



► Merkblatt

Ermittlung von Bemessungsabflüssen nach DIN 19700 in Nordrhein-Westfalen



Merkblätter

Band 46

**Ermittlung von Bemessungsabflüssen
nach DIN 19700 in Nordrhein-Westfalen**

Düsseldorf, 2004

Impressum

Herausgeber: Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen
Wallneyer Str. 6, 45133 Essen
Telefon: (0201) 79 95 - 0
e-mail: poststelle@lua.nrw.de

Projektbearbeiter: Dr.-Ing. Hubert Lohr, SYDRO-Consult, Darmstadt

Projektbegleitung: Dipl.-Ing. Baumgart Staatliches Umweltamt Aachen
Dipl.-Ing. Heuer Landesumweltamt NRW
Dipl.-Ing. Rieck Staatliches Amt für Umwelt und Arbeitsschutz
Ostwestfalen-Lippe
Dipl.-Ing. Wendland Staatliches Umweltamt Lippstadt
Dipl.-Ing. Windau Staatliches Umweltamt Hagen

Bildnachweis: Titelbilder sowie S. 6 und S. 7
(Landestalsperrenverwaltung Sachsen, Pirna)

Layout: Helga Friedrich, Angela Tuczek

Druck: Druckerei JVA Geldern

ISSN: 0947-5788

Download-Möglichkeit: <http://www.landesumweltamt.nrw.de> > Veröffentlichungen

Nachdruck – auch auszugsweise – ist nur unter Quellenangaben und Überlassung von Belegexemplaren nach vorheriger Zustimmung des Herausgebers gestattet. Die Verwendung für Werbezwecke ist grundsätzlich untersagt.

Vorwort

Mit der Modifizierung der DIN 19700 wurden die Bemessungsgrundlagen für Stauanlagen neu formuliert. Zweifelsohne ist der Sicherheitsanspruch sehr hoch. Aussagen über Hochwasserereignisse mit einem Wiederkehrintervall bis zu 10.000 Jahren sind erforderlich. Abflussaufzeichnungen liegen aber meist für Zeiträume von bestenfalls bis zu 100 Jahren vor. Die notwendige Extrapolation ist zwangsläufig mit erheblichen Unsicherheiten verbunden.

Damit Ergebnisse auf der Basis einer abgestimmten, fachlich fundierten und nachvollziehbaren Vorgehensweise beruhen, wird dieses Thema in Form eines Merkblattes behandelt. Das Merkblatt soll allen Beteiligten, die mit der Bemessung und Sicherheit von Stauanlagen befasst sind, Hilfestellung leisten, wesentliche Schritte und Probleme bei der Bearbeitung aufzeigen sowie Vorschläge zur Darstellung der Ergebnisse unterbreiten.

Für die aufgezeigten Lösungen werden immer qualifizierte Fachleute gefragt sein, die in einem verantwortungsvollen Dialog zwischen Gutachter, Betreiber und Behörde die Bemessung von Stauanlagen durchführen und somit deren Sicherheit bestimmen.

Anmerkung:

Im April 2010 wurden auf Seite 37 Korrekturen in der Formel (2) und den nachfolgenden Erläuterungen eingearbeitet.

Inhaltsverzeichnis

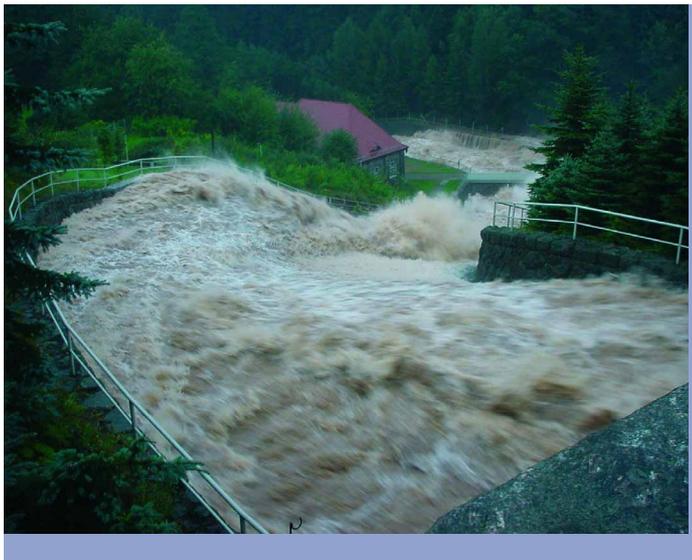
1	Einleitung	6
2	Vorgehensweise	8
3	Datengrundlage	9
3.1	Auswertung der Datengrundlage	9
3.2	Niederschlag-Abfluss-Modelle (N-A-Modell)	9
3.3	Abflussdaten	9
3.4	Betrieb der Stauanlage	10
3.5	Dokumentation der Daten	10
4	Verfahren	11
4.1	Ermittlung von Scheitelabflüssen	11
4.1.1	Extremwertstatistik	11
4.1.2	Maximierung der Schiefe der Verteilungsfunktionen	12
4.2	Ermittlung von Bemessungsganglinien	13
4.2.1	Niederschlag-Abfluss-Modellierung (Deterministisches Verfahren)	13
4.2.2	Hochwassermerkmal-Simulation (Statistisches Verfahren)	15
4.3	Regionalanalyse / Vorgehensweise bei unzureichender Datengrundlage	16
5	Belastung	17
5.1	Niederschlag	17
5.1.1	Herkunft	17
5.1.2	Niederschlagsdauer, räumliche und zeitliche Verteilung	17
5.1.3	Maximierte Gebietsniederschläge	19
5.2	Abfluss	19
5.2.1	Aufzeichnungslänge	19
5.2.2	Zeitliche Auflösung	20
6	Anfangs- und Randbedingungen	21
6.1	Allgemeines	21
6.1.1	Anfangs- und Randbedingungen bei der N-A-Modellierung	21
6.1.2	Anfangs- und Randbedingungen bei der Hochwassermerkmal-Simulation	21
6.2	Anfangsspeicherinhalt	21
6.3	Freibord	23

7	Ergebnisse und Erläuterungsbericht	24
7.1	Ergebnisdarstellung	24
7.2	Plausibilität der Ergebnisse	25
8	Bewertung des verbleibenden hydrologischen Risikos	27
8.1	Bewertung des Risikos durch Skalierung der Belastung	27
8.2	Bewertung des Risikos mit Hilfe maximierter Gebietsniederschläge	28
9	Literatur	29
Anlagen:		
Anlage 1:	Gleichungen zur Maximierung der Schiefe	33
Anlage 2:	Ansätze zur Infiltration	34
Anlage 3:	Hochwassermerkmal-Simulation	36
Anlage 4:	Beispiele für Niederschlagsintensitätsverteilungen	48
Anlage 5:	Bewertung des Risikos durch Skalierung der Belastung	51

1 Einleitung

Die Sicherheit von Stauanlagen ist aufgrund des außerordentlichen Gefährdungs- und Schadenspotenzials von sehr großer Bedeutung. Die neue DIN 19700 definiert deshalb die Sicherheitsanforderungen an Stauanlagen durch die Vorgabe von Bemessungshochwasserereignissen (BHQ) sehr geringer Eintrittswahrscheinlichkeit, die sich im Bereich von Jährlichkeiten größer 100a bis 10.000a bewegen. Zielsetzung ist,

➔ 1. die Bemessung von Hochwasserentlastungsanlagen (BHQ₁)



➔ 2. die Überprüfung der Anlagensicherheit bei Extremhochwasser (BHQ₂)



➔ 3. die Dimensionierung von Hochwasserrückhalteräumen (BHQ₃)



gemäß den entsprechenden Wiederkehrintervallen so vorzunehmen, dass ein Versagen der Anlagen ausgeschlossen werden kann.

Dem Bedürfnis nach Sicherheit steht die fehlende Kenntnis hinsichtlich der Größe solcher Extremereignisse gegenüber. Die Problematik liegt in der Extrapolation bzw. Übertragung des bekannten Abflussverhaltens auf die Bemessungshochwasserereignisse. Aufgrund der Differenzen zwischen den bekannten und den geforderten Größen sind die Ergebnisse der Berechnungen als Schätzungen der tatsächlichen Verhältnisse zu verstehen, wobei Plausibilität und Sensitivität der Annahmen eine besondere Rolle spielen.

Ohne jeden Zweifel verlangt die Bearbeitung erfahrene Fachleute im Bereich der Hydrologie und Hydraulik. Im Dialog zwischen Betreiber, Behörde und Gutachter sind Vorgehensweise, Annahmen und Randbedingungen zu Beginn und während einer Untersuchung abzustimmen.

Der Anwendungsbereich dieses Merkblattes umfasst alle Stauanlagen gemäß DIN 19700, wobei im Einzelfall und je nach Anlagengröße die Anforderungen, die eingesetzten Verfahren und die Vorgehensweise unterschiedlich sein können.

Mit diesem für das Land Nordrhein-Westfalen erarbeiteten Merkblatt sollen Empfehlungen zur Ermittlung der Bemessungsabflüsse und des verbleibenden hydrologischen Risikos gegeben werden. Aufgrund des Umfangs und der Komplexität des Themas können nicht für alle Fragestellungen Lösungen oder ausführliche Erklärungen angeboten werden. Dort, wo keine konkreten Lösungsvorschläge möglich sind, soll das Merkblatt zu einer Sensibilisierung für die zugrundeliegende Problematik beitragen.

Weitergehende Erläuterungen sind dem Bericht der Technischen Universität Darmstadt (OSTROWSKI, M.W. et. al. 1999) und entsprechender Fachliteratur zu entnehmen.

2 Vorgehensweise

Das Ziel einer Ermittlung von Bemessungsabflüssen ist die Aufstellung von vollständigen Bemessungsganglinien (Fülle und Scheitel) und die Beurteilung ihrer Auswirkungen auf die jeweilige Stauanlage. Maßgebend ist der sich einstellende Wasserstand in der Stauanlage, der über eine Berechnung der Seeretention unter Berücksichtigung des wasserwirtschaftlichen Betriebs zu ermitteln ist. Die ausschließliche Betrachtung des Scheitelabflusses ist in dieser Hinsicht weder vollständig noch ausreichend aussagekräftig. Dies geht zum einen aus der neuen DIN 19700 mit der Aufforderung zur Berücksichtigung der Retention hervor, ist zum anderen aber auch wegen der unerlässlichen Betrachtung der Füllen erforderlich. Daraus resultiert, dass Nachweise, die nur die Ermittlung von Scheitelabflüssen zum Gegenstand haben, als Ergänzung notwendig sind, aber nicht zur vollständigen Lösung führen können.

Geeignete Verfahren zur Ermittlung von Bemessungsganglinien sind grundsätzlich

- *die Niederschlag-Abfluss-Modellierung*
(Deterministisches Verfahren, Benutzung von Niederschlagsdaten, Kapitel 4.2.1)
- *die Hochwassermerkmal-Simulation mit Extremwertstatistik*
(Statistisches Verfahren, Benutzung von gemessenen Abflussdaten, Kapitel 4.2.2)

Unabhängig vom benutzten Verfahren ist immer eine Kontrolle der Ergebnisse auf Plausibilität durch andere Verfahren erforderlich, z. B. anhand der Regionalanalyse.

Die Wahl des Verfahrens ist unabdingbar mit der vorhandenen Datengrundlage verknüpft. Deshalb soll die Datengrundlage im Kapitel 3 zuerst betrachtet werden. Aus ihr leiten sich die anwendbaren Verfahren ab, die im Kapitel 4 kurz erläutert werden. Anzusetzende Belastungen, die Abschätzung plausibler Anfangs- und Randbedingungen und die Ergebnisse sowie deren Darstellung sind Bestandteil der Kapitel 5 bis 7. Das Merkblatt gibt abschließend in Kapitel 8 eine Empfehlung zur Abschätzung des verbleibenden hydrologischen Risikos.

3 Datengrundlage

3.1 Auswertung der Datengrundlage

Welches Verfahren aufgrund der Datenlage als Basis zur Ermittlung der Bemessungsganglinien zum Einsatz kommt, muss im Einzelfall geklärt werden. Zur Prüfung der Plausibilität sollte aber stets soviel Information wie möglich aus den vorhandenen Messwerten abgeleitet werden. Dazu gehören auch

- das Aufstellen einer Extremwertstatistik aus möglichst langen Abflussaufzeichnungen
 - für alle im Projektgebiet befindlichen Abflusspegel
 - für alle benachbarten Abflusspegel (zu Übertragungs- und Vergleichszwecken, Regionalanalyse)
- die Gegenüberstellung von Abflussscheiteln und Füllen von Hochwasserereignissen nach Jahreszeit unterschieden
- die Gegenüberstellung von Starkregenereignissen und Konzentrationszeiten von Hochwasserereignissen
- eine Füllenstatistik mit Angabe des Schwellenwertes

3.2 Niederschlag-Abfluss-Modelle (N-A-Modelle)

Für die Aufstellung von N-A-Modellen werden hochaufgelöste, zeitlich korrespondierende Niederschlags- und Abflussaufzeichnungen benötigt. Gemittelte Tageswerte sind in Bezug auf die Hochwasserbetrachtung unzureichend. Ganglinien der Hochwasserereignisse für die Kalibrierung und die Verifikation des N-A-Modells sowie die zugehörigen Ergebnisse der Berechnungen gehören zur Datengrundlage.

3.3 Abflussdaten

Um eine Aussage über die Qualität der Abflussdaten treffen zu können, ist die Betrachtung der jeweiligen Abflusskurve erforderlich. Streng genommen gilt die Abflusskurve nur für den Bereich, in dem sie durch Messungen belegt ist. Die erforderliche Extrapolation der Kurve sollte über hydraulische Betrachtungen abgesichert werden. Daher gehört zur Datengrundlage die Darstellung der verwendeten Abflusskurven mit Kennzeichnung der durchgeführten Abflussmessungen und der Extrapolationsmethode. Je kleiner das Gewässer, um so problematischer bzw. unsicherer ist die Zuverlässigkeit der Abflusskurven zu werten, weil Abflussmessungen zum Zeitpunkt der Abflussspitzen aufgrund der geringen Zeitspanne zwischen Ereignisbeginn und Scheitel häufig nicht möglich sind und eine Umläufigkeit des Pegels mitunter schnell erreicht ist.

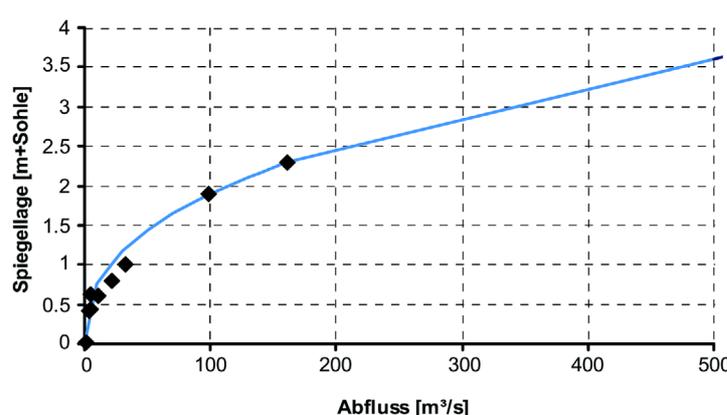


Abb. 1: Abflusskurve mit eingetragenen Messwerten und extrapoliertem Funktion

3.4 Betrieb der Stauanlage

Die DIN 19700 erlaubt eine Vorentlastung aus der Stauanlage, wobei keine Schäden im Unterlauf entstehen dürfen. In der Realität ist aber das Eintreten eines Bemessungsereignisses im Vorfeld nicht bekannt und dadurch die maximal erlaubte Vorentlastung nur von theoretischem Nutzen. Um den tatsächlichen Verhältnissen soweit möglich zu entsprechen, sollte sich die Vorentlastung an den Betriebsregeln der jeweiligen Stauanlage orientieren bzw. am bordvollen, schadlos abführbaren Abfluss im Unterlauf. Somit sind die Betriebsregeln ebenfalls Bestandteil der Datengrundlage.

Zusätzlich ist für eine Beurteilung der Anfangsbedingung – *Stauziel* – die Dauerlinie des Speicherinhaltes von Nutzen (siehe Kapitel 6). Damit gehören auch die Aufzeichnungen des Speicherinhaltes zur Datengrundlage.

3.5 Dokumentation der Daten

Jedes Gutachten zur Ermittlung von Bemessungsabflüssen sollte eine tabellarische Auflistung der verfügbaren und letztendlich benutzten Datengrundlage enthalten. Besonders hilfreich ist die Darstellung des Projektgebietes mit eingetragenen Messstationen für Niederschlag und Abfluss. Zur Beurteilung ihrer Verwendbarkeit sind je Messreihe

- der Messzeitraum (mit Angabe von Lücken)
- die zeitliche Auflösung

darzustellen.

Ein Beispiel für die tabellarische Darstellung von Zeitreihen ist in Abb. 2 gegeben.

Die Datengrundlage ist in digitaler Form einem Gutachten beizulegen.

Übersicht der Zeitreihen					
Name	System	Messwert	EZG [km ²]	Eigentümer	Messgerät
Musterpegel	Musterbach	Wasserstand	606,0	Staatliches Umweltamt ...	Lattenpegel mit Registriergerät nach Schwimmersystem
Musterpegel 2	Beispielbach	Wasserstand	163,0	Verband ...	Lattenpegel mit Registriergerät nach Schwimmersystem und Fernübertragung
Musterpegel 2	Beispielbach	Abfluss	163,0	Verband ...	Ultraschallanlage
....					

Messzeitraum								
Name	beobachteter Zeitraum		digital verfügbar		verwendet		Ablesung	Bemerkung
	von	bis	ja	nein	ja	nein		
Musterpegel	1932	1950		x		x	kontinuierlich	
	1950	31.12.1970	x		x		Tageswerte	
	01.01.1971	31.08.1971	x		x		kontinuierlich	
	01.09.1971	28.10.1971		x		x	–	Gerät defekt
	29.10.1971	heute	x		x		15 min	
...	...							
...								

Abb. 2: Beispiel der tabellarischen Auflistung der Datengrundlage

4 Verfahren

Nachfolgend werden Verfahren aufgeführt, die zur Ermittlung von Bemessungsabflüssen dienen. Dabei ist anzumerken, dass nur die Niederschlag-Abfluss-Modellierung und die Hochwassermerkmal-Simulation in der Lage sind, vollständige Bemessungsganglinien zu liefern. Andere Methoden zur Ermittlung von Scheitelabflüssen sind ergänzend zur Prüfung der Plausibilität anzuwenden. Die Erläuterungen zu den einzelnen Verfahren können nicht erschöpfend sein und beziehen sich auf Besonderheiten bei der Ermittlung von extremen Abflüssen. Weiterführende Literaturangaben zu den einzelnen Methoden sind in den jeweiligen Kapiteln angegeben.

4.1 Ermittlung von Scheitelabflüssen

4.1.1 Extremwertstatistik

Die Extremwertstatistik beruht auf der Anwendung theoretischer Verteilungsfunktionen, welche die Berechnung unabhängiger Größen, wie z.B. maximale jährliche Abflüsse, Füllen und Wahrscheinlichkeitsaussagen über seltene, außerhalb des Beobachtungszeitraums liegende Extremwerte zulassen. An die Stichprobe sind folgende Anforderungen zu stellen:

- Konsistenz (frei von Messfehlern)
- Unabhängigkeit der Messwerte

- Homogenität (unbeeinflusst durch Gebietsveränderungen)
- Repräsentativ für das langfristige Abflussverhalten

Mittels statistischer Tests (z. B. Kolmogorov-Smirnov-Test, $n\omega^2$ -Test, Quantil-Korrelations-Test) lässt sich die Güte der Anpassung einer theoretischen Verteilungsfunktion an die beobachteten Werte beurteilen. Anzuraten ist stets die Verwendung mehrerer unterschiedlicher Verteilungsfunktionen, um statt nur eines einzelnen Wertes einen Wertebereich für den zu extrapolierenden Abfluss zu erhalten. Als Verteilungsfunktionen eignen sich insbesondere Pearson3, LogPearson3, Weibull und Gumbel. Mit zunehmenden Wiederkehrintervallen entfernen sich die Funktionen immer mehr voneinander, d. h. der aufgespannte Korridor möglicher Abflussscheitel nimmt zu.

Bei der Anwendung der Extremwertstatistik ist besonders darauf zu achten, dass die Stichprobe einen möglichst langen Zeitraum umfasst. In der Statistik wird allgemein davon ausgegangen, dass eine Extrapolation über das dreifache des Beobachtungszeitraumes hinaus unzulässig ist bzw. zu unzuverlässigen Aussagen führt. Da aber Aussagen zu Extremabflüssen für die Bemessung erforderlich sind, wird von diesem Grundsatz – wohl wissend der Ungenauigkeit der Werte – abgewichen.

Eine Kontrolle auf Plausibilität sowie die Verlängerung von Messreihen ist durch eine Auswertung zusätzlicher

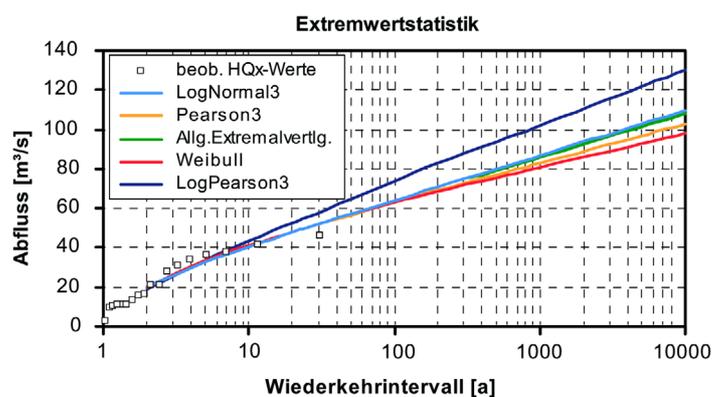


Abb. 3: Beispiel für Verteilungsfunktionen der Extremwerte

Pegel im Einzugsgebiet oder in benachbarten Einzugsgebieten mit vergleichbaren Abflusseigenschaften möglich und gegebenenfalls anzustreben.

Die Extremwertstatistik ist aufgrund der einfachen Handhabung immer aufzustellen und zur Gegenüberstellung und Plausibilitätskontrolle zu den anderen Verfahren zu verwenden.

Weiterführende Erläuterungen finden sich insbesondere in DVWK 1999a und PLATE, E. 1993.

4.1.2 Maximierung der Schiefe der Verteilungsfunktionen

Vom DVWK-Fachausschuss „Extreme Abflüsse“ wurden in der DVWK-Schrift 124 *Hochwasserabflüsse* Schätzformeln zur Ermittlung von Bemessungsscheitelabflüssen angegeben. Das Verfahren beruht auf dem Prinzip der Maximierung der Schiefe von Verteilungsfunktionen für Hochwasserscheitelabflüsse (DVWK 1999b; KLEEBERG, et.al. 2001). Ein Scheitelabfluss bestimmter Eintrittswahrscheinlichkeit lässt sich in folgender Form ausdrücken:

$$HQ_T = MHQ + k_T \cdot S_{HQ}$$

mit:

HQ_T: Hochwasserscheitelabfluss des Wiederkehrintervalls T [m³/s]

MHQ: Mittleres Hochwasser [m³/s]

k_T: Häufigkeitsfaktor [-]

S_{HQ}: Standardabweichung der Hochwasserabflüsse [m³/s]

Ausgehend davon, dass sich das Mittel MHQ und die Standardabweichung S_{HQ} als statistische Parameter aus der Beobachtungsreihe der Hochwasserscheitelabflüsse ermitteln lassen, stellt sich die Frage, wie der Häufigkeitsfaktor k_T geschätzt oder maximiert werden kann. Für verschiedene Typen mathematischer Verteilungsfunktionen lässt sich k_T angeben, z.B. kann k_T für die Pearson-III-Verteilung aus der Schiefe c der Beobachtungsdaten geschätzt werden. Das bedeutet wiederum, dass extreme Schiefen auch zu extremen k_T Werten führen. Für die Schiefe c = 4, von der allgemein angenommen wird, dass sie nicht mehr überschritten wird, ergibt sich für ein 1000-jährliches Ereignis k_T = 8,25 und für ein 10000-jährliches Ereignis k_T = 12,35.

Auch dieses Verfahren ist sehr einfach anzuwenden und vermittelt einen Eindruck maximaler Zustände. Die Gleichungen zur Berechnung finden sich in der Anlage 1.

Rur	Schiefe [-]	Annahme	MHQ [m ³ /s]	HQ ₁₀ [m ³ /s]	HQ ₁₀₀ [m ³ /s]	HQ ₁₀₀₀ [m ³ /s]	HQ ₁₀₀₀₀ [m ³ /s]
Pearson III	c = 1.89		86	148	254	359	464
Schätzformel mit max. Schiefen	c = 3	HQ ₁₀ bekannt			299	462	631
	c = 3	HQ ₁₀₀ bekannt				383	516
	c = 4	HQ ₁₀ bekannt			357	598	853
	c = 4	HQ ₁₀₀ bekannt				404	562

Abb. 4: Beispiel für die Bandbreite der Ergebnisse beim Verfahren der maximierten Schiefe mit Werten des Zuflusses zur Rurtalsperre

4.2 Ermittlung von Bemessungsganglinien

4.2.1 Niederschlag-Abfluss-Modellierung (Deterministisches Verfahren)

Die Beschreibung der Niederschlag-Abfluss-Modellierung beschränkt sich auf die Themen, die unmittelbar mit der Simulation extremer Hochwasserereignisse in Verbindung stehen. Eine allgemeine Beschreibung zum Aufbau von N-A-Modellen soll hier nicht Gegenstand sein.

4.2.1.1 Modellparameter

Die Berechnung extremer Hochwasserereignisse mit N-A-Modellen ist eine Schätzung. In den extrapolierten Bemessungsniederschlägen sind Unsicherheiten enthalten. Auch die Parameter zur Beschreibung der Abflusskonzentration auf der Fläche (Konzentrationszeit) müssen für außergewöhnliche Extremereignisse extrapoliert werden. Ihr Verhalten ist nicht-linearer Natur und schwer abzuschätzen.

Da bei Extremereignissen der Abflussbeiwert gegen 1 gehen wird, dürfte die Ungenauigkeit beim Abflussbildungsprozess von untergeordneter Bedeutung sein. Eine Prüfung auf Plausibilität anhand verschiedener Infiltrationsansätze (siehe Anlage 2) sollte dennoch erfolgen (www.hydroskript.de; BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996; MANIAK 1997; SCHIFFLER 1992).

Eine Übertragung der Einheitsganglinien und Retentionskonstanten, die an kleinen bis mittleren Hochwasserereignissen geeicht und verifiziert wurden, ist wegen des nicht-linearen Abflussverhaltens bei Extremhochwasserereignissen kritisch zu hinterfragen.

Aus diesem Grund sind die Ergebnisse der Niederschlag-Abfluss-Simulation mit Hilfe zusätzlicher

Erhebungen und Analysen zur Ereignisabhängigkeit unbedingt auf Plausibilität zu untersuchen. Dem Beschleunigungseffekt des Oberflächenabflusses bei Extremereignissen ist durch eine Anpassung der Parameter zur Abflusskonzentration Rechnung zu tragen. Nach einem größeren Hochwasserereignis sollte die Kalibrierung eines N-A-Modells nachgezogen werden, ebenso die Auswertung von Starkniederschlägen in Beziehung zu den Abflussscheiteln. Hierzu sind Auswertungen beobachteter Hochwasserereignisse, regionale Kenntnisse und Erfahrungen im Umgang mit der Anwendung hydrologischer Modelle erforderlich (BWK 2001; DYCK et al. 1995; MANIAK, 1997).

4.2.1.2 Modellstruktur

Die Anordnung aller Systemelemente ist in einem Fließdiagramm darzustellen. Aus diesem sollten die Fließbeziehungen, die Lage der Teilflächen, die Gewässer und Stauanlagen hervorgehen. Außerdem ist kenntlich zu machen, an welchen Systemknoten Abflussmesswerte vorliegen.

Die räumliche Auflösung, mit der Flussgebiete mit Hilfe von N-A-Modellen abgebildet werden, ergibt Konsequenzen hinsichtlich der Bedeutung einzelner Modellparameter, wie z.B. der Abflusskonzentration. Bei kleinen Teilgebieten reproduzieren Retentionskonstanten nur die Verzögerung des Oberflächenabflusses über Land. Die Retention im Gewässer unterliegt gesonderten Betrachtungen. Bei grober räumlicher Auflösung, d.h. bei sehr großflächigen Teilgebieten, befinden sich bereits größere Gewässerabschnitte innerhalb einer Teilfläche. Die Retentionsparameter der Teilgebiete bilden demzufolge nicht nur die Abflussverzögerung auf der Landoberfläche ab, sondern umfassen auch Fließvorgänge im Gewässer.

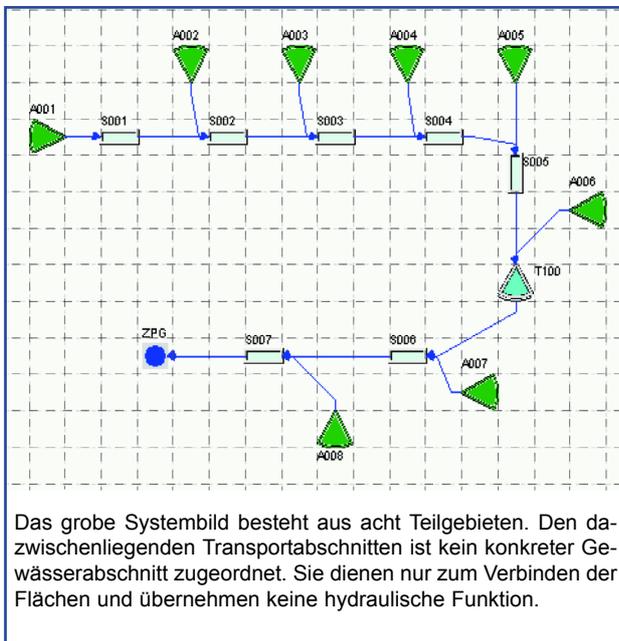


Abb. 5: Beispiel zur unterschiedlichen räumlichen Abbildungsgenauigkeit des gleichen Gebietes

Für das Erreichen plausibler Ergebnisse in Bezug auf die Hochwasserproblematik können folgende Aussagen gemacht werden:

- Einfache Abflussbildungsansätze (z.B. SCS-Verfahren, Index-Verfahren, Horton-Ansatz) kommen i.d.R. mit einer groben Systemabbildung besser zurecht.
- Mit zunehmender Genauigkeit der Systemabbildung nimmt die Bedeutung der Gewässer als Transportstrecken zu.
- Engstellen und Durchlässe sollten identifiziert und hinsichtlich ihres hydraulischen Einflusses dokumentiert sein.
- Dem Grundgedanken einer homogenen Modellaufstellung ist Rechnung zu tragen, d.h. die räumliche Auflösung des Einzugsgebietes im Modell muss mit der räumlichen Erfassung der Gewässerstrecken im Einklang stehen.
- Es besteht die Gefahr, dass bei einfacher Systemabbildung ohne hydraulische Berücksichtigung der Gewässer und einfachen Ansätzen zur Abflussbildung die Bemessungswellen an der Kalibrierungswelle „hängen“ bleiben (OSTROWSKI 1999; Anlage 3,

S. 46). Dies ist zu beachten und zu prüfen, da sich die Bemessungsganglinie bei extremen Ereignissen von der Ganglinie des Eichereignisses lösen kann.

4.2.1.3 Fazit

Mit N-A-Modellen kann – unter Beachtung der Grundsätze aus den Kapiteln 4.2.1.1 und 4.2.1.2 – die Ermittlung von Hochwasserganglinien für die Bemessung von Stauanlagen einschließlich Nachweis der Hochwassersicherheit gemäß DIN 19700 durchgeführt werden. Dabei ist der Grundsatz der homogenen Modellaufstellung zu beachten.

Grundsätzlich gilt, dass Ergebnisse einer Niederschlag-Abfluss-Modellierung immer auf Plausibilität zu prüfen sind. Hierzu gehört die Gegenüberstellung mit Werten einer Extremwertstatistik, Prüfung der Abflussbildung (siehe Kapitel 4.2.1.1), Kontrolle der berechneten Füllen anhand von Scheitel-Füllen-Beziehungen (siehe Kapitel 7). Außerdem ist die Ereignisabhängigkeit einzelner Parameter, insbesondere bei der Abflusskonzentration, zu berücksichtigen.

4.2.2 Hochwassermerkmal-Simulation (Statistisches Verfahren)

Die Hochwassermerkmal-Simulation zur Ermittlung extremer Hochwasserereignisse basiert auf der Analyse von gemessenen Abflussdaten und kombiniert statistische und deterministische Elemente zur Berechnung von Abflussganglinien. Zur Beschreibung der Wellen werden nur wenige Parameter benötigt. Im einzelnen sind dies der Scheitelwert (Q_S), die Anlaufzeit (t_A), die Form des ansteigenden Astes (m_{an}) und die Form des absteigenden Astes (m_{ab}).

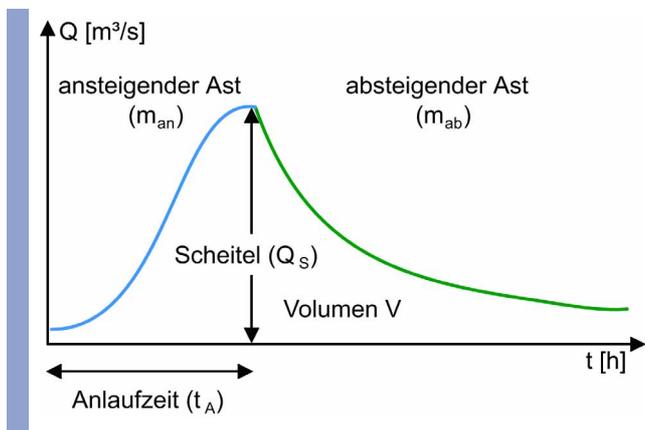


Abb. 6: Parameter der Hochwassermerkmal-Simulation

Zur Beschreibung der Parameter werden Verteilungsfunktionen verwendet. Aus diesem Grund ist es möglich, eine beliebig große Anzahl an Hochwasserereignissen mit unterschiedlichsten Eintrittswahrscheinlichkeiten zu generieren, die in ihrer Gesamtheit das Hochwasserspektrum bis hin zu Extremereignissen für das jeweilige Einzugsgebiet umfassen. Die Simulationen aller erzeugten Wellen liefern die Auswirkungen auf die betrachtete Stauanlage. Die Auswertung der Simulationsergebnisse ergibt die Zuordnung zu Bemessungsereignissen. In der Anlage 3 ist eine ausführliche Beschreibung zur Vorgehensweise dokumentiert.

4.2.2.1 Modellparameter

Für eine statistische Auswertung der Parameter Anlaufzeit (t_A), Form des ansteigenden Astes (m_{an}) und Form des absteigenden Astes (m_{ab}) sollten immer die größten aufgezeichneten Hochwasserereignisse herangezogen werden. Der Umfang an Ereignissen sollte möglichst 100 nicht unterschreiten. Die Spannweite der Werte ist aufgrund der hohen Variabilität des Niederschlages für die Anlaufzeit am größten. Der Formparameter des absteigenden Astes schwankt jedoch kaum, da der Wellenablauf durch das Einzugsgebiet bestimmt ist.

4.2.2.2 Modellstruktur

Wie bei Anwendung eines N-A-Modells ist die Anordnung aller Systemelemente in einem Fließdiagramm darzustellen. Aus diesem sollten die Fließbeziehungen, die Lage der Teilgebiete, Pegelstellen, Zuordnung der Teilgebiete ohne Abflussmessung zu ausgewerteten Pegeln, die Gewässer und Stauanlagen hervorgehen.

4.2.2.3 Fazit

Die Beschreibung der Hochwassercharakteristik in Form von Parametern mit Angabe statistischer Verteilungen erlaubt die Generierung einer beliebigen Anzahl von Hochwasserwellen durch Ziehen der Parameter unter Berücksichtigung gegenseitiger Abhängigkeiten. Wird eine ausreichend große Anzahl an Wellen erzeugt, so kann davon ausgegangen werden, dass damit alle denkbaren Hochwassersituationen erfasst werden. Die hohe Zahl an synthetischen Hochwasserwellen gewährleistet, dass auch extreme Kombinationen mit z. B. kurzen Anlaufzeiten bei gleichzeitig hohen Scheitelabflüssen entstehen. Ihre Auftretenshäufigkeit hängt von der statistischen Verteilung der jeweiligen Parameter ab.

Werden die Ganglinien nach verursachtem Wasserstand in der Stauanlage sortiert, können Eintrittswahrscheinlichkeiten für Füllen, Abflussscheitel und Wasserstände angegeben werden.

Um vergleichbar umfangreiche Aussagen mit Hilfe eines N-A-Modells zu erhalten, müssten sowohl die Niederschlagssumme als auch die räumliche und zeitliche Verteilung der Niederschläge und Randbedingungen wie Anfangsbodenfeuchte, Schnee etc. ebenfalls generiert werden.

Das Generieren auf der Basis von Verteilungsfunktionen darf jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass nicht mehr Information gewonnen wird, als die statistische Grundgesamtheit beinhaltet. Wie bei allen statistischen Verfahren sind auch die Ergebnisse der Hochwassermerkmal-Simulation von möglichst langen und zuverlässigen Pegelaufzeichnungen abhängig. Die Auswertung der Parameter stützt sich auf Informationen, die aus den gemessenen Werten gewonnen werden. In Bezug auf die Abflussscheitel wird mit dieser Methode letztendlich genauso wie bei der Scheitelwertstatistik weit über den zulässigen Bereich hinaus extrapoliert. Die Parameter zur Beschreibung der Wellenform sind aufgrund ihrer Abhängigkeit zur Einzugsgebietscharakteristik dagegen zuverlässiger.

4.3 Regionalanalyse / Vorgehensweise bei unzu- reichender Datengrundlage

Bei unzureichender Datenlage ist die Aufstellung eines N-A-Modells anzustreben, wobei als Belastung i.d.R. Werte aus dem KOSTRA-Atlas (DWD 1997) und maximierte Gebietsniederschläge anzusetzen sind.

Eine Übertragung von Bemessungswerten aus benachbarten Gebieten ist nur zu Vergleichszwecken vorzunehmen. Sinnvoll ist ein Vergleich nur dann, wenn die Einzugsgebiete in Bezug auf Größe, Struktur des Bodens und der Landnutzung ähnlich sind.

Besteht im Nachbargebiet ein kalibriertes Niederschlag-Abfluss-Modell, lassen sich berechnete Spenden, Ganglinien und bei Modellgleichheit auch N-A-Parameter gegenüberstellen und eventuell übernehmen.

Grundsätzlich ist bei der Übernahme von Ergebnissen bzw. Parametern aus Nachbargebieten eine enge Abstimmung zwischen Auftraggeber, Gutachter und Behörde erforderlich.

5 Belastung

5.1 Niederschlag

Bei der Anwendung von Niederschlag-Abfluss-Modellen werden für die Ermittlung von Bemessungsabflüssen extreme Niederschläge benötigt. Üblicherweise wird von der Annahme ausgegangen, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit des Niederschlags und des daraus resultierenden Abflusses annähernd gleich sind. Inwiefern diese Annahme ihre Gültigkeit besitzt, ist von der maßgebenden Niederschlagsbelastung, den Bodenverhältnissen und den gewählten Anfangsbedingungen abhängig (siehe Kapitel 6), die jedoch mit zunehmender Wiederholungszeitspanne an Einfluss verlieren.

5.1.1 Herkunft

Die Belastung aus Niederschlägen erfolgt i.d.R. über Modellregen, wobei der KOSTRA-Atlas des Deutschen Wetterdienstes als Quelle dienen sollte (DWD 1997). Er besitzt den Vorteil, dass die Werte der einzelnen Raster auf der Auswertung mehrerer Stationen beruhen, dadurch eine Glättung aufweisen und deshalb keine Abhängigkeit zu einzelnen fehlerhaften Messwerten bzw. -stationen besteht. Im Gegensatz dazu kann bei der Benutzung von Daten einer einzelnen Messstation eine solche Abhängigkeit gegeben sein. Trotzdem sind auch lokal gemessene Starkniederschlagsereignisse zu beachten.

Der KOSTRA-Atlas benennt Werte bis zu einem Wiederkehrintervall von $T_N = 100$ Jahren. Darüber hinaus ist eine Extrapolation erforderlich, die allerdings ebenso kritisch zu betrachten ist wie die Extrapolation im Rahmen der Extremwertstatistik von Abflüssen.

5.1.2 Niederschlagsdauer, räumliche und zeitliche Verteilung

Die anzusetzende Regendauer und die Intensitätsverteilung sind vorab nicht bekannt und müssen über Variationsrechnungen ermittelt werden. Dabei ist nicht der maximale Scheitel des Zuflusses zur Stauanlage maßgebend, sondern die Ganglinie, welche den höchsten Wasserstand in der Stauanlage verursacht.

Ein Grundsatz der Hydrologie besagt, dass der maximale Abflussscheitel aus einem Gebiet dann entsteht, wenn die Niederschlagsdauer mit der längsten Fließzeit im Einzugsgebiet zusammen fällt. Diese Annahme stimmt insbesondere bei extremen Starkregen nicht grundsätzlich. Deshalb müssen verschiedene Regendauern – auch kürzere als die Konzentrationszeit des Einzugsgebietes – untersucht werden.

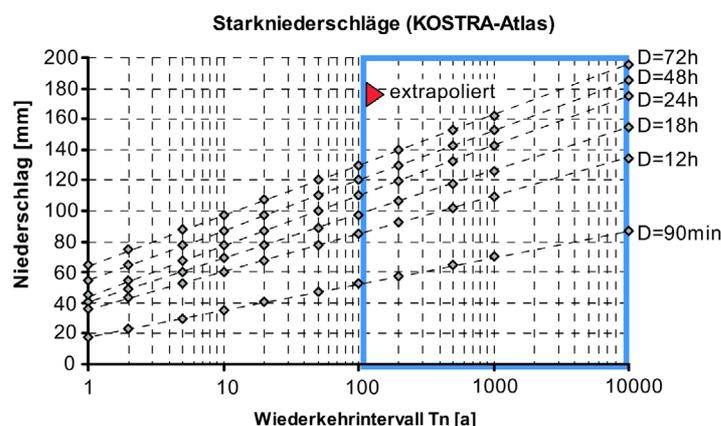
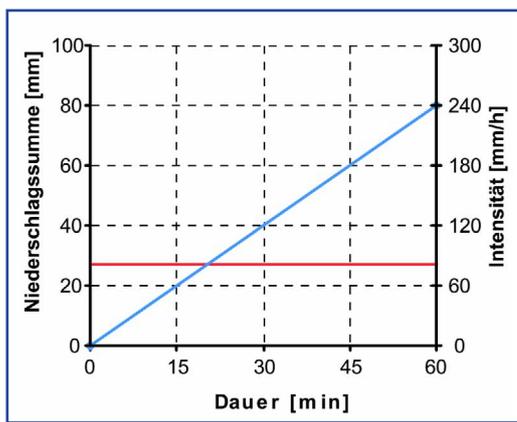


Abb. 7: Beispiel zur Extrapolation der Niederschläge für ein Rasterfeld aus dem KOSTRA-Atlas

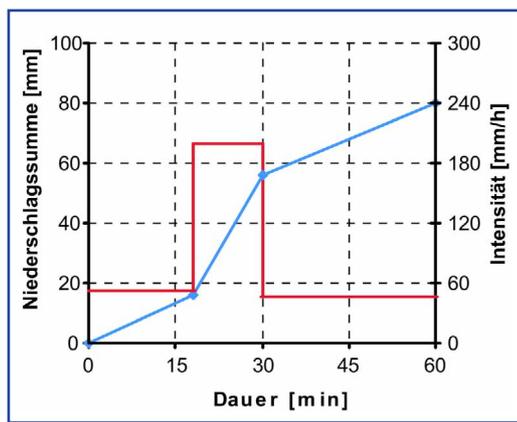
Die Aufzeichnungen einer Messstation im Einzugsgebiet und die KOSTRA-Werte können nach derzeitigem Erkenntnisstand für Flächen bis zu ca. 30 km² ohne Einschränkung als Gebietsniederschlag aufgefasst werden, sofern nicht topografische Gegebenheiten (z.B. Gebirge, große Wasserflächen) dagegen sprechen. Insbesondere sind Luv-Lagen zu beachten. Da die KOSTRA-Werte extremwertstatistische Schätzwerte darstellen, sind Toleranzbereiche zu beachten. Bei größeren Einzugsgebieten sollten aus Punktniederschlägen Gebietsniederschläge abgeleitet werden. Bei großen Gebieten mit bevorzugten Wind- bzw. Zugrichtungen ist eine ungleichmäßige Überregnung in Betracht zu ziehen.

Für die Intensitätsverteilung sollten anfangs-, mitten- und endbetonte Niederschläge angesetzt und verglichen werden. Der Blockregen ist nur für kurze Regendauern ($\leq 1h$) sinnvoll. Für mittenbetonte Intensitäten kommt in erster Linie die DVWK-Verteilung in Frage.

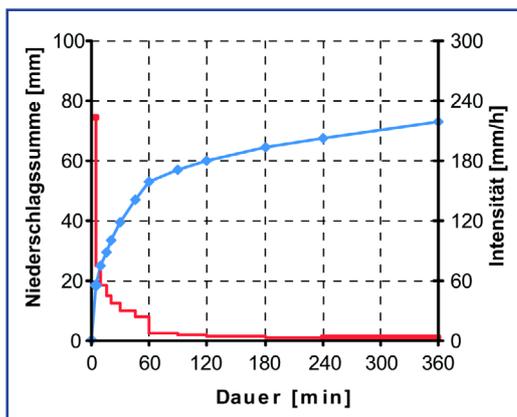
Aus den KOSTRA-Werten lässt sich ebenfalls eine Intensitätsverteilung ableiten, wenn angenommen wird, dass in einem Regen bestimmter Jährlichkeit und Dauer alle kürzeren Niederschläge der gleichen Jährlichkeit enthalten sind. Die Verteilung ergibt sich aus dem Zuwachs an Niederschlag von einer Dauerstufe zur nächsten und ist anfangsbetont. Durch Vertauschen der Reihenfolge entsteht eine endbetonte Verteilung.



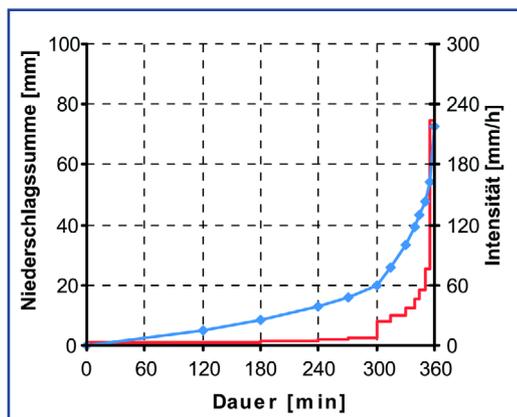
Blockregen



mittenbetonte Verteilung



anfangsbetonte Verteilung,
Werte gemäß KOSTRA-Atlas



endbetonte Verteilung,
Werte gemäß KOSTRA-Atlas

Abb. 8: Beispiele für Intensitätsverteilungen

Dieser theoretische Ansatz verbindet in einer extremwertstatistischen Betrachtung die einzelnen KOSTRA-Stufen zu einem Niederschlag. Das Konzept ist dem Euler-Regen ähnlich, der für Kanalnetz Bemessungen häufig Verwendung findet.

Weitere Intensitätsverteilungen mit Wertetabellen sind im Anhang, Anlage 4, aufgeführt.

5.1.3 Maximierte Gebietsniederschläge

Maximierte Gebietsniederschläge (MGN) sind nicht für eine Bemessung geeignet. Sie können aber zur Abschätzung eines verbleibenden hydrologischen Risikos zum Einsatz kommen und werden verwendet, um über ein N-A-Modell den vermutlich größten Abfluss (probable maximum flood, PMF) zu errechnen. Anhaltswerte für maximierte Gebietsniederschläge sind den DVWK-Mitteilungen Nr. 29 (DVWK 1997b) zu entnehmen. Die Bemessungsniederschläge zu BHQ_1 , BHQ_2 und der für das Projektgebiet ermittelte MGN sollten eine aufsteigende Tendenz besitzen und grafisch gegenübergestellt werden.

Für alle Aspekte bei der Ermittlung von Bemessungsabflüssen spielt die Nachvollziehbarkeit eine besondere Rolle. Dies gilt umso mehr für die Anwendung von maximierten Gebietsniederschlägen, da sie trotz ihres teilweise physikalischen Hintergrundes durch Annahmen und vereinfachte Berechnungen Spielraum für Interpretationen und Fehleinschätzungen bieten.

Aus diesem Grund sind folgende Punkte im Zusammenhang mit der Aufstellung eines Gutachtens zu maximierten Gebietsniederschlägen zur Wahrung der Nachvollziehbarkeit zu beachten:

- Die verwendete Datengrundlage ist vollständig aufzulisten (siehe Kapitel 3).
- Die Ermittlung eines maximierten Gebietsniederschlags ist anhand einer Beispielrechnung nachvollziehbar anzugeben.

Werden Gebietsniederschläge mit Hilfe extrapolierter Taupunkte ermittelt, so gilt zusätzlich:

- Die Eintrittswahrscheinlichkeit der für die Berechnung herangezogenen Taupunkte ist offen zu legen und zu begründen.
- Zwischenergebnisse je Dauerstufe und Monat mit zugrundegelegter Eintrittswahrscheinlichkeit der Taupunkte sind anzugeben.

Generell gilt, dass die Datengrundlage, Zwischenergebnisse und die Endergebnisse in digitaler Form einem Gutachten beizulegen sind.

5.2 Abfluss

Abflussganglinien bilden die Datengrundlage für die Extremwertstatistik, die Hochwassermerkmal-Simulation und für die Kalibrierung sowie Verifikation von N-A-Modellen.

5.2.1 Aufzeichnungslänge

Je länger eine Messreihe ist, um so robuster werden die aus ihr abgeleiteten Parameter. Gleichzeitig wächst allerdings auch die Wahrscheinlichkeit, dass die beobachteten Abflüsse durch Veränderungen im Einzugsgebiet, z.B. durch Stauanlagen, nicht mehr homogen sind. Es ist somit stets zu prüfen, ob die Homogenität der Daten gegeben ist. Liefert ein aktueller, homogener aber kürzerer Zeitraum ungünstigere Parameter, so ist dieser einem langen inhomogenen Zeitraum vorzuziehen.

Wie sehr sich unterschiedlich lange Messreihen auf die Extremwertstatistik auswirken können, ist an einem Beispiel (Abb. 10) dargestellt.

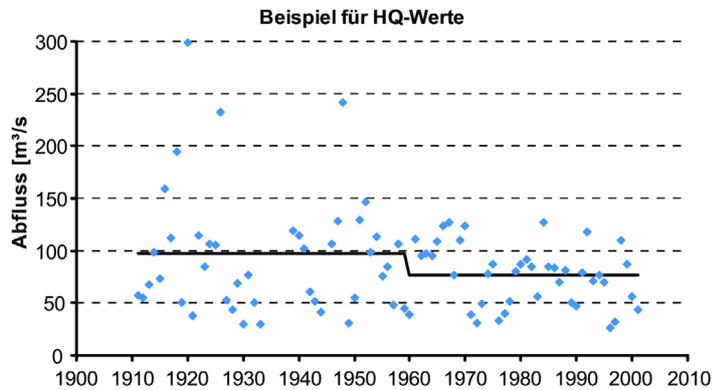


Abb. 9: Beispiel für eine inhomogene Abflussreihe aufgrund veränderter Messorte

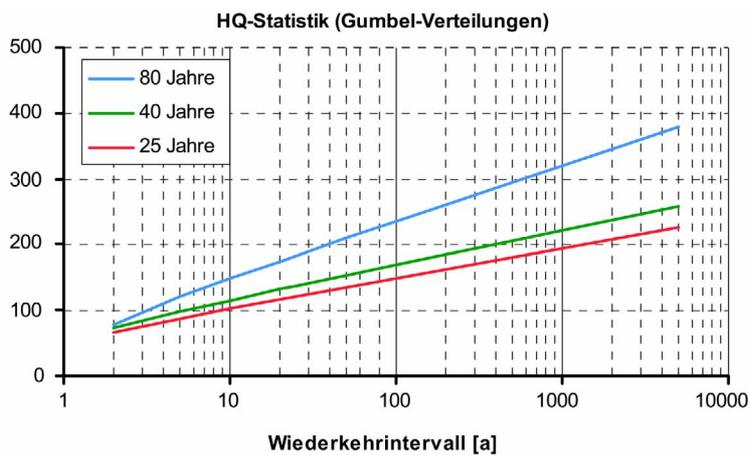


Abb. 10: Auswirkung unterschiedlicher Länge jährlicher Serien auf die Extremwertstatistik

5.2.2 Zeitliche Auflösung

Die erforderliche zeitliche Auflösung der Abflussdaten hängt in erster Linie von der Einzugsgebietsgröße ab. Eine sinnvolle Hochwassersimulation ist durchführbar, solange der Zeitraum zwischen Ereignisbeginn und Erreichen des Scheitelabflusses mindestens dreimal so lang wie der Simulationszeitschritt bzw. die zeitliche Auflösung der Messdaten ist.

6 Anfangs- und Randbedingungen

6.1 Allgemeines

In Abhängigkeit des verwendeten Verfahrens sind unterschiedliche Anfangs- und Randbedingungen zu unterscheiden.

6.1.1 Anfangs- und Randbedingungen bei der N-A-Modellierung

Bei der Ermittlung von Bemessungsganglinien sind die Randbedingungen bei der Anwendung von Niederschlag-Abfluss-Modellen durch die Anpassung einiger Parameter zu modifizieren. Dies sind:

- die Anfangsbedingungen (z. B. für Bodenfeuchte, Infiltration, Speicherinhalte und Abfluss)
- nichtlineare Parameter (z. B. für Abflusskonzentration, Retention, Einheitsganglinien, Abflussbeiwerte)

Die durch das Kalibrieren gefundenen Parameter sind zum Teil erheblich zu verändern. Insbesondere bei kleinen Einzugsgebieten, in denen durch kurze, extreme Starkregen maximale Abflüsse verursacht werden, wurde eine Halbierung der Konzentrationszeiten bei 100-jährlichen Ereignissen im Vergleich zu 5 – 10 jährlichen Hochwasserereignissen beobachtet. Dies ist durch entsprechende Veränderungen der Einheitsganglinien zu berücksichtigen. Wenn keine extremen Hochwasserganglinien für das Kalibrieren zur Verfügung stehen, sind die Veränderungen der Parametergrößen aus anderen Gebieten zu übertragen.

Die Abflussbeiwerte sollten immer durch eine Gegenüberstellung von Niederschlagshöhe und Infiltrationshöhe überprüft werden (siehe Kapitel 7.2). Als Anfangsbedingungen können mittlere Infiltrationswerte kalibrierter Hochwasserganglinien gewählt werden. Mit Ausnahme sehr durchlässiger Böden, z. B. Sand- und Karstgebiete, hat die Wahl der Anfangsbodenfeuchte keinen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse. Bei bindigen Böden und 100-jährlichen kurzen Starkregen sind Abflussbeiwerte über 0,8 ermittelt worden.

Um die Wirkung der Anfangs- und Randbedingungen aufzuzeigen, sollten die Anfangsbodenfeuchte bzw. der Vorregen, ggf. die Schneeverhältnisse, Retentionskonstanten, Einheitsganglinien variiert, simuliert und die Ergebnisse in Bezug auf die Auswirkungen in der Stauanlage dargestellt werden. Dabei ist immer nur ein Parameter zu verändern, während alle anderen konstant zu halten sind (siehe Kapitel 7).

6.1.2 Anfangs- und Randbedingungen bei der Hochwassermerkmal-Simulation

Bei der Hochwassermerkmal-Simulation sind aufgrund der Betrachtung von Abflüssen keine Definitionen von Anfangsbedingungen erforderlich, weil diese bereits in den Daten enthalten sind.

6.2 Anfangsspeicherinhalt

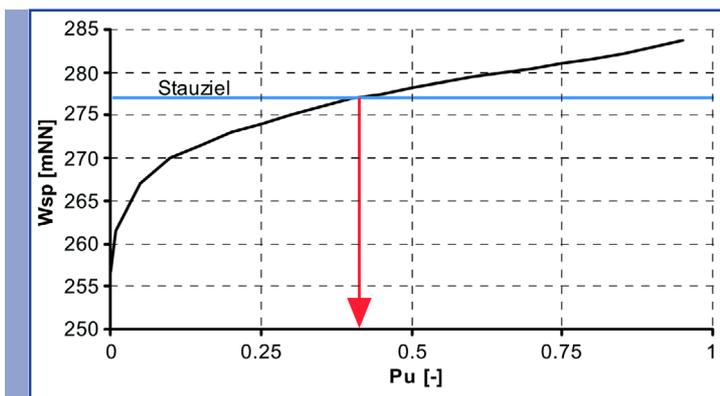
Unabhängig vom benutzten Verfahren muss der Anfangsspeicherinhalt festgelegt werden. Gemäß DIN 19700 ist er auf das Stauziel zu setzen. Dabei sind zwei Fragen zu klären:

1. Zu welcher Jahreszeit ergibt sich die ungünstigste Kombination aus Zufluss und Stauziel, wenn das Stauziel über das Jahr veränderlich ist?
2. Ist die Anfangsbedingung Stauziel überhaupt maßgebend?

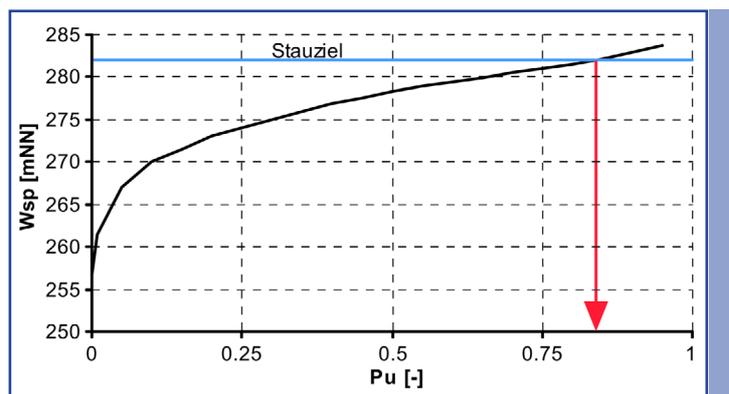
Für die Beantwortung ist der Zufluss jahreszeitlich zu analysieren und der kritische Zeitraum für die ungünstigste Kombination Zufluss und Stauziel nachzuweisen bzw. zu begründen.

Ob die Annahme *Stauziel* maßgebend ist, kann ohne Berücksichtigung des wasserwirtschaftlichen Betriebs nicht gesagt werden. Erst über die Darstellung der Speicherinhaltsverteilung des kritischen Zeitraums wird deutlich, mit welcher Eintrittswahrscheinlichkeit die Speicherfüllung in der Vergangenheit tatsächlich auf Höhe des Stauziels lag. Ist die Eintrittswahrscheinlichkeit für das Erreichen des Stauziels gering, ergibt sich aus der Anfangsfüllung *Stauziel* eine zusätzliche Sicherheit. Liegt sie dagegen über 50 %, d. h. in über der Hälfte der Zeit befindet sich der Wasserspiegel zur entsprechenden Jahreszeit oberhalb des Stauziels und somit im Hochwasserschutzraum, befindet man sich auf der unsicheren Seite.

Da der Verlauf der Speicherinhaltsverteilung durch den Betriebsplan der Stauanlage vorgegeben ist, bedeutet eine Änderung des Betriebsplanes auch eine Veränderung der Speicherinhaltsverteilung. Daher sollte bei einer Betriebsplanänderung überprüft werden, mit welcher Eintrittswahrscheinlichkeit die Anfangsfüllung *Stauziel* durch eine neue Betriebsweise erreicht wird. Da nach erfolgter Betriebsplanänderung die Auswirkungen auf den Speicherinhalt noch nicht durch Messwerte belegt sein können, empfiehlt sich die Durchführung einer Speicherbetriebssimulation. Aus ihr lassen sich die Speicherinhaltsverteilungen ableiten.



Anfangsbedingung Stauziel liegt auf der unsicheren Seite



Anfangsbedingung Stauziel erzeugt zusätzliche Sicherheit

Abb. 11: Bewertung des Stauziels anhand der Speicherinhaltsverteilung

6.3 Freibord

Als Freibord wird der vertikale Abstand zwischen dem für eine Überströmung maßgebend tiefsten Punkt der Krone und dem höchsten Stauziel im Hochwasserbemessungsfall 1 (BHQ₁) bzw. Hochwasserbemessungsfall 2 (BHQ₂) verstanden. Zum Freibord gehören folgende Anteile:

- h_{Au} : Aufstau infolge Wellenauflauf
- h_{Wi} : Aufstau infolge Windstau
- h_{Ei} : Aufstau infolge Eisstau
- h_{Si} : ggf. Sicherheitszuschlag im Hochwasserbemessungsfall 2

In Abhängigkeit des Bemessungsfalls ist der Sicherheitszuschlag anzusetzen.

Die Neufassung der DIN 19700 gestattet nicht die Inanspruchnahme des Windanteils, des Wellenaufbaus und des Eisstaus. Es ist jedoch im Einzelfall zu hinterfragen, ob ein Wellenaufbau zusammen mit Eisstau praktisch auftreten kann oder ob die Jahreszeit des

maßgebenden Bemessungsereignisses alle Freibordkomponenten überhaupt beinhaltet. Unterscheiden sich die maßgeblichen Bemessungsereignisse für Sommer und Winter nur gering, so sollte der Freibord mit den an die Jahreszeit angepassten Anteilen sowohl für Sommer als auch Winter ausgewiesen werden.

Im Bemessungsfall BHQ₂ muss überprüft werden, welche Folgen sich im Hinblick auf die Überflutungssicherheit des Bauwerkes ergeben, woraus sich die Annahme über den Sicherheitszuschlag ableitet. Hinweise auf die Vernachlässigung des Sicherheitszuschlages sind in der DIN 19700 gegeben.

Bei Dämmen wird angeraten, den Sicherheitszuschlag mindestens so festzulegen, dass der Höhenunterschied zwischen Dammkrone und Oberkante der Dichtung abgedeckt wird. Mit der Betrachtung des verbleibenden hydrologischen Risikos – wie in Kapitel 8 beschrieben – wird dieser Umstand nochmals aufgegriffen.

Hinweise zur Ermittlung des Freibords sind im DVWK-Merkblatt 246 gegeben (DVWK, 1997a).

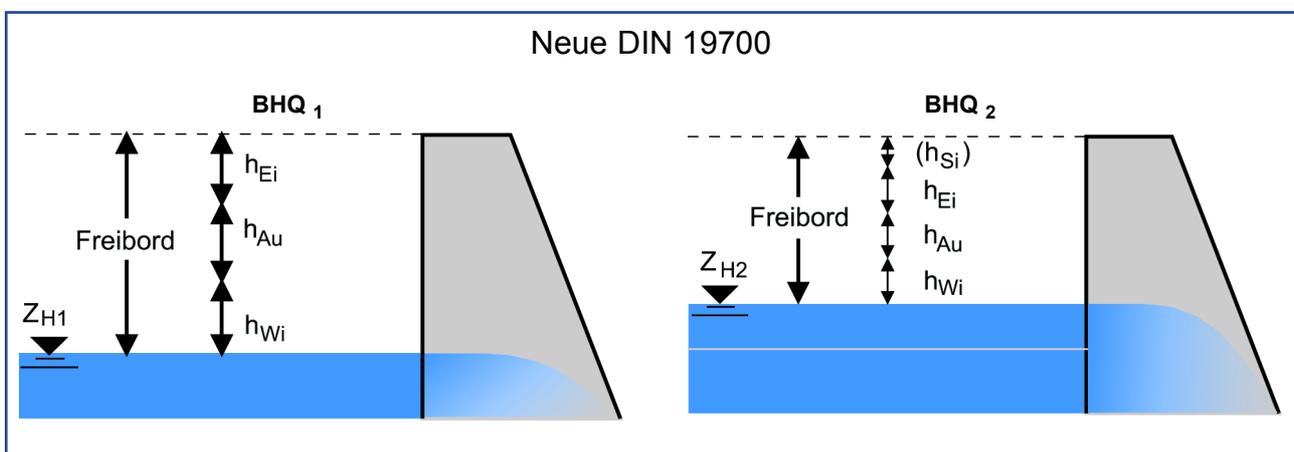


Abb. 12: Anzusetzende Freibordanteile der neuen DIN 19700

7 Ergebnisse und Erläuterungsbericht

7.1 Ergebnisdarstellung

Die Ermittlung von Bemessungsabflüssen und deren Auswirkungen auf Stauanlagen sind in einem Bericht zu dokumentieren. Dabei ist die Nachvollziehbarkeit und Darstellung der Ergebnisse von großer Bedeutung. Aus Gründen der Vergleichbarkeit ist eine einheitliche Darstellung – wie sie nachfolgend gezeigt wird – wünschenswert. Dies kann durch die Beachtung folgender Grundsätze unterstützt werden:

- Die verwendete Datengrundlage ist im Gutachten vollständig aufzulisten.
- Der Verfahrensgang ist darzustellen. Bei Anwendung der N-A-Modellierung sind alle Randbedingungen in einer Tabelle zusammenzustellen.
- Sensitivitätsanalysen einzelner Parameter sind tabellarisch **und** grafisch darzustellen.
- Die Endergebnisse sind zusammenfassend textlich und grafisch darzustellen.
- Die Datengrundlage, Zwischenergebnisse und die Endergebnisse sind in digitaler Form einem Gutachten beizulegen.
- Der lauffähige Modelldatensatz ist in digitaler Form Bestandteil eines Gutachtens.

N-A-Modell:

Belastung				Zufluss		Abgabe	Speicherinhalt	
Tn	N	Intensitätsverteilung	Abflussbeiwert	Scheitel	Fülle	Scheitel	S-Anfang	S-Max
[a]	[mm]	[-]	[-]	[m ³ /s]	[Mio.m ³]	[m ³ /s]	[Mio.m ³]	[Mio.m ³]
...								

Hochwassermerkmal-Simulation:

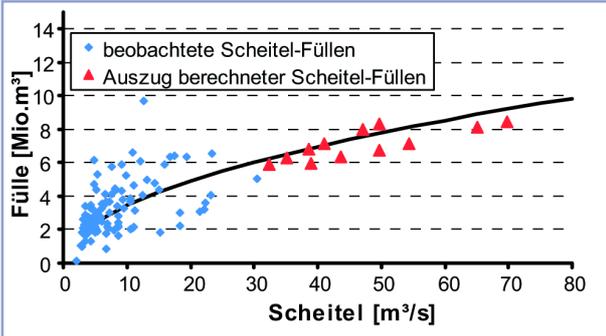
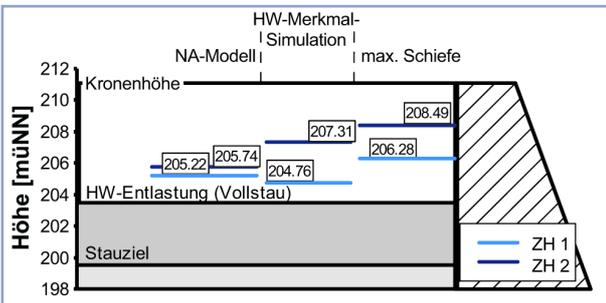
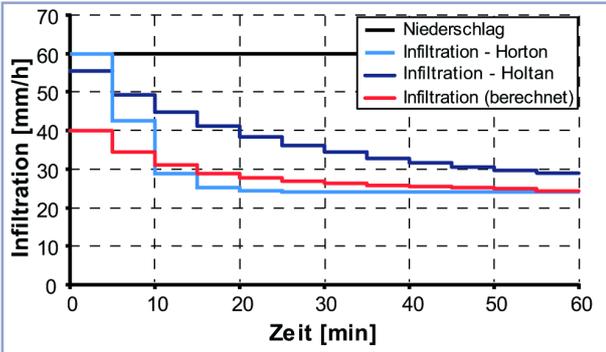
Belastung		Zufluss		Abgabe	Speicherinhalt	
Tn	Anlaufzeit	Scheitel	Fülle	Scheitel	S-Anfang	S-Max
[a]	[h]	[m ³ /s]	[Mio.m ³]	[m ³ /s]	[Mio.m ³]	[Mio.m ³]
...						

Die Aufteilung der Abgaben aus der Stauanlage auf die einzelnen Entlastungsorgane ist für die Beurteilung der Plausibilität sinnvoll und sollte dargestellt werden.

max. Abgabe	Hochwasserentlastung			Betriebsauslass			Grundablass
Scheitel	Segment 1	Heber	usw.	DN1200	DN800	usw.	DN600
[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
...							

7.2 Plausibilität der Ergebnisse

Zur Prüfung der Plausibilität wird empfohlen, folgende Aspekte in den Erläuterungsbericht aufzunehmen:

Thema:	Überprüfung bei der Anwendung von:
<p>Scheitel – Füllen – Beziehung:</p> <p>In ein Diagramm werden beobachtete Scheitel-Füllen-Wertepaare eingetragen, anhand derer eine Trendlinie ermittelt wird. Zusätzlich werden alle berechneten Wertepaare der Bemessungsganglinien dargestellt. Die berechneten Wertepaare sollten eine Beziehung zur ermittelten Trendlinie erkennen lassen.</p>	<p>N-A-Modell und Hochwassermerkmal-Simulation</p> 
<p>Vergleich der Ergebnisse:</p> <p>Die Ergebnisse aus verschiedenen Berechnungsverfahren müssen verglichen und anschaulich in Bezug zur Stauanlage gebracht werden. Dazu bietet sich an, die berechneten Wasserstände maßstabsgerecht in ein Schaubild der Stauanlage einzutragen.</p>	<p>N-A-Modell und Hochwassermerkmal-Simulation</p> 
<p>Abflussbildung:</p> <p>Zur Kontrolle der Abflussbildung können theoretische Ansätze mit den Berechnungsergebnissen über die Darstellung der Infiltration über die Zeit verglichen werden. In der Anlage sind Angaben über Funktionen und Parameter der Infiltrationsansätze gegeben.</p>	<p>N-A-Modell</p> 

Die Sensitivität der Ergebnisse in Abhängigkeit bestimmter Parameter lässt sich am deutlichsten mit Hilfe von Diagrammen zeigen, wobei der maximale Wasserstand in der Stauanlage in Abhängigkeit des entsprechenden Parameters aufgetragen wird.

Parameter:	Überprüfung bei der Anwendung von:												
<p>Anfangsbodenfeuchte:</p> <p>Die Variation der Anfangsbodenfeuchte wird in Prozent der Abweichung von einem markanten Ausgangswert – hier der Feldkapazität – dem sich maximal einstellenden Wasserstand in der Stauanlage gegenübergestellt. Auch andere Größen wie Abflussscheitel oder Fülle lassen sich in Abhängigkeit der Veränderung der Anfangsbodenfeuchte aufzeigen.</p>	<p>N-A-Modell</p> <table border="1"> <caption>Data for Variation der Anfangsbodenfeuchte</caption> <thead> <tr> <th>Abweichung von der Feldkapazität [%]</th> <th>max. Wsp. [mNN]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-20</td> <td>121.20</td> </tr> <tr> <td>-10</td> <td>121.24</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>121.29</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>121.32</td> </tr> <tr> <td>20</td> <td>121.41</td> </tr> </tbody> </table>	Abweichung von der Feldkapazität [%]	max. Wsp. [mNN]	-20	121.20	-10	121.24	0	121.29	10	121.32	20	121.41
Abweichung von der Feldkapazität [%]	max. Wsp. [mNN]												
-20	121.20												
-10	121.24												
0	121.29												
10	121.32												
20	121.41												
<p>Anfangsspeicherinhalt:</p> <p>Die Auswirkung einer Veränderung des Anfangsinhaltes (Abweichung vom Stauziel) auf den resultierenden maximalen Wasserstand ist darzustellen. Damit lässt sich zeigen, ob sich überproportionale Abweichungen der Ergebnisse einstellen. Ist dies der Fall, erhält die Betrachtung aus Kapitel 6.2 besondere Bedeutung.</p>	<p>N-A-Modell und Hochwassermerkmal-Simulation</p> <table border="1"> <caption>Data for Variation des Anfangsspeicherinhaltes</caption> <thead> <tr> <th>Abweichung vom Stauziel [%]</th> <th>max. Wsp. [mNN]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>121.28</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>121.29</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>121.30</td> </tr> <tr> <td>20</td> <td>121.33</td> </tr> <tr> <td>30</td> <td>121.35</td> </tr> </tbody> </table>	Abweichung vom Stauziel [%]	max. Wsp. [mNN]	0	121.28	5	121.29	10	121.30	20	121.33	30	121.35
Abweichung vom Stauziel [%]	max. Wsp. [mNN]												
0	121.28												
5	121.29												
10	121.30												
20	121.33												
30	121.35												
<p>Abflusskonzentration:</p> <p>Zur Kontrolle der Abflusskonzentration und der Wellenform sollten alle Einheitsganglinien der Teileinzugsgebiete und des gesamten Einzugsgebietes als normierte Ganglinien dargestellt werden.</p> <p>Die Gesamtdauer der einzelnen Ganglinien soll zwischen dem drei- bis sechsfachen der Anlaufzeit liegen!</p>	<p>N-A-Modell</p> <p> $TA[h] = c_1 \left((L \times L_c) / I_G^{1,5} \right)^{0,26} \times e^{-0,016 \times b} \times e^{0,004 \times w}$ $U_{max} = 1 / (A^* \times TA) [1/h]$ $c_1 = 0,2-0,4$ </p> <p>Dimensionslose EGL von Lutz</p>												

8 Bewertung des verbleibenden hydrologischen Risikos

Hochwasserereignisse, die höhere Wasserstände als beim Bemessungsfall 1 und 2 verursachen, können nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund fordert die DIN 19700, das hydrologische Risiko einer Belastung größer als das BHQ_2 zu bewerten.

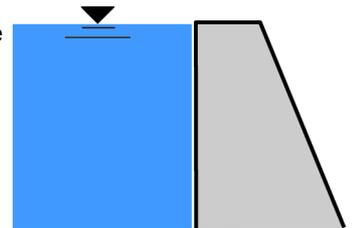
8.1 Bewertung des Risikos durch Skalierung der Belastung

Der Einstau bis zur Mauerkrone bzw. Oberkante der Dichtung einer Stauanlage markiert den Übergangszustand, ab dem ein Gefahrenpotenzial für die Anlagensicherheit gegeben ist. Liegt der maximale Wasserstand aus BHQ_1 oder BHQ_2 unterhalb dieses Grenzzustandes, so muss die zu diesem Zustand gehörende Belastung größer als das BHQ_2 sein. Die Differenz der Belastungen zwischen Grenzzustand und BHQ_2 ist ein Maß für die Unsicherheiten, die in der Berechnung zum BHQ enthalten sein können, ohne die betreffende Stauanlage zu gefährden. Die Ermittlung dieser Differenz ist eine einfache und anschauliche Möglichkeit zur Abschätzung des verbleibenden hydrologischen Risikos. Die Vorgehensweise zur Ermittlung ist nur bei bestehenden Stauanlagen möglich und beinhaltet folgende Schritte:

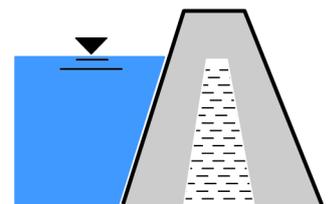
1. Festlegen der maximalen Einstauhöhe in Abhängigkeit vom Bauwerkstyp
2. Erweiterung der Bemessungsganglinie, bis die maximale Einstauhöhe erreicht ist
 - a) beim N-A-Modell: Erhöhung des Bemessungsniederschlages
 - b) bei der Abflussanalyse: Skalierung der Bemessungsganglinie nach oben
3. Registrieren der erforderlichen Vergrößerung der Bemessungsganglinie zum Erreichen der maximalen Einstauhöhe und Vergleich mit der Belastung zum BHQ_2 .

Zuerst muss die maximale Einstauhöhe festgelegt werden. Hier ist zwischen Mauer und Damm zu unterscheiden. Für eine Mauer liegt als maximale Höhe die tiefste Stelle der Krone fest. Die maximale Einstauhöhe eines Dammes liegt auf der Oberkante der Dichtung.

Mauer Die maximale Einstauhöhe liegt auf der tiefsten Stelle der Mauerkrone.



Damm Die maximale Einstauhöhe liegt auf der tiefsten Stelle der Dichtung.



Der zweite Schritt besteht in der Erhöhung der Belastung des BHQ_2 , bis die maximale Einstauhöhe in der Stauanlage erreicht wird. Dazu ist entweder der entsprechende Bemessungsniederschlag oder die Bemessungsganglinie zu erhöhen. Als Randbedingungen gelten die Vorschriften entsprechend dem Bemessungsfall 2.

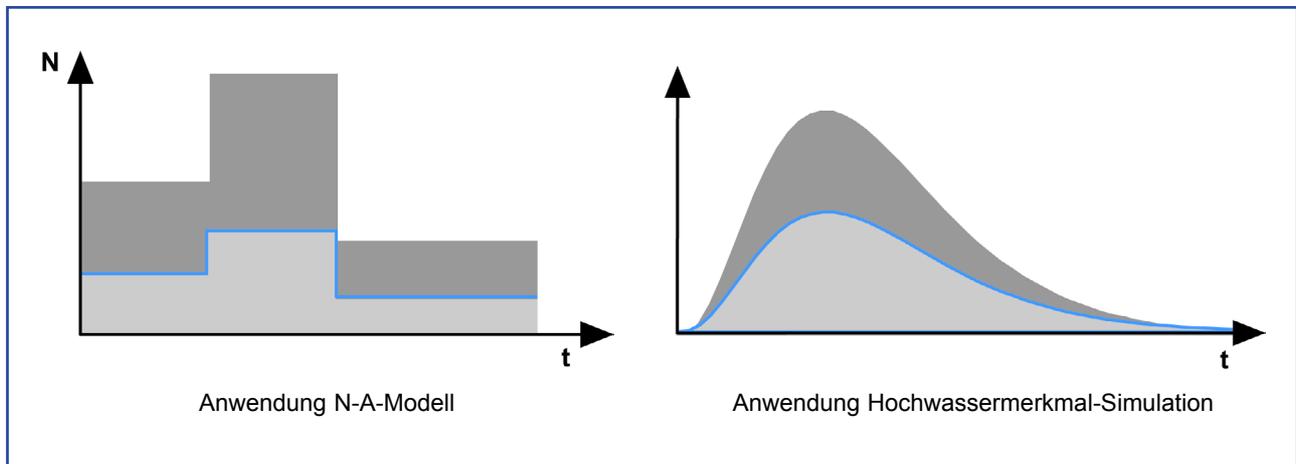


Abb. 13: Abschätzung des Risikos durch Skalierung der Belastungen

Ist der maximale Stau im Bauwerk erreicht, zeigt die prozentuale Veränderung des Scheitels bzw. der Fülle der Bemessungsganglinie zum einen die Toleranz der Anlage gegenüber Unsicherheiten in der Ermittlung der Bemessungsganglinien an, zum anderen kann der Scheitel aber auch zu Vergleichszwecken in die bestehende Extremwertstatistik eingeordnet werden. Die Toleranz der Anlage kann den unterschiedlichen Ergebnissen, resultierend aus verschiedenen Anfangs- und Randbedingungen, Verteilungsfunktionen der Extremwertstatistik oder unterschiedlichen Datengrundlagen gegenübergestellt werden. Für besonders sensitive Parameter bzw. Randbedingungen mit starkem Einfluss auf das Ergebnis, bietet es sich an, die Grenzbetrachtung ebenfalls durchzuführen.

Je größer die mögliche Erhöhung der Belastung bis zum Erreichen der maximalen Einstauhöhe ist, um so sicherer ist die Stauanlage. Ein Beispiel der Berechnung ist in Anlage 5 gegeben.

8.2 Bewertung des Risikos mit Hilfe maximierter Gebietsniederschläge

Eine Bewertung des verbleibenden hydrologischen Risikos mit Hilfe maximierter Gebietsniederschläge (MGN) ist sowohl in Verbindung mit N-A-Modellen als auch bei der Hochwassermerkmal-Simulation möglich. Unter Verwendung eines N-A-Modells sind bei Ansatz des MGN alle Modellparameter wie beim Bemessungsfall 2 aus Gründen der Vergleichbarkeit unverändert zu übernehmen. Der resultierende maximale Wasserstand sollte den Ergebnissen aus den Bemessungsfällen gegenübergestellt werden.

Bei Anwendung der Hochwassermerkmal-Simulation ist ein Vergleich zum MGN mit Hilfe der aus den Bemessungsganglinien rückgerechneten Niederschläge möglich (siehe Anlage 3).

Hinsichtlich der Herkunft der maximierten Gebietsniederschläge wird auf Kapitel 5.1.3 verwiesen.

9 Literatur

- BAUMGART, A.; LIEBSCHER, H.-J. (1996): Lehrbuch der Hydrologie, Band 1, Allgemeine Hydrologie. Gebrüder Bornträger Verlag. Berlin, Stuttgart.
- BWK (2001): Wasserbilanzmodelle in der Wasserwirtschaft. Merkblatt 2. Düsseldorf
- DVWK (1997a): Freibordbemessung an Stauanlagen. DVWK-Merkblatt 246. Bonn.
- DVWK (1997b): Maximierte Gebietsniederschlagshöhen für Deutschland. DVWK-Mitteilungen 29. Bonn.
- DVWK (1999a): Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. DVWK-Merkblatt 251.
- DVWK (1999b): Hochwasserabflüsse. DVWK-Schriften 124. Bonn.
- DWD (1997): KOSTRA-Atlas, Starkniederschlagshöhen für Deutschland. Offenbach.
- DYCK, S. (1980): Angewandte Hydrologie.
Teil 1: Berechnung und Regelung des Durchflusses der Flüsse.
Teil 2: Der Wasserhaushalt der Flussgebiete.
Verlag für Bauwesen. Berlin
- DYCK, S.; PESCHKE, G. (1995): Grundlagen der Hydrologie. Verlag für Bauwesen. Berlin
- E DIN 19700 Stauanlagen, Manuskript März 2004
Teil 10 Gemeinsame Festlegungen
Teil 11 Talsperren
Teil 12 Hochwasserrückhaltebecken
Teil 13 Staustufen
Teil 14 Pumpspeicherbecken
Teil 15 Sedimentationsbecken
(Weißdruck: vorauss. Juli 2004)
- KLEEBERG, H.-B.; SCHUMANN, A. (2001): Ableitung von Bemessungsabflüssen kleiner Überschreitungswahrscheinlichkeiten. Wasserwirtschaft, Jg. 91, Heft 2.
- KLEEBERG, H.-B.; SCHUMANN, A. (2001): Zur Ableitung von Hochwasserabflüssen geringer Überschreitungswahrscheinlichkeiten. Wasserwirtschaft, Jg. 91, Heft 12.
- MANIAK, U. (1997): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Springer Verlag. Berlin, Heidelberg.
- PLATE, E. (1993): Statistik u. angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften. Berlin.
- OSTROWSKI, M.W. et.al. (1999): Ermittlung von Bemessungsabflüssen für Stauanlagen in Nordrhein-Westfalen nach DIN 19700. Fachgebiet Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Darmstadt.
- SCHIFFLER, G.R. (1992): Experimentelle Erfassung und Modellierung der Infiltration stärkerer Niederschläge unter realen Feldbedingungen. IHW, 40. Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft Universität Karlsruhe (TH). Karlsruhe.

Inhaltsverzeichnis der Anlagen

1	Gleichungen zur Maximierung der Schiefe	33
2	Ansätze zur Infiltration	34
2.1	Infiltrationsansatz nach Holtan	34
2.2	Infiltrationsansatz nach Horton	35
3	Hochwassermerkmal-Simulation	36
3.1	Prinzip der Hochwassermerkmal-Simulation	36
3.2	Parameterermittlung	36
3.3	Erzeugen der Hochwasserganglinien	40
3.4	Plausibilitätsprüfungen der Hochwasserganglinien	42
3.5	Anwendung	44
3.6	Literatur	47
4	Beispiele für Niederschlagsintensitätsverteilungen	48
5	Bewertung des Risikos durch Skalierung der Belastung	51
5.1	Skalierung der Belastung mit Hilfe eines N-A-Modells	51
5.2	Skalierung der Belastung mit Hilfe der Hochwassermerkmal-Simulation	52

1 Gleichungen zur Maximierung der Schiefe

Formeln zur Abschätzung von Hochwasserscheitelabflüssen bei maximierter Schiefe	
Schiefe $c = 3,0$	Schiefe $c = 4,0$
Wenn HQ_{100} als bekannt angenommen wird:	
$HQ_{1000} = MHQ + (HQ_{100} - MHQ) \cdot 1,77$	$HQ_{1000} = MHQ + (HQ_{100} - MHQ) \cdot 1,89$
$HQ_{10000} = MHQ + (HQ_{100} - MHQ) \cdot 2,56$	$HQ_{10000} = MHQ + (HQ_{100} - MHQ) \cdot 2,83$
Wenn HQ_{10} als bekannt angenommen wird:	
$HQ_{100} = MHQ + (HQ_{10} - MHQ) \cdot 3,43$	$HQ_{100} = MHQ + (HQ_{10} - MHQ) \cdot 4,36$
$HQ_{1000} = MHQ + (HQ_{10} - MHQ) \cdot 6,06$	$HQ_{1000} = MHQ + (HQ_{10} - MHQ) \cdot 8,25$
$HQ_{10000} = MHQ + (HQ_{10} - MHQ) \cdot 8,77$	$HQ_{10000} = MHQ + (HQ_{10} - MHQ) \cdot 12,35$
Quelle: DvWK (1999): Hochwasserabflüsse. DVWK Schriften 124, Kommissionsvertrieb Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn, S. 126.	

2 Ansätze zur Infiltration

Ansätze zur Infiltration mit Angabe von Standardparametern und weiterführender Literatur.

2.1 Infiltrationsansatz nach HOLTAN

Als Funktion in Abhängigkeit der Bodenfeuchte:

$$\text{Inf} = a_v \cdot (\text{BF}_{\text{max}} - \text{BF})^n + f_c$$

Inf: pot. Infiltrationsintensität [mm/h]

a_v : Vegetationsparameter

BF_{max} : Bodenfeuchte bei Sättigung [mm]

B: aktuelle Bodenfeuchte [mm]

n: Bodenkonstante [-], Holtan setzt für alle Böden $n = 1,4$

f_c : Endinfiltrationsvermögen [mm/h], nach Holtan die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit

Als Funktion in Abhängigkeit der Zeit:

$$\text{Inf} = a_v \cdot \left[a_v \cdot (n - 1) \cdot t + C(t) \right]^{-\frac{n}{n-1}} + f_c$$

$C(t)$: Versickerungskapazität [mm]

av – Vegetationsparameter (Holtan-Gleichung)		
Landnutzung	schlechte Bedingungen [inch / h inch ^{1,4}]	gute Bedingungen [inch / h inch ^{1,4}]
Brachland (fallow)	0,1	0,3
Getreide (row crops)	0,1	0,2
niederes Getreide (small grains)	0,2	0,3
Gemüse, Hülsenfrüchte (hay, legumes)	0,2	0,4
Rasen (hay, sod)	0,4	0,6
Weide, hohes Gras (pasture, bunchgrass)	0,2	0,4
teilweise mit Gras bedeckt (temporary pasture, sod)	0,4	0,6
vollständig mit Gras bedeckt (permanent pasture, sod)	0,8	1,0
Wald (woods, forests)	0,8	1,0
Quelle: HOLTAN, H.N. (1970): Representative and experimental basins as dispersed systems. Symposium of Wellington. Paris: IASH 1972-73, Unesco, S. 112-126. VISSMANN, W. (1977): Introduction to hydrology. Harper & Row Publishers, New York.		

2.2 Infiltrationsansatz nach HORTON

NEUMANN, W. & MARR, G. (1976) benutzen eine Form der Gleichung, die von der Bodenfeuchte abhängig ist mit f_0 , Infiltrationsvermögen beim Welkepunkt.

Als Funktion in Abhängigkeit der Bodenfeuchte:

$$\text{Inf} = (f_0 - f_c) \cdot e^{-k \cdot \text{BF}} + f_c$$

Inf: pot. Infiltrationsintensität [mm/h]

f_0 : Anfangsinfiltrationsintensität [mm/h]

f_c : Endinfiltrationsintensität [mm/h], oft k_f -Wert

k : Rückgangskonstante [1/mm]

BF: Bodenfeuchte [mm]

Als Funktion in Abhängigkeit der Zeit:

$$\text{Inf} = (f_0 - f_c) \cdot e^{-k \cdot t} + f_c$$

Inf: pot. Infiltrationsintensität [mm/h]

f_0 : Anfangsinfiltrationsintensität [mm/h]

f_c : Endinfiltrationsintensität [mm/h], oft k_f -Wert

k : Rückgangskonstante [1/h]

t : Zeit [h]

fo – Anfangsinfiltrationsintensität (Horton-Gleichung)		
	von [mm/h]	bis [mm/h]
Quelle: DYK, S. (1980): Angewandte Hydrologie, Teil 2: Der Wasserhaushalt der Flussgebiete. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.	35	40
NEUMANN, W.; MARR, G. (1976): Der Niederschlagsabfluss in städtischen Einzugsgebieten. Institut für Wasserbau, TU München, Heft 11.	36	76
k – Rückgangskonstante (Horton-Gleichung)		
	von [1/h]	bis [1/h]
Quelle: DYK, S. (1980): Angewandte Hydrologie, Teil 2: Der Wasserhaushalt der Flussgebiete. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.	0,27	0,3

3 Hochwassermerkmal-Simulation

3.1 Prinzip der Hochwassermerkmal-Simulation

Das Konzept der Hochwassermerkmal-Simulation basiert auf der Möglichkeit, den Verlauf von Hochwasserwellen anhand weniger Parameter mit Hilfe mathematischer Funktionen darzustellen. Als Parameter kommen der Scheitelwert (Q_S), die Anlaufzeit (t_A), die Form des ansteigenden Astes (m_{an}) und die Form des absteigenden Astes (m_{ab}) zum Einsatz. Entscheidend ist dabei, dass Q_S , t_A , m_{an} und m_{ab} über Verteilungsfunktionen beschrieben werden.

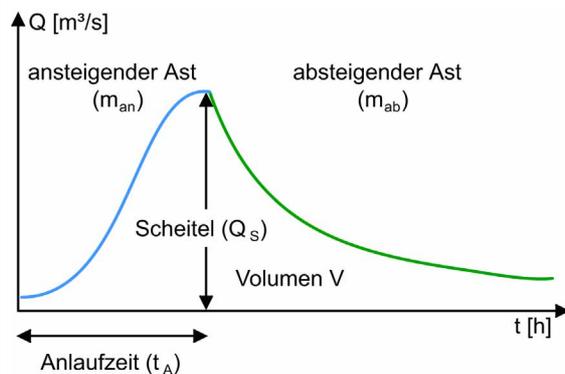


Abb. 1: Parameter der Hochwassermerkmal-Simulation

Die Ermittlung der Verteilungsfunktionen für t_A , m_{an} und m_{ab} ergibt sich aus der saisonalen Analyse aller beobachteten Hochwasserereignisse, deren Scheitel einen definierten Schwellenwert überschreiten. Für die Verteilungsfunktion des Scheitelwertes Q_S wird auf die Extremwertstatistik zurückgegriffen.

Die Mittelwerte von t_A , m_{an} und m_{ab} ergeben eine mittlere Hochwasserwelle, die repräsentativ für eine bestimmte Jahreszeit und das betrachtete Einzugsgebiet ist. Da für jeden der Parameter aber eine Verteilungsfunktion existiert, können durch Generieren von Zahlen, die der gleichen statistischen Verteilung wie die gemessenen Daten unterliegen (Ziehen) beliebig viele neue Wellen generiert werden, die unterschiedliche Eintrittswahrscheinlichkeiten besitzen und in ihrer Gesamtheit das Hochwasserspektrum des jeweiligen Einzugsgebietes repräsentieren. Wird der Vorgang des Ziehens ausreichend oft durchgeführt, ist sichergestellt, dass auch extreme Hochwasserereignisse erzeugt werden.

Im Anschluss der Generierung werden alle erzeugten Wellen als Belastung für die Stauanlage angesetzt und simuliert. Dabei gehen alle spezifischen Randbedingungen der Stauanlage in die Simulation ein. Die Zuordnung zu Eintrittswahrscheinlichkeiten erfolgt über die Auswertung der Simulationsergebnisse. Werden alle simulierten maximalen Einstauhöhen sortiert aufgetragen, können den Wasserständen in der Stauanlage Eintrittswahrscheinlichkeiten zugeordnet werden. Dadurch lassen sich den Zulaufwellen ebenfalls Eintrittswahrscheinlichkeiten zuordnen.

Die Erkenntnis aus den Ergebnissen geht über die reine Bemessung hinaus, da aufgrund der Vielzahl an generierten Ereignissen das Verhalten der Stauanlage für ein großes Hochwasserspektrum bekannt ist und sich daraus für den Betrieb der Anlage bei Hochwasser Regeln ableiten lassen. Nachfolgend ist an Beispielen der beschriebene Ansatz dokumentiert.

3.2 Parameterermittlung

3.2.1 Hochwassermerkmale

Die Hochwassermerkmal-Simulation basiert auf den Parametern Anlaufzeit, Fülle und Form des ansteigenden bzw. absteigenden Astes, die aus der Zuflussganglinie abgeleitet werden. Die Analyse des Scheitelabflusses erfolgt über die Extremwertstatistik.

Schritt 1:

Im ersten Schritt werden aus der beobachteten Abflussganglinie alle Hochwasserwellen mit einem Scheitelabfluss $> 2 \cdot MQ$ zur Auswertung herangezogen. Dabei wird zwischen Sommer (Mai bis Oktober) und Winter (November bis April) – bei ausreichend vielen Hochwasserwellen eventuell noch höher aufgelöst – unterschieden, d. h. die Parameterermittlung erfolgt jahreszeitlich getrennt.

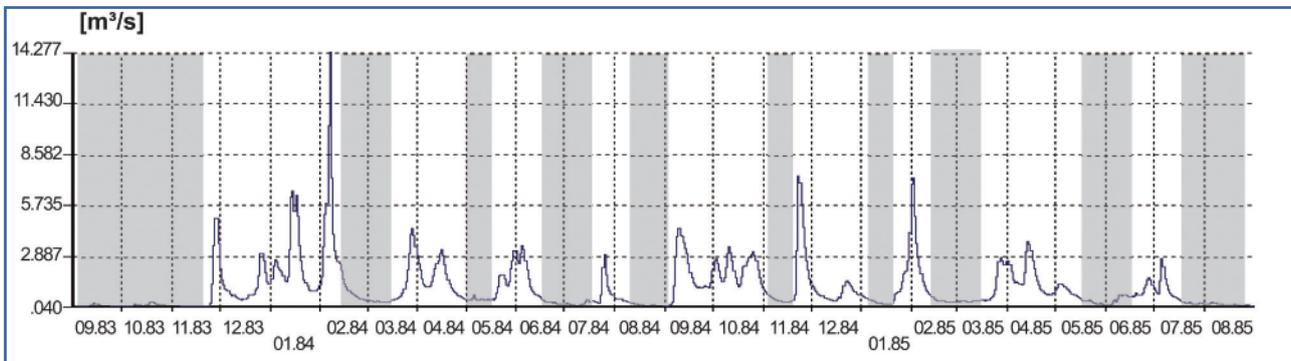


Abb. 2: Auszug der Hochwasserwellen für die Parameterermittlung

Schritt 2:

Nachdem alle für die Auswertung maßgebenden Zeiträume ausgewählt sind (in der Grafik hell hinterlegter Hintergrund), erfolgt die Berechnung der Parameter. Für jede einzelne Welle werden die Parameter getrennt ermittelt. Durch Variation der Parameter wird versucht, beobachtete und berechnete Wellen möglichst deckungsgleich zu erhalten. Für die Berechnung einer Welle kommen folgende Gleichungen zum Einsatz:

Die Form der Welle wird nach Anstieg und Abstieg unterteilt. Für die Beschreibung des ansteigenden Astes wird die Gleichung von (Dyck 1980) verwendet.

$$Q_{(t)} = (Q_s - Q_{B(t)}) \cdot \left(\left(\frac{t}{t_A} \right)^{m_{an}} \cdot e^{-m_{an} \cdot \left(1 - \frac{t}{t_A} \right)} \right) + Q_{B(t)} \quad (1)$$

mit:

- t: Zeit [0 ... t_A]
- $Q_{(t)}$: Gesamtabfluss zur Zeit t [m^3/s]
- $Q_{B(t)}$: Basisabfluss [m^3/s], über die Zeit t konstant
- Q_s : Scheitelabfluss [m^3/s]
- m_{an} : Parameter zur Beschreibung der Wellenform [-]
- t_A : Hochwasseranlaufzeit

Als Parameter gehen die Anlaufzeit t_A , der Formparameter m_{an} und der Scheitelabfluss Q_s in die Berechnung ein. Als Basisabfluss wird für den jeweiligen Zeitraum ein mittlerer Wert angesetzt.

Für die Beschreibung des absteigenden Astes wird ein hyperbolischer Verlauf angesetzt (LEICHTFUSS 1999).

$$Q_{(t)} = Q_0 \cdot \left(1 - \left(\frac{(e^k)^a - (e^{-k})^a}{(e^k)^a + (e^{-k})^a} \right) \right) \quad (2)$$

mit:

$$k = \frac{(t_s + t)}{b + m_{ab} \cdot (t_s + t)} \quad \text{und} \quad t_s = \frac{1}{\ln\left(2 \cdot \frac{Q_0}{Q_s} - 1\right) - m_{ab}}$$

- t: Zeitvariable [Tag] (muss auf Tage bezogen sein, d.h. 1 = 24h, 0,5 = 12h, usw.)
- t_s : Startposition im ablaufenden Ast
- b: Achsenabschnitt (i.d.R. zu 1 gesetzt)
- m_{ab} : Parameter zur Beschreibung des absteigenden Astes ($0,05 < m_{ab} < 0,4$)
- a: Stauchung ($0,95 < a < 1$), i.d.R. $a = 1$
- $Q_{(t)}$: Gesamtabfluss zur Zeit t [m^3/s]
- Q_0 : Definierter Maximalabfluss [m^3/s] (wird einmal zu Beginn definiert), z.B. $> 10 \cdot \text{HHQ}$)
- Q_s : Scheitelabfluss [m^3/s]

Als Parameter gehen in diese Gleichungen nur der Scheitelwert Q_s und der Formparameter m_{ab} ein. Die Hochwasserwelle fällt umso schneller ab, je kleiner der Parameter m_{ab} wird. Alle anderen Werte sind Konstanten. Der zu definierende Maximalabfluss Q_0 ist eine reine Rechengröße, die höher als der größte zu erwartende Abfluss sein muss, z.B. $> 10 \cdot \text{HHQ}$.

Exemplarisch sind für drei Hochwasserereignisse die Parameteranpassungen dargestellt.

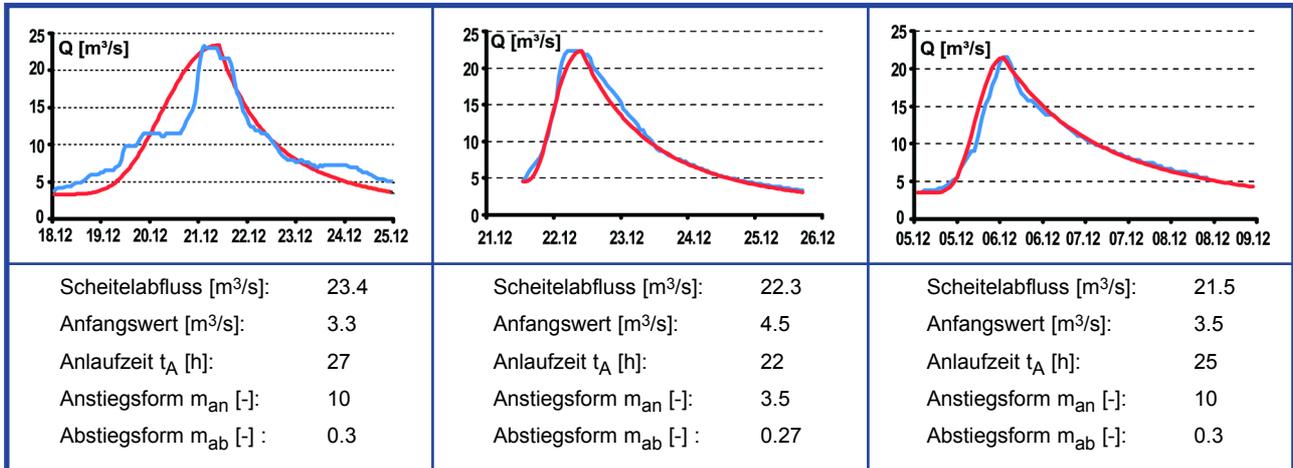


Abb. 3: Vergleich beobachtete / berechnete Wellen

Sind alle Wellen ausgewertet, existiert für jedes beobachtete Hochwasserereignis je ein Wert für die Anlaufzeit, die Anstiegs- und Abstiegsform. Für jeden dieser drei Parameter wird aus allen Werten eine Verteilungsfunktion aufgestellt, wobei sich die Pearson III Funktion in den meisten Fällen als geeignet herausgestellt hat.

Die drei Merkmalsparameter zeigen ein unterschiedliches Verhalten. Die Anlaufzeit t_A hängt direkt von den Niederschlagsereignissen ab und besitzt aufgrund dessen die größte Streuung. Bei der Anstiegsform m_{an} macht sich bereits der Einfluss der Einzugsgebietscharakteristik in der geringeren Standardabweichung bemerkbar. Die Abstiegsform m_{ab} beschreibt den ablaufenden Wellenast und ist stark von der Struktur des Einzugsgebietes geprägt.

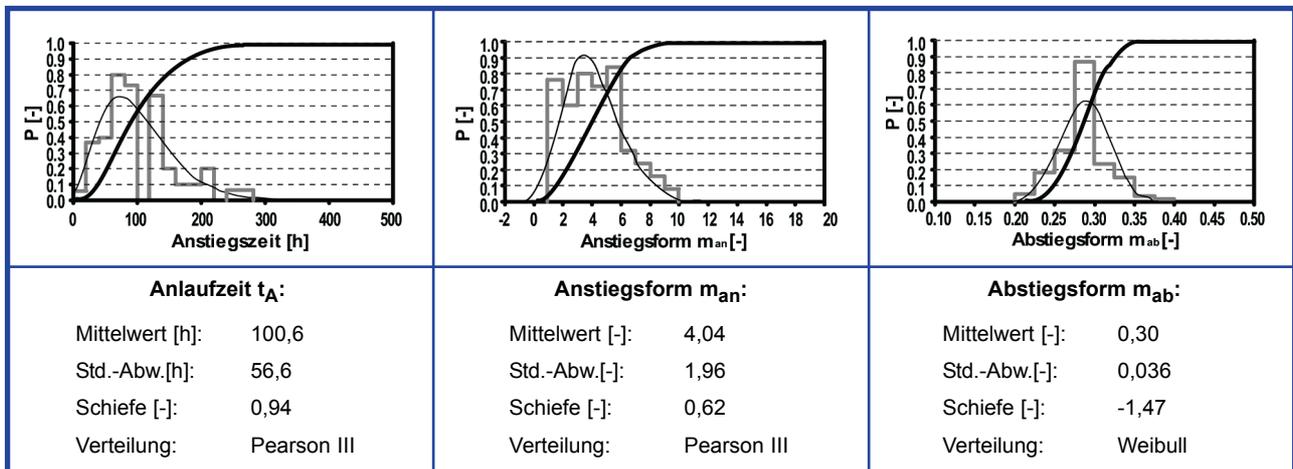


Abb. 4: Histogramme, Dichte- und Verteilungsfunktionen der Hochwassermerkmalsparameter

3.2.2 Extremwertstatistik

Die Analyse der Scheitelabflüsse erfolgt nach dem Prinzip der Extremwertstatistik. Zur Bestimmung der Scheitelwerte wird aber nicht nur eine einzige Verteilungsfunktion herangezogen, sondern alle Verteilungen, die zwischen der Funktion mit der besten Anpassung gemäß statistischer Tests (1) und der maximale Werte liefernden Verteilungsfunktion (2) liegen.

Damit ist sichergestellt, dass die möglichen Scheitelwerte innerhalb eines aufgespannten Korridors liegen und nicht nur durch eine einzige Verteilungsfunktion bestimmt sind.

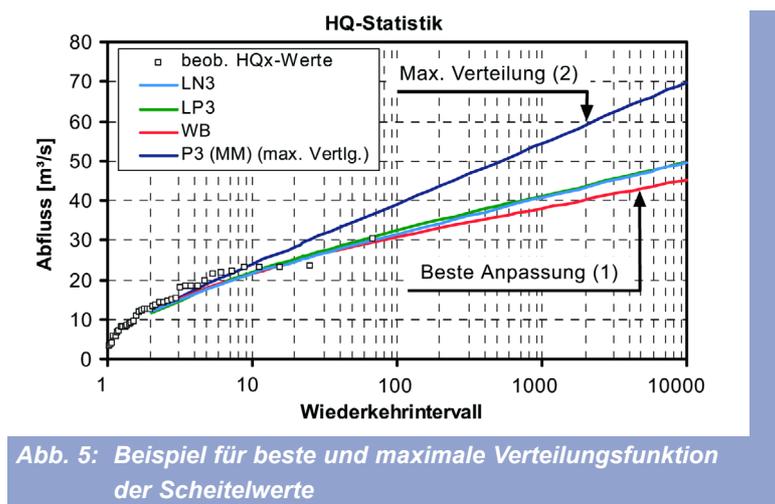


Abb. 5: Beispiel für beste und maximale Verteilungsfunktion der Scheitelwerte

3.3 Erzeugen der Hochwasserganglinien

Ist die Parameterermittlung abgeschlossen, können auf zwei Arten Hochwasserganglinien erzeugt werden: Zum einen durch Ziehen sämtlicher Parameter aus den Verteilungsfunktionen (Generierung), zum anderen durch die Aufstellung einzelner Ganglinien nach Vorgabe bestimmter Scheitelwerte in Kombination mit den Mittelwerten der Hochwassermerkmale. Werden beim Generieren ausreichend viele Wellen erzeugt, sind die Hochwasserganglinien aus den Mittelwerten der Parameter nicht mehr erforderlich, da diese bereits in den generierten Ganglinien enthalten sein werden.

3.3.1 Generierung

Das Generieren von Hochwasserganglinien läuft je erzeugter Welle nach folgendem Schema ab:

Aus den Verteilungsfunktionen für die Anlaufzeit t_A , der Form des ansteigenden bzw. absteigenden Astes der Ganglinie (m_{an} bzw. m_{ab}) wird jeweils ein Wert mit Hilfe einer gleichverteilten Zufallszahl unabhängig voneinander gezogen.

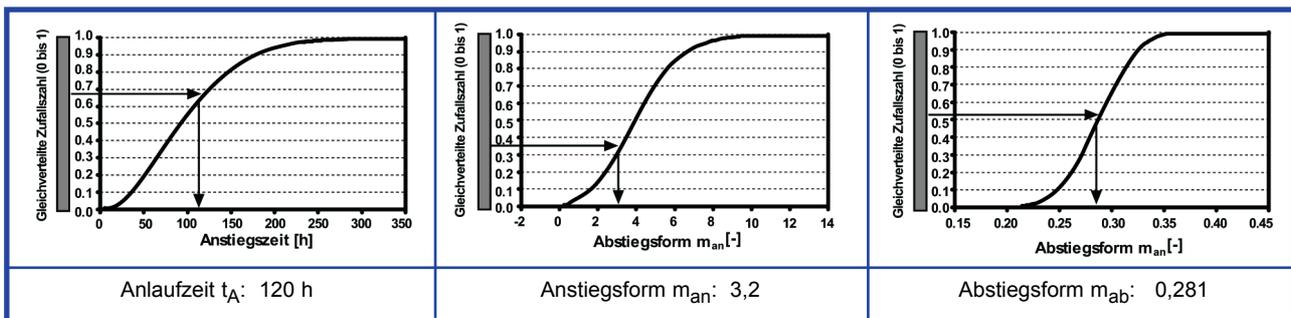


Abb. 6: Ziehen der Hochwassermerkmalsparameter

Ebenso wird aus den Verteilungsfunktionen für den Scheitelwert Q_S nach dem gleichen Prinzip ein Wert gezogen, wobei zuerst die Verteilungsfunktion bestimmt und aus dieser anschließend der Wert selbst gezogen wird. Mit Hilfe der aufgeführten Gleichungen lässt sich nun eine vollständige Hochwasserganglinie berechnen.

Stehen Parameter in einer Beziehung zueinander, d. h. eine Unabhängigkeit ist nicht mehr gegeben, so wird ein Parameter in Abhängigkeit des anderen definiert. Dieser Fall ist jedoch selten.

Der Generierungsprozess kann beliebig oft zur Erzeugung einer erwünschten Anzahl an Wellen wiederholt werden. Die Anzahl ist in Abhängigkeit des maximal zu erreichenden Wiederkehrintervalls zu definieren, z. B. sind für das Erreichen eines HQ_{1000} mindestens 1000 Wellen zu generieren.

Der Vorteil der Generierung vieler Ereignisse besteht in der Wiedergabe des kompletten Hochwasserspektrums für den jeweiligen Standort.

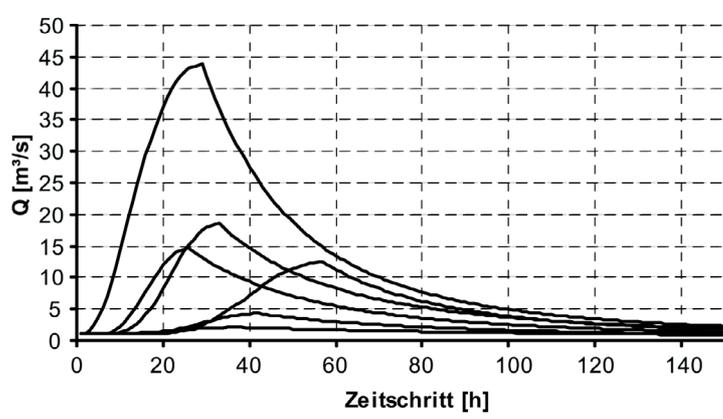


Abb. 7: Auszug generierter Hochwasserwellen

3.3.2 Einzelwellen ohne Generierung

Werden die Mittelwerte der Anlaufzeit \bar{t}_A , der Form des ansteigenden bzw. absteigenden Astes (\bar{m}_{an} bzw. \bar{m}_{ab}) benutzt, ergeben sich für die Form der Welle mittlere Verhältnisse. Die Eintrittswahrscheinlichkeit hängt nur vom Scheitel Q_S ab. Die Verteilungsfunktion aus der Extremwertstatistik mit dem besten Testergebnis wird als Ausgangsfunktion zur Vorgabe der Wellenfülle angesetzt. Für die restlichen Verteilungsfunktionen erfolgt für gleiche Wiederkehrintervalle des Scheitels eine Anpassung der Anlaufzeiten, so dass die Füllen je Wiederkehrintervall für alle Verteilungsfunktionen identisch sind. Durch diese Vorgehensweise ist gewährleistet, dass mit zunehmendem Scheitelabfluss die Reaktion aus dem Einzugsgebiet schneller abläuft.

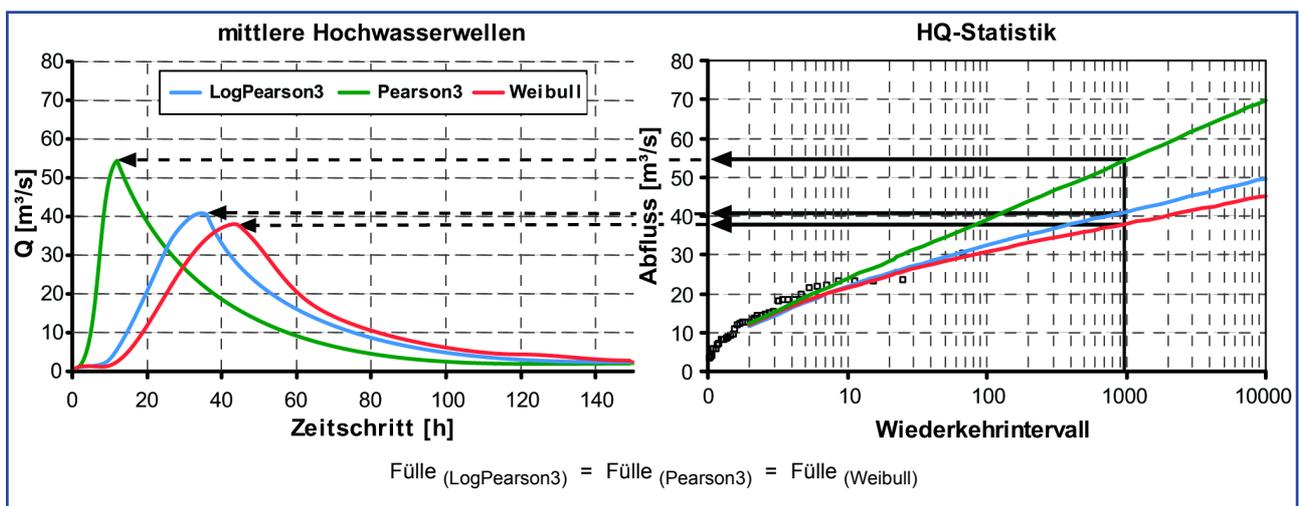


Abb. 8: HQ_{1000} bei mittlerer Wellenform

Die Betrachtung der Wellen zeigt, dass die Aussage, ob es sich um ein 1000-jährliches Hochwasserereignis handelt, nicht allein über den Scheitelabfluss zu bestimmen ist, sondern aus der Betrachtung von Scheitel, Fülle und letztendlich durch die ausgelöste Wirkung in der Stauanlage definiert ist.

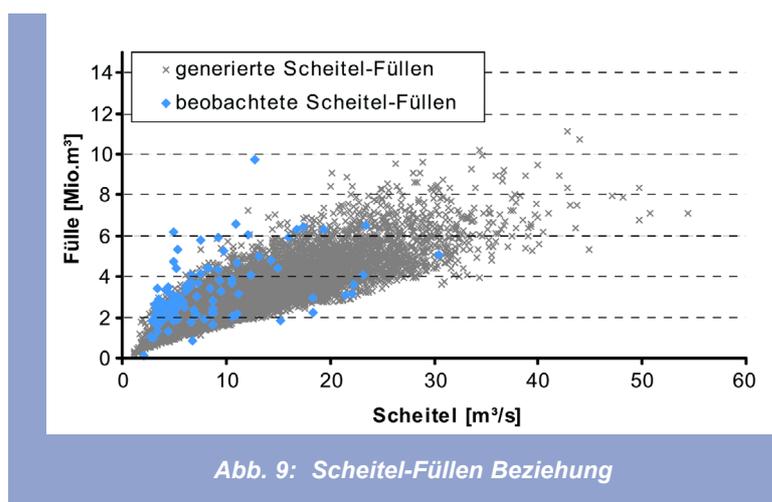
3.4 Plausibilitätsprüfungen der Hochwasserganglinien

Plausibilitätsprüfungen sind ein unverzichtbarer Bestandteil in der Ermittlung von Extremereignissen. Zur Prüfung bieten sich folgende Mittel an:

- Auftragen der Scheitel-Füllen-Beziehung beobachteter Ereignisse und Vergleich mit den berechneten Ganglinien
- Auftragen der Anlaufzeit-Scheitel-Beziehung beobachteter Ereignisse und Vergleich mit den berechneten Ganglinien
- Rückrechnung der berechneten Ganglinien auf den Niederschlag und Vergleich mit beobachteten Starkniederschlägen, KOSTRA-Werten, MGN, etc.
- Vergleich beobachteter Hochwasserereignisse mit berechneten Wellen aus dem Generierungsprozess

3.4.1 Beziehung der Scheitel und Füllen

Eine Möglichkeit der Prüfung besteht in der Aufstellung der Beziehung zwischen beobachteten Abflussscheiteln und korrespondierenden Füllen und einem Vergleich mit den erzeugten Ganglinien.



Die berechneten Füllen sollten das beobachtete Verhalten nachbilden. In der Abbildung ist zu sehen, dass die Punktwolke der generierten Ganglinien das Spektrum der beobachteten Werte umfasst, mit Ausnahme kleiner Scheitel, aber volumenstarker Ereignisse.

3.4.2 Beziehung der Anlaufzeiten und Scheitel

Die Gegenüberstellung von Abflussscheitel und Anlaufzeit gibt einen Hinweis auf verkürzte Reaktionszeiten eines Einzugsgebietes, wie es bei Extremereignissen erwartet wird bzw. bereits beobachtet wurde. Diesem Umstand wird durch die Verwendung einer Verteilungsfunktion von t_A und dem Erzeugen vieler Hochwasserganglinien automatisch Rechnung getragen, da bei einer großen Anzahl generierter Wellen davon auszugehen ist, dass auch solche Zufallszahlen gezogen werden, die Hochwasserwellen aus kurzer Anlaufzeit und hohem Scheitel generieren.

3.4.3 Rückrechnung der Ganglinien auf den Niederschlag

Eine weitere Möglichkeit zur Prüfung der Plausibilität erfolgt über die Rückrechnung der berechneten Hochwasserwellen auf den Niederschlag. Dabei entspricht das Volumen unter den generierten Ganglinien – abzüglich des Basisabflusses – dem effektiven Niederschlag. Über die Annahme von Abflussbeiwerten lässt sich der gefallene Niederschlag bestimmen, wobei davon auszugehen ist, dass bei Extremereignissen ($T_n > 100a$) der Abflussbeiwert annähernd 1 betragen wird.

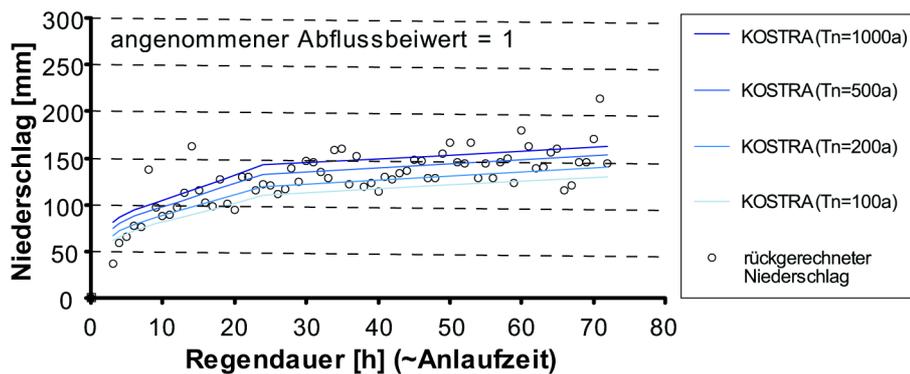


Abb. 10: Rückgerechnete Niederschläge im Vergleich mit KOSTRA-Werten

In der Abb. 10 sind KOSTRA-Werte und rückgerechnete Niederschläge – mit einem Abflussbeiwert von 1 – aus den generierten Ganglinien aufgetragen. Die Dauer des Niederschlages wird hierbei gleich der Anlaufzeit t_A gesetzt. Eingetragen sind nur die größten rückgerechneten Niederschläge je Anlaufzeit. Es ist klar erkennbar, dass die rückgerechneten Niederschläge im Spektrum der Werte aus dem KOSTRA-Atlas liegen oder sogar darüber.

3.4.4 Vergleich zu beobachteten Hochwasserereignissen

Als letzter Schritt in der Prüfung der Plausibilität ist der Vergleich zwischen tatsächlich beobachteten Hochwasserereignissen und den berechneten Hochwasserwellen vorzunehmen (Kapitel 3.5.3).

3.5 Anwendung

3.5.1 Anwendung auf einfache wasserwirtschaftliche Systeme

Bei einfachen wasserwirtschaftlichen Systemen, die nur aus einem Zulauf und der Stauanlage selbst bestehen, beschränkt sich die Ermittlung der Merkmalsparameter auf einen Pegel. Gegenseitige Abhängigkeiten zu benachbarten Pegeln gibt es nicht.

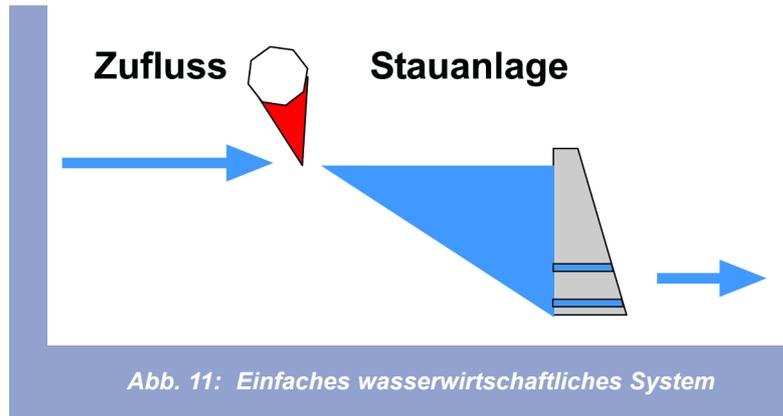


Abb. 11: Einfaches wasserwirtschaftliches System

Aus diesem Grund kann die im Kapitel 3.2 und 3.3 der Anlagen beschriebene Vorgehensweise direkt auf die Abflussmessreihe angewendet werden.

Wird das Staubauwerk mit allen generierten Hochwasserwellen belastet und werden die im Bauwerk resultierenden höchsten Wasserstände statistisch ausgewertet, so ergibt sich eine Verteilungsfunktion, die den Wasserstand mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit verknüpft.

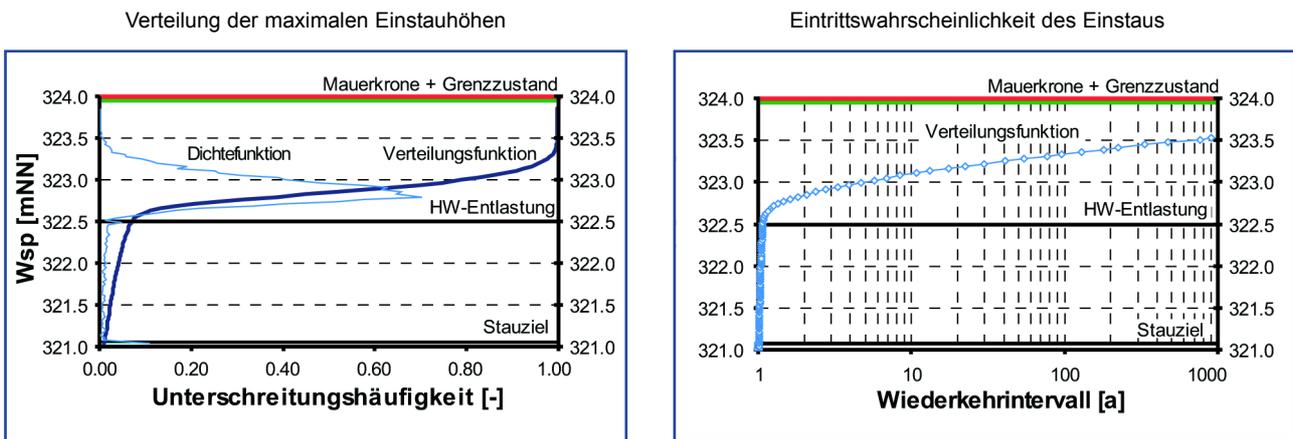


Abb. 12: Simulierte Wasserstände aus den generierten Hochwasserwellen (aufgetragen bis zum HQ1000)

Aus der Abbildung ist erkennbar, dass bei einem für alle Simulationen gleichbleibenden Anfangsinhalt auf Höhe des Stauziels, mit einem Wiederkehrintervall von 1000 Jahren sich ein Überstau über die Schwelle der Hochwasserentlastung von ca. 1 m ergibt.

3.5.2 Erweiterung auf größere wasserwirtschaftliche Systeme

Die Methode, wie sie für ein kleines Beispielsystem mit nur einem Zufluss aufgezeigt wurde, lässt sich auch auf ganze Flussgebiete mit mehreren Zuflüssen übertragen. Am Beispiel der Eifel-Rur Talsperren wird die Vorgehensweise demonstriert.

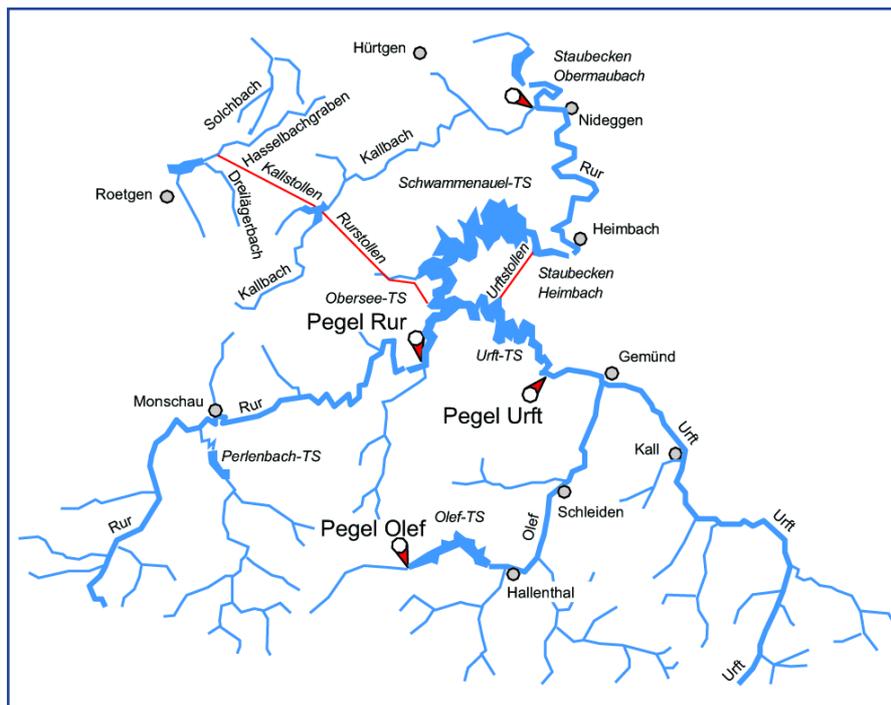


Abb. 13: Projektgebiet der Eifel-Rur Talsperren

Im Projektgebiet sind an drei Pegeln ermittelte Abflussganglinien vorhanden. Für jede Stelle lassen sich die Hochwassermerkmalsparameter wie beschrieben ermitteln. Liegen Messstellen in Reihe, müssen beim unterhalb liegenden Pegel alle Werte oberhalb liegender Pegel extrahiert werden. Für Zuflüsse ohne eigene Abflussdaten können die Merkmalsparameter der nächstgelegenen Pegelstelle im Verhältnis der Einzugsgebietsgröße übertragen werden. Aus einer Analyse der beobachteten Hochwasserwellen ist festzustellen, ob Ereignisse an den verschiedenen Pegelstellen miteinander in Beziehung stehen. Trifft dies zu, dürfen die Scheitelwerte Q_S der Pegel nicht mehr unabhängig voneinander erzeugt werden. In solchen Fällen wird eine Pegelstelle als Master ausgewählt (Pegel Urft) und für alle anderen Pegel (Slaves) die Scheitelwerte gemäß der Abhängigkeit zum Master ermittelt. Die Abhängigkeit zwischen den Scheitelwerten von Master und Slave wird in Form einer Verteilungsfunktion ausgedrückt.

Die Vorgehensweise zur Ermittlung der Wellen ist dabei folgende: Zuerst wird für die Pegelstelle des Masters eine Hochwasserwelle generiert. Für alle anderen Pegelstellen (Slaves) wird über die Verteilungsfunktion zum Hochwasserscheitel des Masters der Scheitelwert Q_S gezogen und mit diesem die Hochwasserwelle skaliert. Sind auf diese Weise an allen Zuflüssen in das System die Ganglinien erzeugt, steht der Simulation des Flussgebietes mit Gewässerabschnitten, Verzweigungen und Stauanlagen in beliebiger räumlicher Auflösung nichts mehr im Wege.

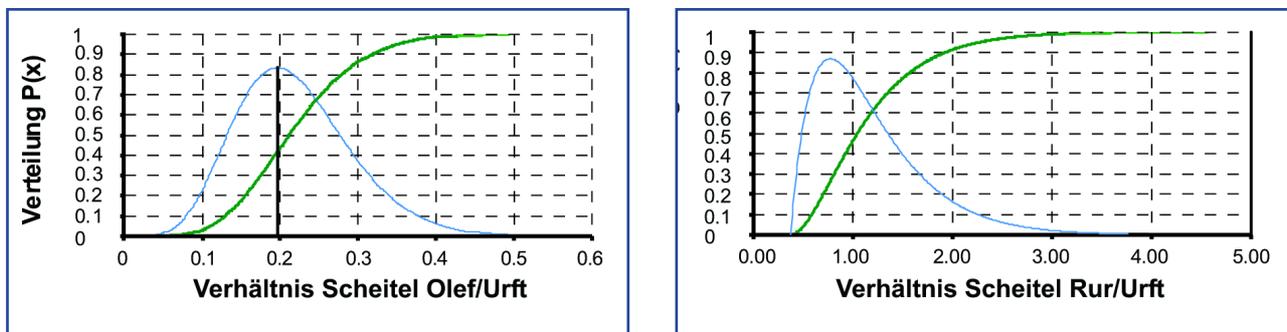


Abb. 14: Abhängigkeit der Hochwasserscheitel zwischen Urft-, Olef- und Rur-Zufluss

3.5.3 Vergleich zu beobachteten Hochwasserereignissen

Als Plausibilitätsprüfung – vergleichbar der Verifikation eines N-A-Modells – erfolgt die Gegenüberstellung beobachteter und gerechneter Hochwasserereignisse. Dabei ist wichtig, den Vergleich an Ereignissen vorzunehmen, die nicht Bestandteil der Ermittlung der Merkmalsparameter waren. Die Verifikation erfolgte an Hochwasserereignissen vom Februar 2002, die nicht für die Parameterermittlung benutzt wurden. Der Qualitätsnachweis der generierten Wellen ist erbracht, wenn für jede der ausgewählten beobachteten Hochwasserereignisse eine generierte Ganglinien existiert, die hinsichtlich des Scheitels und der Form übereinstimmen. Zum Vergleich sind der beobachtete und der im Flussgebietsmodell ausgewiesene Zufluss zur Rurtalsperre dargestellt.

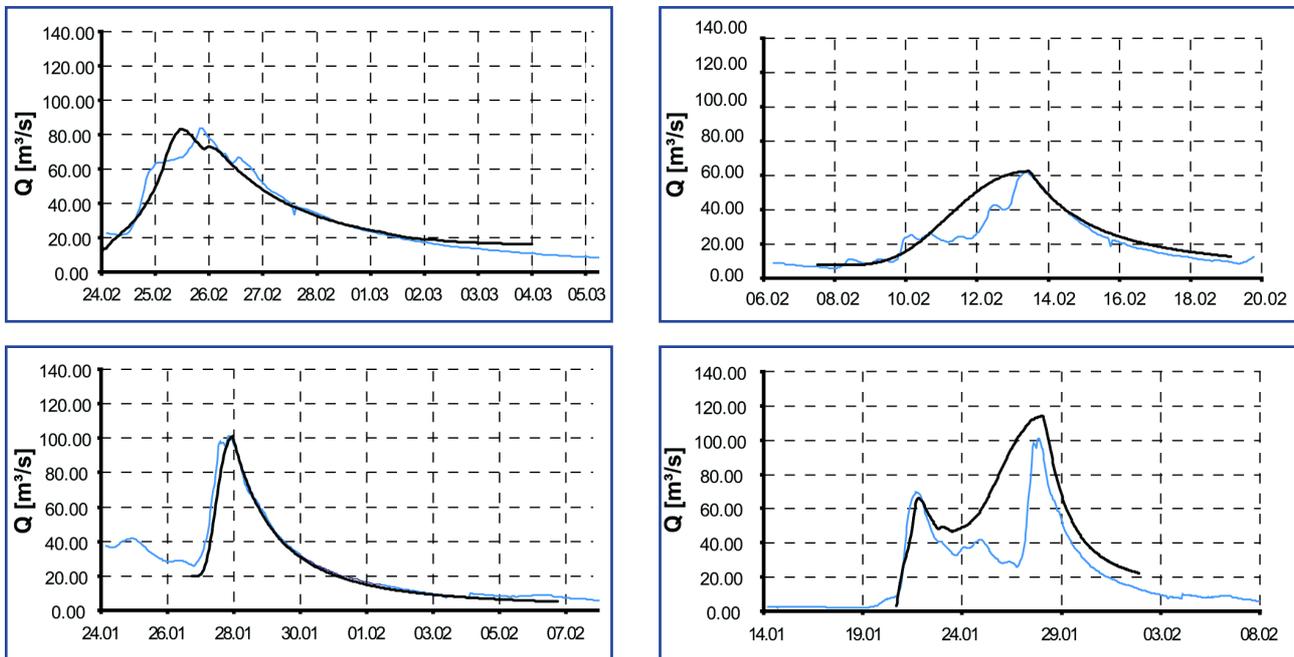


Abb. 15: Vergleich beobachtete / berechnete Hochwasserereignisse

Die Übereinstimmung der Wellen kann als gelungen bezeichnet werden. Zu beachten ist, dass auch Doppelwellen mit entsprechenden Scheitelertrittszeiten durch den Generierungsprozess erzeugt wurden.

3.6 Literatur

DYCK, S. (1980): Angewandte Hydrologie. Teil 1 & 2. VEB Verlag f. Bauwesen, Berlin.

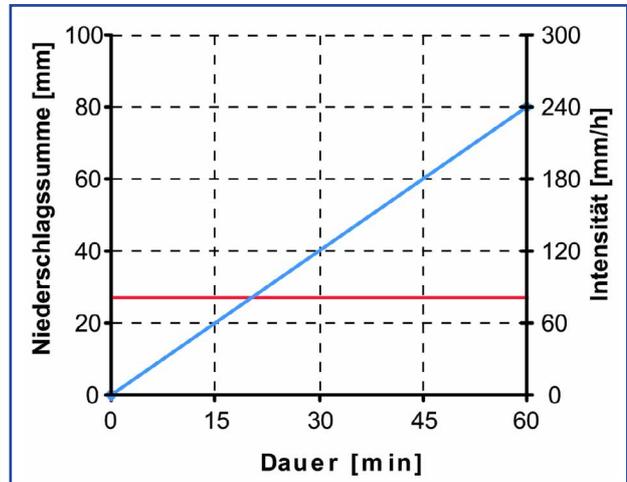
LEICHTFUSS, A.; LOHR, H. (1999): Die stochastisch-deterministische Generierung extremer Abflusszustände. In: Bemessungsabflüsse für kleine Einzugsgebiete. Universität Kaiserslautern; FG Wasserbau und Wasserwirtschaft; Tagungsband zum Kolloquium am 4./5. März 1999.

WVER (2001): Sicherheitsüberprüfung der Hochwasserentlastungsanlagen des Wasserverbandes Eifel-Rur. SYDRO Consult. Unveröffentlichtes Gutachten.

4 Beispiele für Niederschlagsintensitätsverteilungen

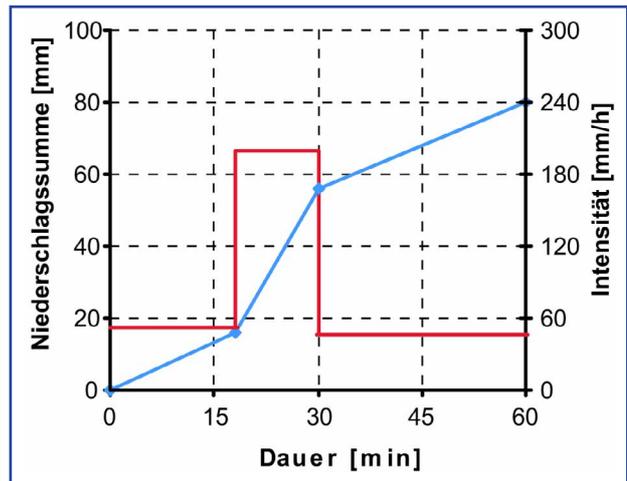
Blockregen

Dauer [min]	N-Summe [mm]	N-Zuwachs [mm]	N-Intensität [mm/h]
0.0	0		
60.0	80.00	80.00	80.00



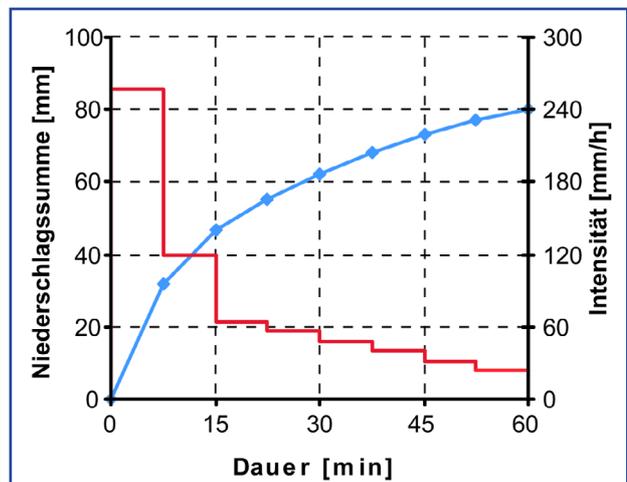
DWVK-Verteilung

Dauer [min]	N-Summe [mm]	N-Zuwachs [mm]	N-Intensität [mm/h]
0.0	0		
18.0	16.00	16.00	53.33
30.0	56.00	40.00	200.00
60.0	80.00	24.00	48.00



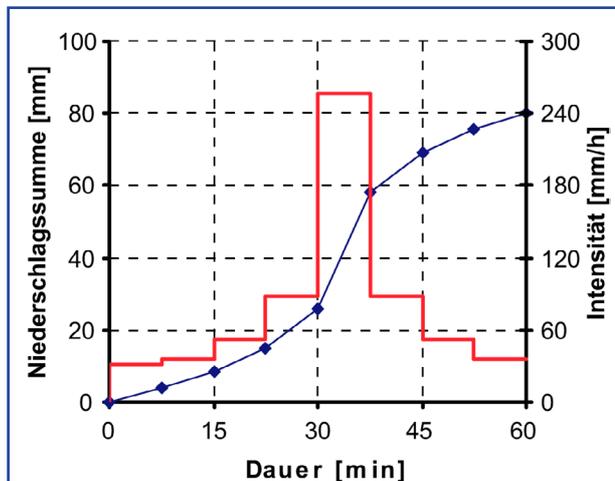
Pecher – Regen anfangsbetont

Dauer [min]	N-Summe [mm]	N-Zuwachs [mm]	N-Intensität [mm/h]
0.0	0		
7.5	32.00	32.00	256.00
15.0	47.00	15.00	120.00
22.5	55.00	8.00	64.00
30.0	62.00	7.00	56.00
37.5	68.00	6.00	48.00
45.0	73.00	5.00	40.00
52.5	77.00	4.00	32.00
60.0	80.00	3.00	24.00



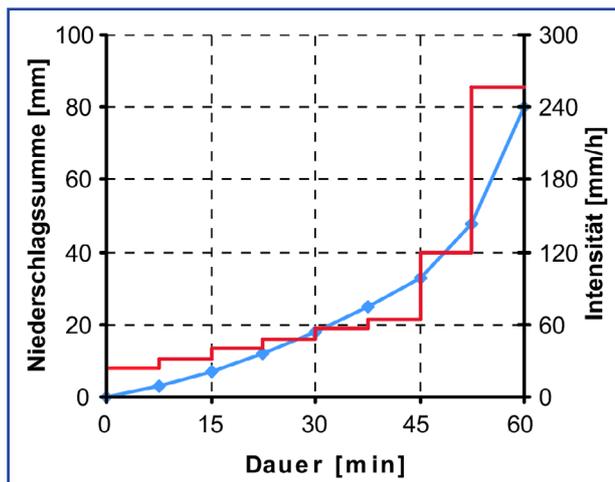
Pecher – Regen mittenbetont

Dauer [min]	N-Summe [mm]	N-Zuwachs [mm]	N-Intensität [mm/h]
0.0	0		
7.5	4.00	4.00	32.00
15.0	8.50	4.50	36.00
22.5	15.00	6.50	52.00
30.0	26.00	11.00	88.00
37.5	58.00	32.00	256.00
45.0	69.00	11.00	88.00
52.5	75.50	6.50	52.00
60.0	80.00	4.50	36.00



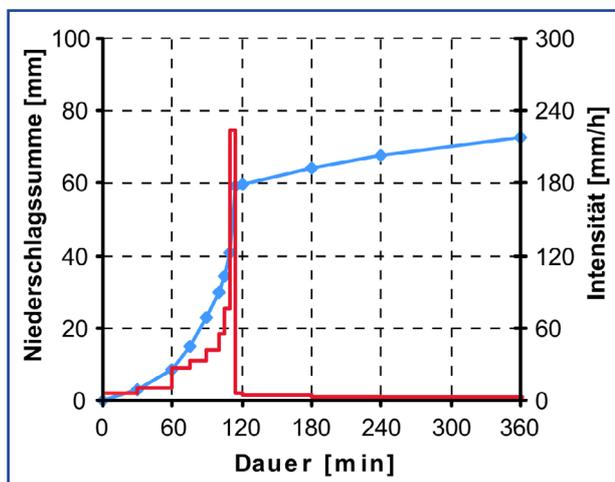
Pecher – Regen endbetont

Dauer [min]	N-Summe [mm]	N-Zuwachs [mm]	N-Intensität [mm/h]
0.0	0		
7.5	3.00	3.00	24.00
15.0	7.00	4.00	32.00
22.5	12.00	5.00	40.00
30.0	18.00	6.00	48.00
37.5	25.00	7.00	56.00
45.0	33.00	8.00	64.00
52.5	48.00	15.00	120.00
60.0	80.00	32.00	256.00



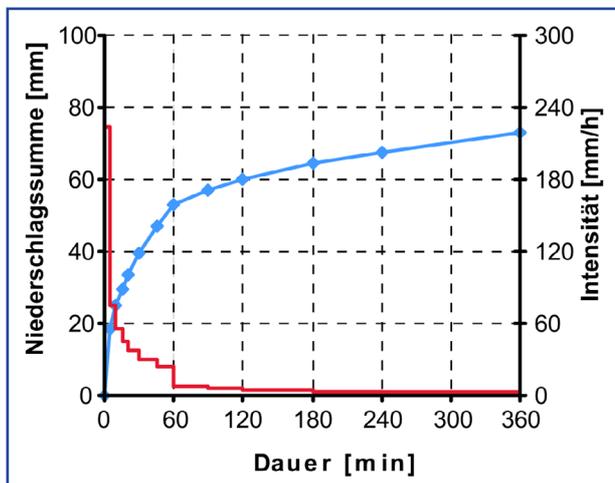
Euler – Regen mittenbetont

Dauer [min]	N-Summe [mm]	N-Zuwachs [mm]	N-Intensität [mm/h]
0.0	0		
30.0	3.15	3.15	6.30
60.0	8.43	5.28	10.57
75.0	14.97	6.53	26.13
90.0	23.00	8.03	32.14
100.0	29.90	6.90	41.40
105.0	34.50	4.60	55.20
110.0	40.80	6.30	75.60
115.0	59.40	18.60	223.20
120.0	59.90	0.50	6.00
180.0	64.30	4.40	4.40
240.0	67.70	3.40	3.40
360.0	72.80	5.10	2.55



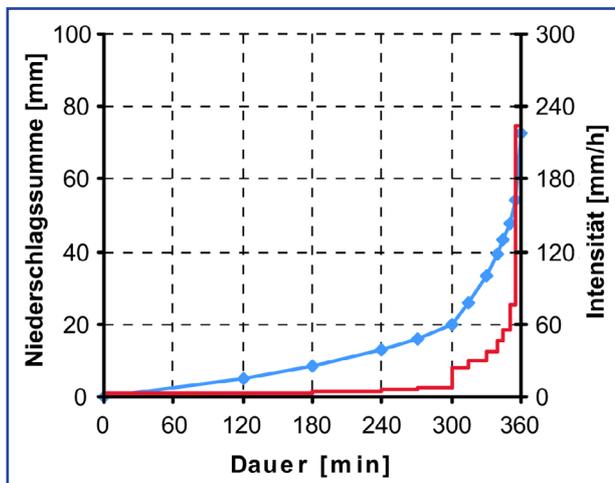
KOSTRA – Verhältnisse anfangsbetont

Dauer [min]	N-Summe [mm]	N-Zuwachs [mm]	N-Intensität [mm/h]
0 min	0		
5 min	18.6	18.6	223.2
10 min	24.9	6.3	75.6
15 min	29.5	4.6	55.2
20 min	33.3	3.8	45.6
30 min	39.5	6.2	37.2
45 min	46.9	7.4	29.6
60 min	53	6.1	24.4
90 min	56.9	3.9	7.8
2 h	59.9	3	6
3 h	64.3	4.4	4.4
4 h	67.7	3.4	3.4
6 h	72.8	5.1	2.55



KOSTRA – Verhältnisse endbetont

Dauer [min]	N-Summe [mm]	N-Zuwachs [mm]	N-Intensität [mm/h]
0 min	0		
2:00 h	5.1	5.1	2.55
3:00 h	8.5	3.4	3.4
4:00 h	12.9	4.4	4.4
4:30 h	15.9	3	6
5:00 h	19.8	3.9	7.8
5:15 h	25.9	6.1	24.4
5:30 h	33.3	7.4	29.6
5:40 h	39.5	6.2	37.2
5:45 h	43.3	3.8	45.6
5:50 h	47.9	4.6	55.2
5:55 h	54.2	6.3	75.6
6:00 h	72.8	18.6	223.2

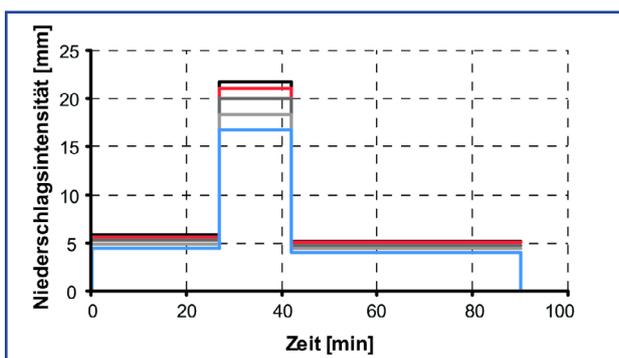


5 Bewertung des Risikos durch Skalierung der Belastung

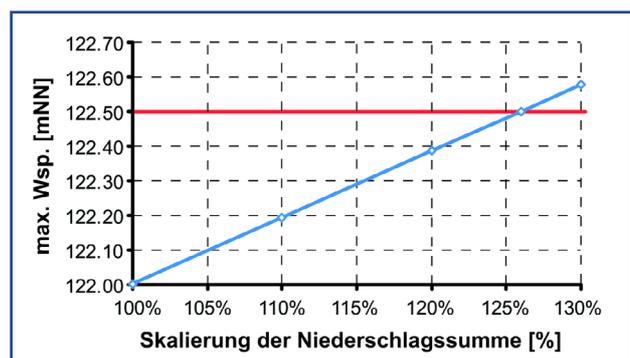
Das verbleibende hydrologische Risiko als Gegenüberstellung zwischen verschiedenen Belastungszuständen zu betrachten, ist eine anschauliche und einfache Abschätzung bei bestehenden Stauanlagen. Voraussetzung ist, dass der höchste Wasserstand, resultierend aus BHQ_1 oder BHQ_2 , unterhalb der Mauerkrone bzw. der Oberkante der Dammdichtung liegt. Das hydrologische Risiko, welches durch noch größere Hochwasserereignisse als den Bemessungsfall BHQ_2 entsteht, lässt sich über die Belastung beschreiben, die eine Stauanlage bis zu ihrem – für die Anlagensicherheit gerade noch tolerierbaren Wasserstand – einstaut.

5.1 Skalierung der Belastung mit Hilfe eines N-A-Modells

Bei der Anwendung eines N-A-Modells ist dem Bemessungsfall BHQ_2 ein auslösender Bemessungsniederschlag zugeordnet. Die Summe dieses Bemessungsniederschlages wird solange iterativ erhöht, bis sich unter den Randbedingungen des BHQ_2 der Grenzwasserstand auf Höhe der Mauerkrone bzw. Oberkante der Dichtung einstellt. Im Beispiel aus Abb. 16 wird der Grenzwasserstand bei 122,5 mNN bei einer Erhöhung der Niederschlagssumme um 26% erreicht.



Skalierung der Niederschlagsbelastung
(DVWK-Regen)

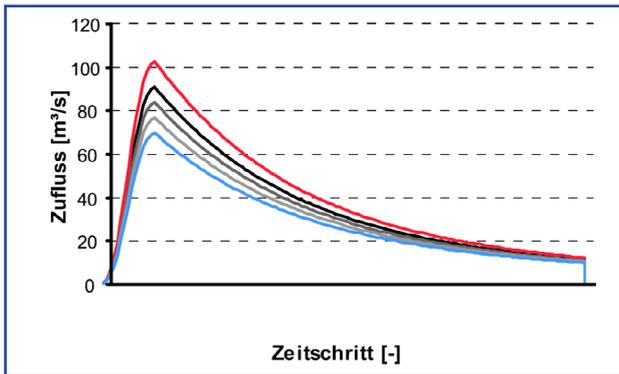


maximaler Wasserstand

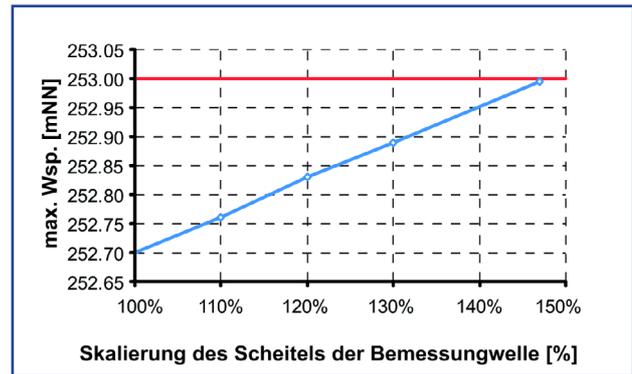
Abb. 16: Skalierung der Belastung bei Anwendung eines N-A-Modells

5.2 Skalierung der Belastung mit Hilfe der Hochwassermerkmal-Simulation

Ist die Hochwassermerkmal-Simulation das Verfahren zur Ermittlung der Bemessungsabflüsse, so wird nicht der Niederschlag, sondern die zum BHQ_2 gehörende Bemessungsganglinie nach oben skaliert, bis der maximale Wasserstand erreicht wird. Dazu wird die Welle proportional nach oben gezogen.



Skalierung der Bemessungsganglinie



maximaler Wasserstand

Abb. 17: Skalierung der Belastung bei Anwendung der Hochwassermerkmal-Simulation

Die Rückrechnung der Wellenfülle auf den Niederschlag unter der Annahme eines Abflussbeiwertes von 1 zeigt die erforderliche Skalierung des Niederschlages.

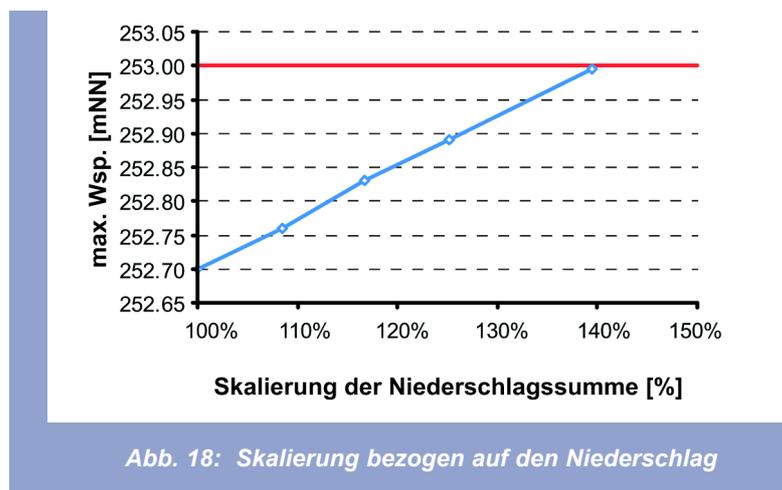


Abb. 18: Skalierung bezogen auf den Niederschlag

Eine proportionale Erhöhung der Bemessungswelle um 47% liefert im Beispiel den maximalen Wasserstand in der Stauanlage auf Höhe von 253,00 mNN. Auf den Niederschlag bzw. die Wellenfülle bezogen wird dieser Wasserstand bei einem Anstieg von 39% erreicht.