	27,41 79,20	8,89 103,19	6,06 113,37	3,15 124,21	0,08 142,34
1.000	49,33	57,85	31,34 88,63	10,99 112,72	7,67 123,49	4,16 135,16	0,43 165,63
2.000	54,91	64,17	35,46 97,99	13,41 122,52	9,53 133,93	5,32 146,12	0,45 182,40
5.000	62,56	72,78	40,95 110,24	16,98 135,93	12,24 147,97	6,99 161,46	0,84 214,11
10.000	68,72	79,47	45,17 119,42	20,02 145,96	14,62 158,62	8,50 173,67	1,15 232,87
20.000	74,93	86,51	49,52 129,10	23,17 157,05	17,12 170,21	10,29 186,69	1,27 248,58
50.000	83,70	96,14	55,70 141,94	28,05 171,74	20,95 185,60	12,74 205,90	2,01 281,39

Wiederkehrperiode [a]	Abflussverteilung Kennwerte [m ³ /s]						
	Median	Mittelwert	25 % 75 %	10 % 90 %	5 % 95 %	1 % 99 %	Min Max
100.000	90,59	103,54	60,25 151,49	31,97 183,31	24,07 197,57	14,79 223,06	1,99 304,39

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abb. 7.5 einfach logarithmisch dargestellt. Der Unterschied zwischen Median- und arithmetischem Mittelwert im Gesamtergebnis ist deutlich erkennbar. Die Konfidenzintervalle weisen eine deutliche Asymmetrie auf. Erkennbar ist auch die numerische Instabilität der Maximalwerte, bedingt auch der Minimalwerte.

Bei Verwendung der Curve Number Method werden rechtsschiefe Verteilungen generiert, deren Medianwert unter dem arithmetischen Mittelwert liegt. Die Rational Method erzeugt hingegen leicht linksschiefe Verteilungen mit nur geringer Abweichung von Medianwert und arithmetischem Mittelwert. Daraus resultierend wird bei Gleichgewichtung der Methoden eine rechtsschiefe Verteilung generiert.

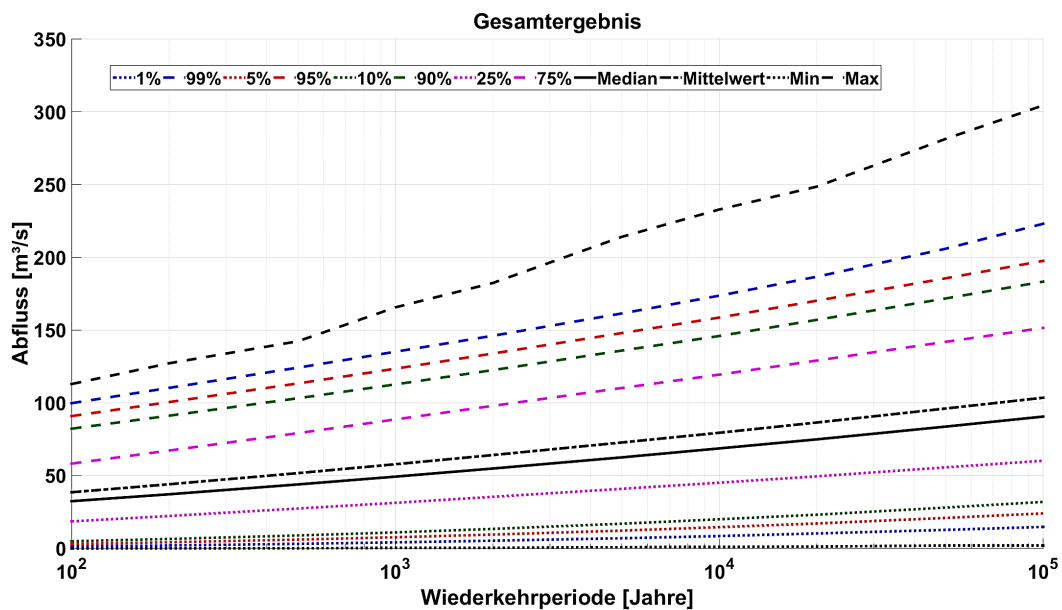


Abb. 7.5 Gefährdungskurve als Ergebnis der probabilistischen Betrachtungen für die Kombination aller vier Nebenäste

Methodenbedingt kommt es bei relativ geringen Niederschlägen zu kleineren Hochwasserabflüssen bei der Curve Number Method im Vergleich zur Rational Method. Dies liegt daran, dass die implizite und nicht-lineare Berücksichtigung des Rückhalts von

Niederschlagswasser im Einzugsgebiet bei der Curve Number Method stärker zum Tragen kommt als die im Wesentlichen lineare Berücksichtigung des Rückhalts bei der Rational Method. Dies betrifft vor allem die Median- und die arithmetischen Mittelwerte, jedoch sind auch die Breiten der Konfidenzintervalle betroffen. Bei relativ hohen Niederschlagswerten hingegen ist der Unterschied zwischen den Ergebnissen der Rational Method und der Curve Number Method sowohl hinsichtlich der Median- bzw. der arithmetischen Mittelwerte als auch hinsichtlich der Konfidenzintervalle nicht stark ausgeprägt.

Dies ist gut erkennbar in den resultierenden Wahrscheinlichkeitsdichten für unterschiedliche Wiederkehrperioden (siehe Abb. 7.6). Während sich bei 100-jährlichen Hochwassern, die durchgehend mit kleineren Niederschlägen verknüpft sind, die Wahrscheinlichkeitsdichten der Nebenäste „Rasterdatensatz des DWD – Curve Number Method (NA 1)“ und „Bestimmung aus Tagesniederschlägen – Rational Method (NA 4)“ überlagern und so den zweiten Peak der Wahrscheinlichkeitsdichte bilden (blaue Kurve), überlagern sich bei 100.000-jährigen Hochwassern, die mit durchgehend höheren Niederschlägen verknüpft sind, die Wahrscheinlichkeitsdichten der Nebenäste „Rasterdatensatz des DWD – Curve Number Method (NA 1)“ und „Rasterdatensatz des DWD – Rational Method (NA 2)“ und bilden damit den dritten sehr breiten Peak bei hohen Abflüssen aus (grüne Kurve).

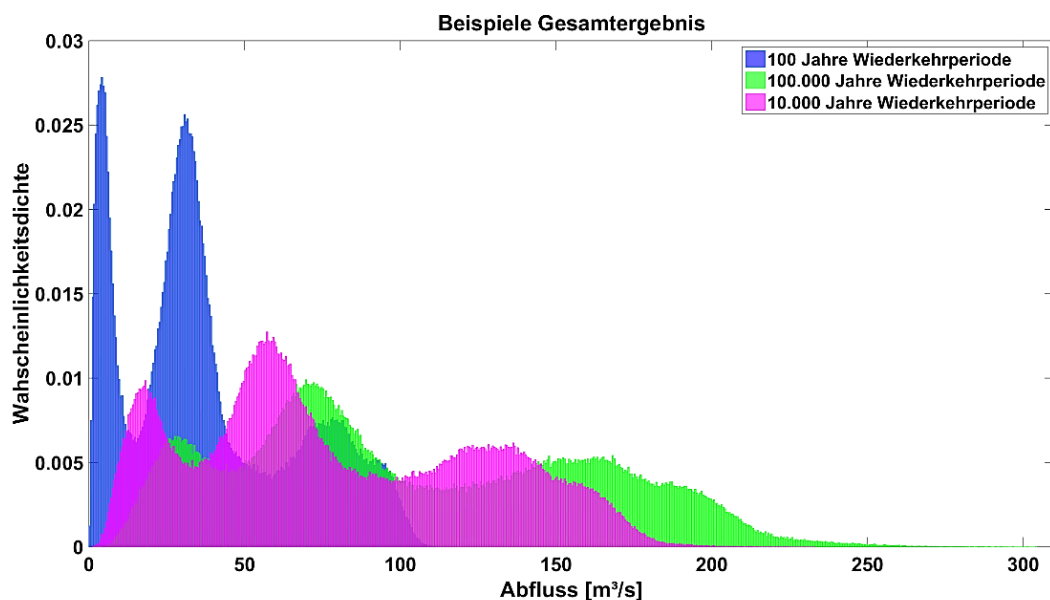


Abb. 7.6 Beispielhafte Darstellung der Wahrscheinlichkeitsdichten der Unsicherheiten für unterschiedliche Wiederkehrperioden des Gesamtergebnisses

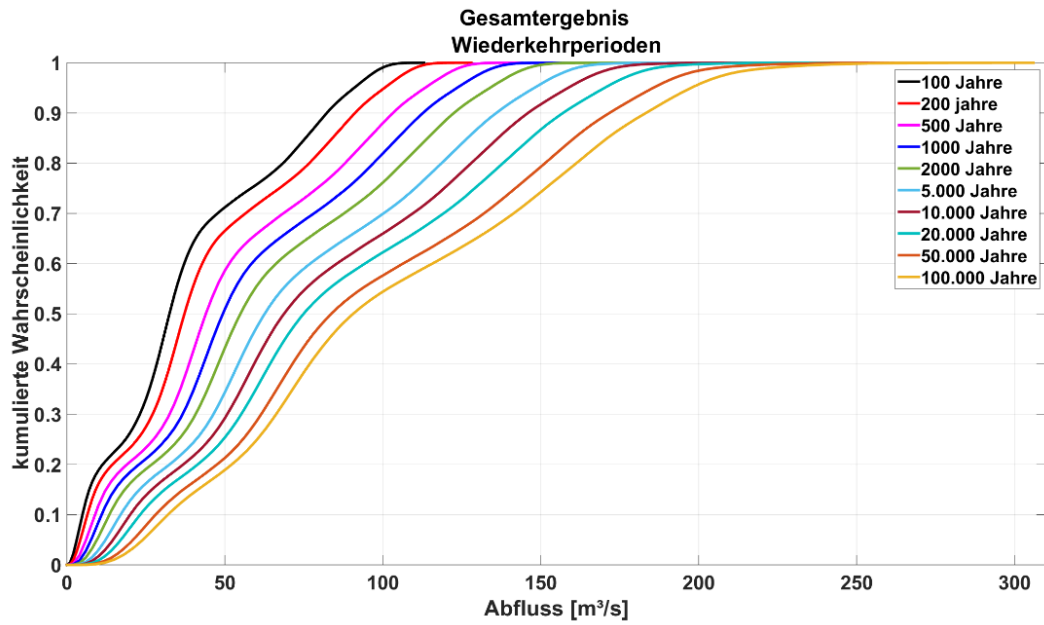


Abb. 7.7 Kumulierte Wahrscheinlichkeiten für alle simulierten Wiederkehrperioden

Im Endergebnis entsteht aus der Überlagerung aller Nebenäste jeweils eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für jede Wiederkehrperiode, die die volle Spannweite der Unsicherheiten für diese Wiederkehrperiode wiedergeben (siehe Abb. 7.7).

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Vorhabens RS1587 „Erarbeitung von Methoden zur Durchführung von Standortgefährdungsanalysen für Überflutungen aus kleinen und mittleren Einzugsgebieten (Phase I)“ wurde mit der Erstellung einer probabilistischen Standortgefährdungsanalyse für Hochwasser aus kleinen Einzugsgebieten begonnen. Da kleine Einzugsgebiete in der Regel nicht über eigene Pegelmessungen verfügen, existieren zumeist keine Pegeldata, die einer statistischen bzw. probabilistischen Analyse zugänglich wären. Daher wurde für die hier durchgeführten Arbeiten auf sogenannte Niederschlags-Abfluss-Beziehungen, die aus Niederschlägen resultierende Abflüsse ermitteln, zurückgegriffen.

Die Wahl für das Modellgebiet fiel dabei auf ein kleines Einzugsgebiet südlich der Sieg an der Landesgrenze von Nordrhein-Westfalen zu Rheinland-Pfalz, das typische Eigenschaften für ein kleines Einzugsgebiet im Mittelgebirgsraum erfüllt. Die Wahl eines kleinen Einzugsgebietes im Mittelgebirgsraum ergibt sich einerseits aus der Tatsache, dass kleine Einzugsgebiete eine wesentliche Überflutungsursache für KKW-Standorte darstellen können, andererseits daraus, dass wesentliche Gefährdungsmerkmale der Überflutungen aus kleinen Einzugsgebieten (Vorhersagezeitraum, Vorwarnzeiten, Fließgeschwindigkeiten, etc.) sich von den Flusshochwässern größerer Flüsse stark unterscheiden und besonders ausgeprägt im Mittelgebirgsraum auftreten. Die Charakterisierung des Einzugsgebietes umfasste unter anderem die Gefälle, die Grenzen des Einzugsgebietes und die Flächen. Zudem wurde die Flächennutzung (Bewuchsformen und -arten bzw. Bebauung) und die Bodeneigenschaften (Versickerungseigenschaften) ermittelt (siehe Kap. 3).

Zur Durchführung einer probabilistischen Standortgefährdungsanalyse sind im Unterschied zu einer statistischen Standortgefährdungsanalyse mehrere Methoden anzuwenden, um nicht nur die aleatorischen Unsicherheiten (statistische Unsicherheiten), die sich aus zeitlich begrenzten Datenreihen ergeben, sondern auch epistemische Unsicherheiten, die sich aus der Wahl der Methode zur Auswertung der Daten ergeben, zu erfassen. Aus diesem Grund wurden zuerst zwei Methoden zur Ermittlung von Niederschlägen geringer Überschreitenswahrscheinlichkeiten

- Niederschläge als Extrapolation des DWD-Rasterdatensatzes Kostra DWD 2010R /DWD 15/ mittels Exponentialverteilung bzw.

- Extrapolation von Tagesniederschlägen einer naheliegenden Wetterstation mit anschließender Ableitung von Niederschlägen kürzerer Zeitdauer

angewandt (siehe Kap. 4). Im Ergebnis dieser Untersuchungen wurden deutliche qualitative und quantitative Unterschiede zwischen den Ergebnissen beider Methoden festgestellt. Insbesondere im Niederschlagsdauerbereich von 45 bis 240 Minuten, die sehr relevant sind für die Ausbildung großer Hochwasser in kleinen Einzugsgebieten unterscheiden sich die Ergebnisse beider Methoden stark voneinander. Dabei sind die Niederschläge, die sich aus der Extrapolation des DWD-Rasterdatensatzes ergeben, konsistent höher als die Werte, die mit der anderen Methode ermittelt wurden.

Zudem wurden ebenso zwei Methoden zur Ableitung von aus den Niederschlägen resultierenden Abflüssen (Curve Number Method und Rational Method) in diesem Forschungsvorhaben verwendet. Aus der Erfassung des Einzugsgebietes (siehe Kap. 3) ergeben sich die wesentlichen Eingabeparameterbereich für die Niederschlags-Abfluss-Beziehungen. Der Einfluss der Eingabeparameter auf die Simulationsergebnisse und die Unsicherheiten bei deren Ermittlung wurden diskutiert. Da sowohl die Curve Number Method als auch die Rational Method im engeren Sinn deterministische Verfahren sind, wurden sie durch Variation der Eingabeparameter mittels eines Monte-Carlo-Verfahrens und vielfacher Simulation einer probabilistischen Analyse zugänglich gemacht. Resultierende Abflüsse aus verschiedenen Gewässern werden in ihrem zeitlichen Verlauf erfasst und am Analysepunkt überlagert (siehe Kap. 5).

Zur Überlagerung einzelner Analysewege kam ein logischer Baum zum Einsatz. Im Rahmen dieses Vorhabens wurden ausschließlich gleichgewichtete Ansätze verwendet, d. h. jede einzelne Simulation hat das gleiche Gewicht ebenso wie alle daraus aggregierten Teilergebnisse gleicher Art. Da die Gewichtungsschemata, die hierbei zum Einsatz kamen, potenziell einen großen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben, wurden diese näher untersucht (Kap. 6). Im Ergebnis dieser Untersuchungen ist festzustellen, dass keine objektiven Gründe vorliegen, um zu anderen Gewichtungsschemata überzugehen, da entsprechende Untersuchungen zu Verteilungen von Niederschlagsmustern und -dauern sowie zur Zuverlässigkeit einzelner Methoden (vor allem der Niederschlagsermittlung) bzw. Methodenkombinationen im Rahmen dieses Vorhabens nicht durchgeführt werden konnten.

Im Endergebnis wurde eine Gefährdungskurve für den gewählten Analysepunkt erstellt, die alle im Rahmen dieses Vorhabens erfassten Unsicherheiten beinhaltet (Kap. 7). Die

Einflüsse der verschiedenen Methoden zur Niederschlagsermittlung wurden diskutiert, und lassen sich kurz, aber recht einfach und ersichtlich wie folgt zusammenfassen: Kleinere Niederschläge führen zu kleineren Abflüssen, so dass dies eine wesentliche Quelle für die Unsicherheitsbandbreite der Ergebnisse ist. Weitere bedeutende Quellen für die Unsicherheitsbandbreite der Ergebnisse sind die Gewichtungsschemata im logischen Baum.

In der Gesamtschau der durchgeführten Arbeiten ist festzustellen, dass wesentliche Unsicherheitsquellen identifiziert wurden. Diese können zum Teil zumindest potenziell genauer quantifiziert werden. Dazu sind aus Sicht der GRS insbesondere

- ein besseres Verständnis der Eingabeparameter und deren statistische Verteilung mit dem Ziel einer Objektivierung der Experteneinschätzungen,
- ein genaueres Verständnis zu Niederschlagshöhen, -dauern und -profilen, welches insbesondere mehr Untersuchungen zu Niederschlägen und andere Methoden zur Ermittlung von Niederschlagshöhen erfordert, um auch hier epistemische Unsicherheiten besser abdecken zu können,
- diversifizierte Methoden zur Ermittlung von Hochwasserabflüssen aus Niederschlägen, um die Hochwasserdynamiken und die Bandbreite der Methodenergebnisse besser einordnen zu können sowie
- objektive, möglichst quantifizierbare Kriterien zur Auswahl der zu verwendenden Gewichtungsschemata, die sich zum Teil aus den methodischen Untersuchungen der ersten drei Punkte ergeben können,

erforderlich.

Zur Untersuchung der oben identifizierten Punkte, die aus Sicht der GRS eines tieferen Verständnisses bedürfen, beabsichtigt die GRS daher in einer Phase Ib zunächst die oben identifizierten Punkte für ein kleines Einzugsgebiet zu untersuchen, bevor die Untersuchungen auf ein Einzugsgebiet mittlerer Größe ausgeweitet werden (Phase II). Die Beschränkung auf ein kleines Einzugsgebiet erfolgt auch vor dem Hintergrund, dass der Aufwand für die Modellierung eines Einzugsgebietes mit der Größe des Einzugsgebietes skaliert und der direkte Übergang zu einem Einzugsgebiet mittlerer Größe einen hohen Modellierungsaufwand bedeutet und die angestrebten methodischen Untersuchungen dabei parallel durchgeführt werden müssten.

Das übergeordnete Ziel des geplanten Forschungs- und Entwicklungsvorhabens (Phase Ib) besteht daher in der Weiterentwicklung und Erweiterung von Methoden und Werkzeugen für Sicherheitsbewertungen eines gesamten Kernkraftwerksstandorts nach Stand von Wissenschaft und Technik für die übergreifende Einwirkung von außen „Überflutung aus kleinen und mittleren Einzugsgebieten“. Hierzu sollen derzeit noch bestehende Wissenslücken geschlossen werden und anderweitig etablierte Verfahren auf die Einwirkung „Überflutung aus kleinen und mittleren Einzugsgebieten“ übertragen werden.

Dementsprechend haben die beabsichtigten Arbeiten mehrere Teilziele, die im Folgenden genauer beschrieben werden.

Das erste Teilziel der beabsichtigten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten umfasst Untersuchungen zu Eingabeparametern und deren statistischen Verteilungen, um objektivere Kriterien für die Auswahl und die Simulation zu erhalten. Dies dient auch zur Erfüllung des vierten Teilziels.

Das zweite Teilziel der geplanten Forschungs- und Entwicklungsarbeit ist, mittels weiterer Forschungsarbeiten zur Ableitung von Niederschlägen kurzer Zeitdauer identifizierte weitere Methoden umzusetzen, um so eine breitere Eingangsdatenbasis der nachfolgenden Analyseschritte zu schaffen. Dadurch werden zudem die probabilistischen Grundlagen der Ableitungen der anzusetzenden Gebietsniederschläge erweitert und die Überlegungen zum vierten Teilziel unterstützt.

Das dritte Teilziel des geplanten Forschungs- und Entwicklungsvorhabens ist, zusätzliche – komplexe und softwarebasierte – Methoden, die eine Ableitung von Hochwasserereignissen aus Niederschlägen ermöglichen, in die bereits vorliegende probabilistische Hochwassergefährdungsanalyse für ein kleines Einzugsgebiet einzubinden. Dadurch werden zudem die probabilistischen Grundlagen der Ableitungen von Hochwasserabflüssen erweitert und die Überlegungen zum vierten Teilziel unterstützt.

Das vierte Teilziel des geplanten Forschungs- und Entwicklungsvorhabens umfasst Untersuchungen zu möglichst objektiven und quantifizierbaren Kriterien zur Nutzung von Gewichtungsschemata in einer probabilistischen Standortgefährdungsanalyse.

Das angestrebte Ergebnis dieser Untersuchungen ist eine Methode zur Analyse der Standortgefährdung, die den in RS1587 entwickelten methodischen Ansatz für die Durchführung einer probabilistischen Hochwassergefährdungsanalyse entsprechend

dem Stand von Wissenschaft und Technik systematisch und umfassend weiterentwickelt und erprobt. Eine solche Analyse kann als Grundlage zur Bewertung der Anlagenrobustheit oder als Eingangsuntersuchung für eine detaillierte PSA verwendet werden.

Insgesamt werden die geplanten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten die Fachkompetenz der beteiligten Fachleute im Hinblick auf die Durchführung von Standortgefährdungsanalysen erhöhen, die Aussagefähigkeit in Bezug auf naturbedingte Einwirkungen von außen verbessern und damit auch Kompetenzen zur Bewertung entsprechender Vorgehensweisen im Ausland aufbauen. Zudem können die gewonnenen Erkenntnisse auch in der internationalen Zusammenarbeit zur Förderung der nuklearen Sicherheit eingesetzt werden.

Literaturverzeichnis

- /ASN 13/ Autorité de sûreté nucléaire (ASN): Guide N° 13 – Protection des installations nucléaires de base contre les inondations externes. Guides de l'ASN, Version 08/01/2013, Paris, 2023.
- /BMWi 18/ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): Innovationen für die Energiewende 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung, Berlin, September 2018, [7. Energieforschungsprogramm \(bmwk.de\)](https://www.bmwk.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Energie/7_Energieforschungsprogramm.pdf?__blob=publicationFile)
- /BMWi 21/ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): BMWi-Forschungsförderung zur nuklearen Sicherheit, Projektförderprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie zur Sicherheitsforschung für kerntechnische Anlagen, 2021-2025, Berlin, Januar 2021, [BMWi-Forschungsförderung zur nuklearen Sicherheit \(bmwk.de\)](https://www.bmwk.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Energie/BMWi-Forschungsforderung-zur-nuklearen-Sicherheit.pdf?__blob=publicationFile)
- /BRI 09/ Van den Brink, H. W., G. P. Können: Estimating 10.000-year return values from short time series. International Journal of Climatology, 2009.
- /CAM 18/ Campo-Arnaíz, V., et al.: Weiterführende Untersuchungen zur deterministischen Bewertung naturbedingter Einwirkungen von außen auf Kernkraftwerke. GRS – 474, ISBN 978-3-946607-57-1, September 2018.
- /CWS 22/ CivilWeb Spreadsheets: Kirpich Formula, Kirpich Formula - CivilWeb Drainage Design Spreadsheets (civilweb-spreadsheets.com), zuletzt abgerufen Oktober 2022.
- /DWD 15/ Deutscher Wetterdienst (DWD): KOSTRA-DWD-2010 Starkniederschlagshöhen für Deutschland (Bezugszeitraum 1951 bis 2010). 2015, KOSTRA-DWD-Grundlagenbericht 2005.
- /HAW 02/ Hawkins, R. H., et al.: Runoff Curve Number Method: Examination of the Initial Abstraction Ratio. Proceedings of the Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, Las Vegas, NV, USA, 42 (3): 629–643, 2006, doi:10.1111/j.1752-1688.2006.tb04481.x. S2CID 130013737.

- /MAI 22/ Maine Department of Environmental Protection: Appendix A-1: Runoff Peak Discharge Calculations. Microsoft Word - appendix A feb 2016.docx (maine.gov), zuletzt abgerufen Oktober 2022
- /MON 16/ Monjo, R.: Measure of rainfall time structure using the dimensionless n-index, Clim Res 67: 71–86, 2016, 04.02.2016.
- /NAG 16/ Nagy, E. et al.: Comparing Methods for Computing the Time of Concentration in a Medium-Sized Hungarian Catchment, Slovak Journal of Civil Engineering, December 2016, DOI: 10.1515/sjce-2016-0017.
- /NRC 19/ United States Nuclear Regulatory Commission (NRC): Vorträge beim 4th Probabilistic Flooding Hazard Assessment Workshop, Rockville, MD, USA, 30.04.2019 bis 02.05.2019, <https://www.nrc.gov/docs/ML1915/ML19156A446.html>.
- /NRW 20/ Geschäftsstelle des IMA GDI Nordrhein-Westfalen: Geoportal.NRW, GEOportal.NRW, zuletzt abgerufen Oktober 2022.
- /PRA 19/ Prasad, R. et al.: Structured Hazard Assessment Committee Process for Flooding (SHAC-F), Vortrag beim 4th PFHA Workshop, Rockville, MD, USA, 30.04.2019 bis 02.05.2019, <https://www.nrc.gov/docs/ML1915/ML19156A467.pdf>.
- /RLP 20/ GDI-RP: Geoportal.RLP. Geoportal RLP, zuletzt abgerufen im Oktober 2022.
- /ROE 17/ Röwekamp, M., et al.: Methoden zur Bestimmung des standort- und anlagenspezifischen Risikos eines Kernkraftwerks durch übergreifende Einwirkungen / Estimation of the Site and Plant Specific Risk of a Nuclear Power Plant from Hazards, Technischer Fachbericht / Technical Report, GRS-A-3888, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, Juni 2017.

- /ROE 18/ Roewekamp, M., et al.: Systematic Approach for Comprehensive Consideration of Hydrological Hazards in Level 1 PSA, Paper 265, in: Proceedings of 14th International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference (PSAM14), Los Angeles, CA, USA, September 2018.
- /SIM 14/ Simpson, D.: In Defence of the Rational Method, Stormwater 2014: 3rd National Conference on Urban Water Management, Adelaide 13-17 October 2014, Preparation of Papers for AIAA Technical Conferences (stormwater.asn.au).
- /SPE 13/ Sperbeck, S., et al.: Deterministische Untersuchung der Widerstandsfähigkeit deutscher Kernkraftwerke gegen Einwirkungen von außen, unter Berücksichtigung aktueller Erkenntnisse hinsichtlich der anzusetzenden Einwirkungen, GRS-A-3693, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, November 2013.
- /USD 86/ United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service: Urban Hydrology for Small Watersheds. TR-55, Juni 1986, TN1315 - USDA (U.S. Department of Agriculture), 1986, Urban Hydrology for Small Watersheds, Technical Release 55, Natural Resources Conservation Service, Washington, DC, USA (nrc.gov).
- /USD 07/ United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service: Part 630 Hydrology, National Engineering Handbook, Chapter 16, Hydrographs, März 2007, OpenNonWebContent.aspx (usda.gov).
- /USD 10/ United States Department of Agriculture: Part 630 Hydrology, National Engineering Handbook, Chapter 15, Time of Concentration, 2010 <https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=27002.wba>.

- /UTS 19/ Utschick, M., et al.: Methodological Approach for a Hydrological Hazards PSA for a Multi-Unit Multi-Source Site, Paper 27162, in: Proceedings of ANS PSA 2019 International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment and Analysis, Charleston, SC, USA, April 27 – May 3, 2019, on CD-ROM, American Nuclear Society, LaGrange Park, IL, USA, 2019.
- /WIL 05/ Wilson, P. W., and Toumi, R.: A fundamental probability distribution for heavy rainfall, Geophysical Research Letters 32: L14812.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	Übersicht über das betrachtete Einzugsgebiet, Unterteilung in Teileinzugsgebiete (TEG) und wesentliche Wasserläufe (digitales Orthophoto aus Geoportal.NRW /NRW 20/)	8
Abb. 4.1	Beispielhafte Darstellung der Extrapolation der oberen und unteren Grenze der DWD-Rasterdaten für fünfminütige Niederschläge	12
Abb. 4.2	Beispielhafte Darstellung der Ergebnisse aus 5.000-facher Simulation der 5-Minuten-Niederschläge für Wiederkehrperioden 100, 10.000 und 100.000 Jahre	15
Abb. 4.3	Darstellung der Differenzen von Unter- bzw. Obergrenze der Extrapolation aus DWD-Rasterdatensatz mit den Minimal- bzw. Maximalwerten der Ermittlung aus Tagesniederschlagsextrapolationen für fünfminütige bzw. 720-minütige Zeitdauerstufe	16
Abb. 4.4	Vergleich Obergrenze mit dem Maximalwert für verschiedene Zeitdauerstufen und Wiederkehrperioden	16
Abb. 4.5	Beispielhafte Darstellung eines mittenbetonten synthetischen Niederschlags-Zeit-Verlaufs mit einer Niederschlagsdauer von 12 Stunden (720 Minuten)	17
Abb. 5.1	Darstellung der kumulierten Wahrscheinlichkeitsverteilung für das Teileinzugsgebiet II, die sich aus den Überlegungen ergibt	22
Abb. 5.2	Vergleich der sich ergebenden Rückhalte aus Gl. 4.2 bzw. 4.3	24
Abb. 5.3	Vergleich zwischen Niederschlagswerten und für den Abfluss wirksam werdenden Niederschlagsanteilen	24
Abb. 5.4	Beispielhafte Darstellung für einen dimensionslosen Unit Hydrograph /USD 07/	29
Abb. 5.5	Beispielhafte Darstellung eines Simulationsergebnisses	32
Abb. 5.6	Beispielhafte Darstellung eines Hydrographen für die Verwendung bei Nutzung der Rational Method	36
Abb. 6.1	Beispielhafter Vergleich der Simulationsergebnisse für ein 100-jähriges Hochwasser mit der Curve Number Method	38
Abb. 6.2	Beispielhafter Vergleich verschiedener Gewichtungsschemata für Simulationsergebnisse für ein 100-jähriges Hochwasser mit der Curve Number Method	39

Abb. 6.3	Beispielhafter Vergleich der Simulationsergebnisse für ein 100.000-jähriges Hochwasser mit der Rational Method	40
Abb. 6.4	Beispielhafter Vergleich der Simulationsergebnisse für ein 100-jähriges Hochwasser mit unterschiedlichen Niederschlagsdauern (Curve Number Method)	42
Abb. 6.5	Beispielhafter Vergleich zweier verschiedener Gewichtungsschemata für die Simulationsergebnisse	42
Abb. 6.6	Beispielhafte Darstellung der Abflussverteilung unter Verwendung der Curve Number Method mit 720-minütigen Niederschlägen, die aus Tagesniederschlägen abgeleitet wurden	43
Abb. 6.7	Beispielhafte Darstellung der Abflussverteilung unter Verwendung der Rational Method mit 720-minütigen Niederschlägen, die aus Tagesniederschlägen abgeleitet wurden.....	44
Abb. 6.8	Beispielhafte Darstellung der Abflussverteilung unter Verwendung der Curve Number Method mit 720-minütigen Niederschlägen, die aus dem DWD-Rasterdatensatz extrapoliert wurden	44
Abb. 6.9	Beispielhafte Darstellung der Abflussverteilung unter Verwendung der Curve Number Method mit 720-minütigen Niederschlägen, die aus dem DWD-Rasterdatensatz extrapoliert wurden	45
Abb. 7.1	Gefährdungskurve als Ergebnis der probabilistischen Betrachtungen für die Curve Number Method in Verbindung mit der Extrapolation des DWD-Rasterdatensatzes.....	49
Abb. 7.2	Gefährdungskurve als Ergebnis der probabilistischen Betrachtungen für die Curve Number Method in Verbindung mit aus Tagesniederschlägen abgeleiteten Werten	51
Abb. 7.3	Gefährdungskurve als Ergebnis der probabilistischen Betrachtungen für die Rational Method in Verbindung mit Niederschlagswerten aus der Extrapolation des DWD-Rasterdatensatzes	53
Abb. 7.4	Gefährdungskurve als Ergebnis der probabilistischen Betrachtungen für die Rational Method in Verbindung mit aus der Extrapolation von Tagesniederschlägen abgeleiteten Niederschlägen.....	55
Abb. 7.5	Gefährdungskurve als Ergebnis der probabilistischen Betrachtungen für die Kombination aller vier Nebenäste	57
Abb. 7.6	Beispielhafte Darstellung der Wahrscheinlichkeitsdichten der Unsicherheiten für unterschiedliche Wiederkehrperioden des Gesamtergebnisses	58

Abb. 7.7	Kumulierte Wahrscheinlichkeiten für alle simulierten Wiederkehrperioden	59
----------	--	----

Tabellenverzeichnis

Tab. 5.1	Ergebnisse der Untersuchungen zur Time of Concentration für das Teileinzugsgebiet I.....	21
Tab. 5.2	Ergebnisse der Untersuchungen zur Time of Concentration für das Teileinzugsgebiet II.....	21
Tab. 5.3	Ergebnisse der Untersuchungen zur Time of Concentration für das Teileinzugsgebiet III.....	21
Tab. 5.4	Beispieltabelle für die Bestimmung der Curve Number nach /USD 86/	25
Tab. 5.5	Ergebnisse der Untersuchungen zur Laufzeit für das Teileinzugsgebiet I bis zum Gebietsauslass.....	31
Tab. 5.6	Ergebnisse der Untersuchungen zur Laufzeit für das Teileinzugsgebiet II bis zum Gebietsauslass.....	31
Tab. 5.7	Beispieltabelle aus /MAI 22/ zur Zuordnung von dimensionslosen Koeffizienten C für verschiedene Nutzungs- und Bewuchsformen. Unterschieden wird zudem noch nach hydrologischer Bodengruppe und mittlerer Flächenneigung.....	34
Tab. 7.1	Zusammenstellung wesentlicher Ergebnisse der Gefährdungsanalyse bei Verwendung der Curve Number Method und Niederschlägen, die aus dem DWD-Rasterdatensatz extrapoliert wurden.....	48
Tab. 7.2	Zusammenstellung wesentlicher Ergebnisse der Gefährdungsanalyse bei Verwendung der Curve Number Method und Niederschlägen, die aus Tagesniederschlägen abgeleitet wurden.....	50
Tab. 7.3	Zusammenstellung wesentlicher Ergebnisse der Gefährdungsanalyse bei Verwendung der Rational Method und Niederschlägen, die aus dem DWD-Rasterdatensatz extrapoliert wurden.....	52
Tab. 7.4	Zusammenstellung wesentlicher Ergebnisse der Gefährdungsanalyse bei Verwendung der Rational Method und Niederschlägen, die aus Tagesniederschlägen abgeleitet wurden.....	54
Tab. 7.5	Zusammenstellung wesentlicher Ergebnisse der Gefährdungsanalyse bei Einbeziehung aller vier Nebenäste	56

Tab. A.1	Untergrenze der Niederschläge in Millimeter aus DWD-Rasterdatensatzextrapolation für verschiedene Zeitdauerstufen und Wiederkehrperioden	81
Tab. A.2	Obergrenze der Niederschläge in Millimeter aus DWD-Rasterdatensatzextrapolation für verschiedene Zeitdauerstufen und Wiederkehrperioden	82
Tab. A.3	Minimalwert der Niederschläge in Millimeter aus der Extrapolation von Tagesniederschlägen für verschiedene Zeitdauerstufen und Wiederkehrperioden abgeleitet	83
Tab. A.4	Maximalwert der Niederschläge in Millimeter aus der Extrapolation von Tagesniederschlägen für verschiedene Zeitdauerstufen und Wiederkehrperioden abgeleitet	84

Abkürzungsverzeichnis

BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
DLT	Digitale Leittechnik
DWD	Deutscher Wetterdienst
NRW	Nordrhein-Westfalen
PHGA	Probabilistische Gefährdungsanalyse für Hochwasserereignisse
PSA	Probabilistische Sicherheitsanalyse
PSGA	Probabilistische seismische Gefährdungsanalyse
RLP	Rheinland-Pfalz
SCS	Soil Conservation Service
SHAC-F	Structured Hazard Assessment Committee für Flooding
USGS	United States Geological Survey
U.S. NRC	United States Nuclear Regulatory Commission

A Anhang

A.1 Empirische Formeln zur Bestimmung der Time of Concentration

Zur Bestimmung der „Time of Concentration“ werden verschiedene empirische Formeln verwendet, die nachfolgend dargestellt sind.

Formel nach Kirpich (1940) /CWS 22/:

$$T_c = 0,0078L^{0,77}S^{-0,385} \quad (\text{A.1-1})$$

mit T_c in Minuten, L der Länge des Bachlaufs von der Quelle bis zum (Teil-)Gebietsauslass in Fuß und S der Steigung des längsten Kanals in Fuß/Fuß.

Formel nach Haktanir und Sezen /NAG 16/:

$$T_c = 0,7473L_w^{0,841} \quad (\text{A.1-2})$$

mit T_c in Stunden und L_w der Länge der Hauptwasserlinie in Kilometer.

Formel nach Mata-Lima /NAG 16/:

$$T_c = 4A^{0,5}L_w^{0,5}H_m^{-0,5} \quad (\text{A.1-3})$$

mit T_c in Stunden, L_w der Länge der Hauptwasserlinie in Kilometer, A der Fläche in km^2 und H_m der Höhendifferenz der Hauptwasserlinie in m.

Formel nach Ven te Chow /NAG 16/:

$$T_c = 0,1602L_w^{0,64}S^{-0,32} \quad (\text{A.1-4})$$

mit T_c in Stunden, L_w der Länge der Hauptwasserlinie in Kilometer und S dem Gefälle (dimensionslos).

Formel nach Corps of Engineers /NAG 16/:

$$T_c = 0,191L_w^{0,7}S^{-0,19} \quad (\text{A.1-5})$$

mit T_c in Stunden, L_w der Länge der Hauptwasserlinie in Kilometer und S dem Gefälle.
(dimensionslos)

Formel nach Temez /NAG 16/:

$$T_c = 0,3 \left(\frac{L_w}{S^{0,25}} \right)^{0,76} \quad (\text{A.1-6})$$

Mit T_c in Stunden, L_w der Länge der Hauptwasserlinie in Kilometer und S dem Gefälle
(dimensionslos).

Formel nach Yen und Chow /NAG 16/:

$$T_c = 1,2 \left(\frac{nL_w}{S^{0,5}} \right)^{0,6} \quad (\text{A.1-7})$$

mit T_c in Stunden, L_w der Länge der Hauptwasserlinie in Kilometer, n als Manningkoeffizient der Rauheit in Sekunden je $\text{m}^{1/3}$ und S dem Gefälle (dimensionslos).

Formel nach Williams /NAG 16/:

$$T_c = 0,272 \frac{L_w^{0,77} A^{0,4}}{DS^{0,2}} \quad (\text{A.1-8})$$

mit T_c in Stunden, L_w der Länge der Hauptwasserlinie in Kilometer, A der Fläche des Einzugsgebiets in km^2 , D dem äquivalenten Kreisdurchmesser der Fläche A in km und S dem Gefälle (dimensionslos).

A.2 Daten zu Extrapolationsergebnissen von Niederschlägen

Tab. A.1 Untergrenze der Niederschläge in Millimeter aus DWD-Rasterdatensatzextrapolation für verschiedene Zeitdauerstufen und Wiederkehrperioden

		Wiederkehrperiode [a]									
		100	200	500	1.000	2.000	5.000	10.000	20.000	50.000	100.000
Zeitdauerstufe [min]	5	13,76	15,14	16,96	18,35	19,73	21,55	22,93	24,31	26,13	27,52
	10	19,52	21,36	23,79	25,64	27,48	29,91	31,75	33,59	36,02	37,87
	15	23,60	25,78	28,67	30,86	33,04	35,93	38,11	40,29	43,18	45,37
	20	26,80	29,28	32,55	35,03	37,50	40,77	43,25	45,73	49,00	51,48
	30	31,60	34,54	38,43	41,37	44,31	48,20	51,14	54,08	57,97	60,91
	45	36,88	40,39	45,02	48,53	52,03	56,66	60,17	63,68	68,31	71,82
	60	40,96	44,94	50,21	54,20	58,18	63,45	67,43	71,41	76,68	80,67
	90	43,44	47,54	52,96	57,06	61,16	66,58	70,68	74,78	80,20	84,30
	120	45,36	49,56	55,11	59,31	63,51	69,06	73,26	77,46	83,01	87,21
	180	48,32	52,65	58,38	62,72	67,05	72,78	77,11	81,44	87,17	91,51
	240	50,48	54,89	60,73	65,15	69,56	75,40	79,81	84,22	90,06	94,48
	360	53,84	58,39	64,42	68,97	73,52	79,55	84,10	88,65	94,68	99,23
	540	57,44	62,12	68,30	72,98	77,65	83,83	88,51	93,19	99,37	104,05
720	60,24	65,03	71,35	76,14	80,93	87,25	92,04	96,83	103,15	107,94	

Tab. A.2 Obergrenze der Niederschläge in Millimeter aus DWD-Rasterdatensatzextrapolation für verschiedene Zeitdauerstufen und Wiederkehrperioden

		Wiederkehrperiode [a]									
		100	200	500	1.000	2.000	5.000	10.000	20.000	50.000	100.000
Zeitdauerstufe [min]	5	20,64	22,90	25,89	28,16	30,42	33,41	35,67	37,93	40,92	43,19
	10	29,28	32,35	36,40	39,47	42,53	46,58	49,65	52,72	56,77	59,84
	15	35,40	39,06	43,89	47,55	51,20	56,03	59,69	63,35	68,18	71,84
	20	40,20	44,35	49,83	53,98	58,12	63,60	67,75	71,90	77,38	81,53
	30	47,40	52,32	58,81	63,73	68,65	75,14	80,06	84,98	91,47	96,39
	45	55,32	61,15	68,85	74,68	80,50	88,20	94,03	99,86	107,56	113,39
	60	61,44	68,02	76,72	83,31	89,89	98,59	105,17	111,75	120,45	127,04
	90	65,16	71,99	81,01	87,84	94,67	103,69	110,52	117,35	126,37	133,20
	120	68,04	75,07	84,36	91,39	98,42	107,71	114,74	121,77	131,06	138,09
	180	72,48	79,80	89,47	96,79	104,10	113,77	121,09	128,41	138,08	145,40
	240	75,72	83,23	93,15	100,66	108,16	118,08	125,59	133,10	143,02	150,53
	360	80,76	88,58	98,91	106,73	114,55	124,88	132,70	140,52	150,85	158,67
540	86,16	94,28	105,01	113,13	121,24	131,97	140,09	148,21	158,94	167,06	
720	90,36	98,73	109,79	118,16	126,53	137,59	145,96	154,33	165,39	173,76	

Tab. A.3 Minimalwert der Niederschläge in Millimeter aus der Extrapolation von Tagesniederschlägen für verschiedene Zeitdauerstufen und Wiederkehrperioden abgeleitet

		Wiederkehrperiode [a]									
		100	200	500	1.000	2.000	5.000	10.000	20.000	50.000	100.000
Zeitdauerstufe [min]	5	3,0	3,2	3,7	4,0	4,3	4,8	5,1	5,5	5,9	6,2
	10	4,4	4,8	5,4	5,8	6,3	7,0	7,4	8,0	8,6	9,2
	15	5,4	6,0	6,7	7,3	7,9	8,6	9,4	10,0	10,8	11,6
	20	6,4	7,0	7,9	8,6	9,2	10,2	11,0	11,6	12,6	13,5
	30	8,0	8,8	9,9	10,6	11,6	12,8	13,6	14,4	15,9	16,8
	45	10,0	11,0	12,2	13,4	14,4	16,0	17,1	18,3	19,8	20,8
	60	11,7	12,8	14,4	15,6	16,8	18,6	19,8	21,3	23,2	24,4
	90	14,6	16,0	18,0	19,6	21,0	23,1	24,9	26,4	28,8	30,8
	120	17,0	18,8	21,0	22,8	24,6	27,3	29,2	31,2	34,0	36,0
	180	21,4	23,4	26,4	28,5	30,9	34,0	36,4	38,8	42,0	44,5
	240	25,0	27,4	30,9	33,3	36,0	39,6	42,0	44,5	48,0	51,0
	360	31,2	34,2	38,4	41,1	44,0	48,0	51,0	54,5	58,8	61,6
	540	38,8	42,0	46,5	50,0	53,6	58,5	61,8	66,0	71,4	75,2
720	44,4	48,3	53,2	57,2	61,5	67,2	71,4	75,6	81,6	86,4	

Tab. A.4 Maximalwert der Niederschläge in Millimeter aus der Extrapolation von Tagesniederschlägen für verschiedene Zeitdauerstufen und Wiederkehrperioden abgeleitet

		Wiederkehrperiode [a]									
		100	200	500	1.000	2.000	5.000	10.000	20.000	50.000	100.000
Zeitdauerstufe [min]	5	11,9	13,3	15,2	16,6	18,2	20,2	21,9	23,5	25,8	27,5
	10	15,3	17,0	19,4	21,3	23,3	25,9	28,0	30,2	33,1	35,4
	15	17,6	19,7	22,5	24,7	27,0	30,1	32,6	35,1	38,5	41,1
	20	19,6	21,9	25,0	27,5	30,0	33,5	36,2	39,0	42,8	45,7
	30	22,7	25,4	29,0	31,9	34,9	38,9	42,0	45,3	49,7	53,1
	45	26,4	29,5	33,7	37,1	40,5	45,2	48,8	52,6	57,7	61,7
	60	29,3	32,8	37,5	41,2	45,0	50,2	54,3	58,5	64,2	68,6
	90	34,1	38,1	43,6	47,9	52,3	58,4	63,1	67,9	74,5	79,7
	120	37,9	42,3	48,4	53,2	58,2	64,9	70,2	75,6	82,9	88,6
	180	44,0	49,2	56,3	61,8	67,6	75,4	81,5	87,8	96,3	102,9
	240	49,0	54,7	62,6	68,8	75,1	83,8	90,6	97,6	107,1	114,4
	360	56,9	63,5	72,7	79,9	87,3	97,4	105,3	113,4	124,4	132,9
540	67,0	75,0	85,9	94,5	103,3	115,4	124,8	134,5	147,7	157,9	
720	75,9	84,9	97,3	107,0	117,1	130,8	141,4	152,4	167,3	178,9	

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14

85748 Garching b. München

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

38122 Braunschweig

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de